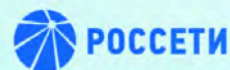




ФСК



## МАТЕРИАЛЫ

IX Международной молодежной  
научно-технической конференции

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2018

Казань, 1–5 октября

Том III



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
АО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»  
ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»  
ПАО «РОССЕТИ»  
РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА  
ПО БОЛЬШИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (РНК СИГРЭ)  
БЛАГОТВОРИТЕЛЬНЫЙ ФОНД «НАДЕЖНАЯ СМЕНА»

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2018

Материалы  
IX Международной молодежной научно-технической конференции

1–5 октября 2018 г.

В трех томах

Том 3



Казань  
2018

Рецензенты:

канд. техн. наук, проректор по научной работе ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» П.В. Илюшин  
д-р хим. наук, директор Института теплоэнергетики, заведующая кафедрой  
«Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «КГЭУ» Н.Д. Чичирова  
д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий  
и энергоресурсосберегающих технологий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» В.К. Ильин  
канд. техн. наук, заведующая кафедрой «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,  
организаций и учреждений» ФГБОУ ВО «КГЭУ» Н.В. Роженцова  
заместитель начальника Департамента организационного развития,  
начальник отдела развития персонала АО «СО ЕЭС» А.А. Шутенко  
д-р пед. наук, первый проректор – проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «КГЭУ» А.В. Леонтьев

Редакционная коллегия:

Э.В. Шамсутдинов (отв. редактор), А.Г. Арзамасова, И.А. Москвин

**Э45** **Электроэнергетика глазами молодежи – 2018:** матер. IX Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Казань, 1–5 октября 2018 г.): в 3 т. / редкол.: Э.В. Шамсутдинов (отв. редактор) и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – Т. 3. – 368 с.

ISBN 978-5-89873-520-3 (т. 3)

ISBN 978-5-89873-517-3

Опубликованы материалы IX Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» по научным направлениям «Перспективные направления развития электроэнергетики, экономика и экология», «Промышленная энергетика. Энергоэффективность», «Образовательные технологии и программы подготовки специалистов для электроэнергетики»: распределенная энергетика; накопители энергии в электроэнергетических системах; управление спросом; управляемые линии электропередач (FACTS); возобновляемые источники электроэнергии; экология в электроэнергетике; рыночные механизмы в электроэнергетике; энергосберегающие системы и оборудование при транспортировке топливно-энергетических ресурсов, а также при выработке, распределении и использовании энергии; энергоэффективные решения для инженерных систем, систем электро- и теплоснабжения зданий и сооружений; энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы; системы учета и мониторинга для энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов; программы и методики повышения квалификации работников; реновация образовательных процессов профильных кафедр вузов по подготовке специалистов для электроэнергетической отрасли; системы тренажерной подготовки.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в сфере энергетики, а также для студентов вузов энергетического профиля.

Материалы публикуются в авторской редакции. Ответственность за их содержание возлагается на авторов.

УДК 621.313  
ББК 31.2

ISBN 978-5-89873-520-3 (т. 3)  
ISBN 978-5-89873-517-3

© Министерство энергетики Российской Федерации, 2018  
© Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 2018  
© Казанский государственный энергетический университет, 2018

## ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



ФГБОУ ВО «Казанский  
государственный  
энергетический  
университет»



АО «Системный оператор  
Единой энергетической  
системы»



Российский Национальный  
Комитет Международного  
Совета по большим  
электрическим системам  
высокого напряжения  
(РНК СИГРЭ)



Международный Совет  
по большим электрическим  
системам высокого  
напряжения (СИГРЭ)



ПАО «Федеральная сетевая  
компания Единой  
энергетической системы»



ПАО «РОССЕТИ»



Благотворительный Фонд  
«Надежная смена»

## ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



Министерство энергетики  
Российской Федерации



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

## ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР



Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение»

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Журнал «Энергия единой сети»



Журнал «Электрические станции»



Журнал «Вестник КГЭУ»



Журнал «Известия вузов. Проблемы энергетики»



Журнал «Вестник СамГТУ»



Журнал «Вести в электроэнергетике»



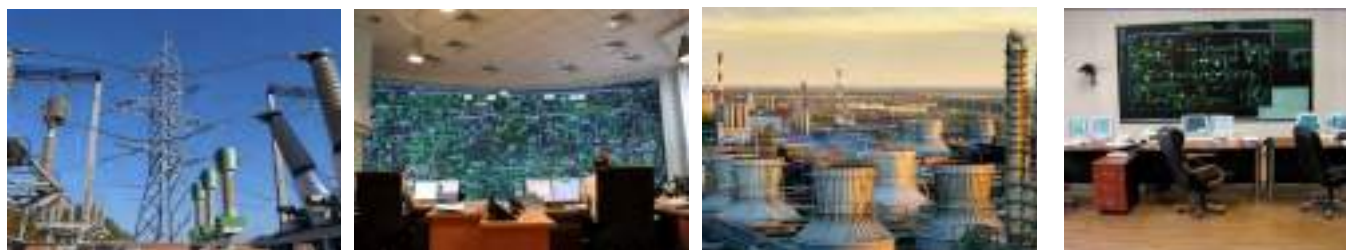
Журнал «Энергетик»



Журнал «Промышленная энергетика»

## **Секция № 5**

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ**



## **Scientific sections № 5**

### **FUTURE POWER SYSTEM DEVELOPMENT, ELECTRICITY MARKETS AND ECOLOGY**



# GEOGRAPHICAL OPTIMIZATION OF RENEWABLE ENERGY PORTFOLIOS WITH REGARDS TO OUTPUT RISKS IN NEW YORK STATE INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR (NYISO)

I. Karnaukhov

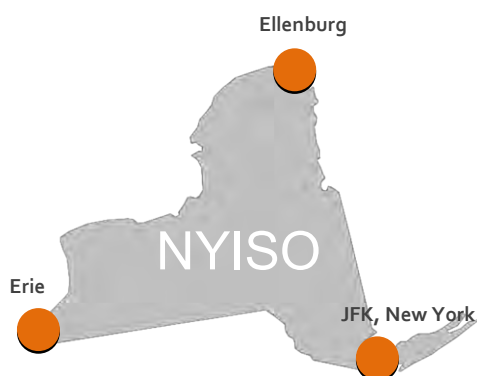
Columbia University, The United States of America & Hertie School of Governance, Germany  
ilya.karnaukhov@columbia.edu

## I. ABSTRACT

In 2016 the New York State Public Service Commission announced an ambitious mandate: 50% of New York's electricity would need to come from renewable energy sources by 2030. Making Variable Renewable Energy (VRE) output fluctuations less pronounced is one of the ways to achieve the state's policy. This project proposes a simple retrospective simulation based on the established correlations between wind speeds and solar insolation in the region, as well as among the corresponding energy outputs. Based on the conducted analysis, both positive correlations between wind energy outputs across the region and negative correlations between solar PV and wind outputs were established. Those results allowed to run a simulation which let to some prominent findings: without altering the total energy output ( $-0.02\%$  change), the standard deviation of the geographically optimized portfolio decreased by  $5.5\%$ .

## II. SUMMARY

The paper represents a quantitative project aiming to reduce Variable Renewable Energy (VRE) hourly output fluctuations in New York State Independent System Operator (NYISO). This goal is achieved by building a simple retrospective simulation based on the established correlations between wind speeds and solar insolation in the region, as well as among the corresponding energy outputs. Three sites across the state were chosen each representing a prime location for one of the renewable technologies: northern point in Ellenburg for Onshore Wind, western point in Erie for Offshore wind, and south point in John Kennedy Airport for Solar Photovoltaic (PV).



Picture 1 – Portfolio Locations. Source: Google & Karnaukhov

Ten years of high-resolution spatial meteorological data (2007 – 2016) for each site was obtained and evaluated (both winds and solar insolation time series). Based on the conducted analysis, both positive correlations between wind energy outputs across the region and negative correlations between solar PV and wind outputs were established. Those correlations are held true for both hour-by-hour correlations and monthly averages but the magnitude of those co-dependencies varies significantly. The maximum positive/negative correlation based on the hourly analysis is observed between Ellenburg and JFK wind energy outputs (0.79), and between Ellenburg Solar and Erie Wind ( $-0.30$ ) respectively. As for the monthly averages, the established correlations statistically are significantly stronger and vary between (0.98) between Ellenburg and JFK to ( $-0.83$ ) between Erie Offshore and JFK PV outputs. Those results encouraged to run a portfolio simulation. Consisting of only three stations, Solar PV, Onshore Wind, and Offshore Wind, and simultaneously changing the initial installed capacity of both Offshore and Solar PV stations by thirty percent, a noticeable reduction in the energy outputs fluctuations was achieved. Without altering the total energy output ( $-0.02\%$  change), the standard deviation of the optimized portfolio decreased by  $5.5\%$ . Those findings may become an initial step in developing a detailed map of weather/energy output correlations in NYISO or any other power system. It also could serve as a base for making investment decisions whether achieving a state policy of increasing renewables' share or a company's approach to reduce its investment risks and to increase the revenue. Despite the promising results of this study, the findings should be treated with caution due to the various limitation of the performed analysis. No matter how strong relationships are established, it should not be interpreted as a direct causation, thus, stronger wind in the north of New York State (NYS) does not cause less solar insolation in the south due to a complexity of the atmospheric processes.

## III. BACKGROUND

VRE have a high degree of intermittency and its integration to the existing electric grids represents a great challenge. Both wind and Solar PV energy outputs depend on the local weather which is not feasible to forecast precisely beyond some short time horizons. Moreover, correlations between various meteorological variables are nebulous and not well understood. Not much research has been done regarding both establishing meteorological dependencies between atmospheric variables and understanding how a better interpretation of such data might reduce renewable energy



output fluctuations. To the best of our knowledge, a high-resolution, long time series weather correlation analysis for New York State has never been performed. This paper is an attempt to fill the gap.

#### IV. METHODS

- Conducting an extensive literature overview and underlining the effect of geographical diversification in order to reduce the output risk VRE portfolio (onshore, offshore, solar);
- Determining a magnitude of correlations and interdependencies between meteorological data sets; Establishing effects of weather correlations on Solar PV, Offshore and Onshore energy output fluctuations in the State of New York through a high-resolution time series;
- Running a simplified retrospective energy output model that could be taken as a base for investment decisions to achieve a state policy or increasing renewables' share in the electricity market.

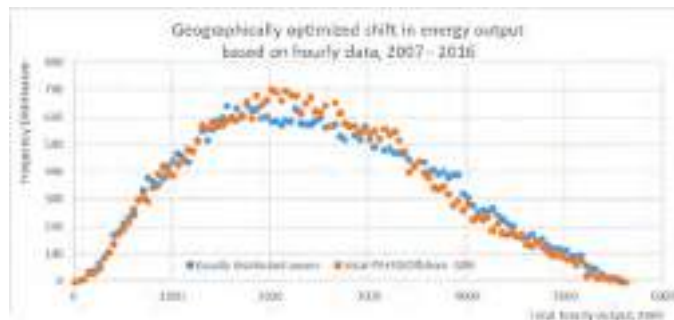
#### V. RESULTS

We established correlations between Solar PV, Offshore and Onshore energy output fluctuations in New York State through a high-resolution time series. That analysis yielded some valuable interdependencies between our base stations in the state. Hourly energy output analysis revealed the correlations between  $-0.30$  (solar and wind) to  $0.79$  (wind only locations).

10 years hourly	JFK wind	Ellenburg wind	Erie wind	JFK solar	Ellenburg solar	Erie solar
JFK wind	1.00					
Ellenburg wind	0.79	1.00				
Erie wind	0.38	0.37	1.00			
JFK solar	-0.05	0.04	-0.15	1.00		
Ellenburg solar	-0.17	-0.09	-0.30	0.73	1.00	
Erie solar	-0.04	0.03	-0.26	0.69	0.71	1.00

Picture 2 – Wind and Solar Energy Output Correlations. Source: Karnaukhov

We created and run a simple simulation to reduce the energy output fluctuations based on the earlier established correlations. The results are promising for future research in this matter: 5.5% decrease of the standard deviation, the mean of the frequency distribution dropped by 53 points, and less overall variability of total VRE outputs was detected.



Picture 3 – Geographically optimized shift. Source: Karnaukhov

#### VI. CONCLUSIONS

A simple simulation yielded some valuable results: geographic optimization of VRE outputs reduces the energy output fluctuations. At this point, more quantitative research should be conducted regarding establishing correlations between weather patterns in New York state. Ideally, an integrated map showing all the best solar and wind resources in the state including the correlation between them should be created. Probably a countless combination of portfolios with the lowest possible fluctuations possible without even building renewable farms at the prime locations but a comprehensive and deep research and analysis is needed to prove that point. A deeper understanding of geographical weather/climate correlations of a region will allow owners/stakeholders of renewable portfolios to optimize their portfolios with regards to risk/return profiles.

#### Work Cited

- [1] Dvorak M. Where is the ideal location for a US East Coast offshore grid? Geophysical Research Letter, Vol. 39, L06804, doi:10.1029/2011GL050659, 2012.
- [2] Haaren R., GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3332– 3340.
- [3] International Energy Agency . Harnessing variable renewables: a guide to the balancing challenge. Paris: IEA; 2011.
- [4] Jacobson MZ, Delucchi MA. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy 2011;39:1154–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040>.
- [5] Krapels, Edward. New York as a clean energy hub. The Electricity Journal 29 (2016) 23–29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619016301154>
- [6] Lave M, Kleissl J, Arias-Castro E. High-frequency irradiance fluctuations and geographic smoothing. Sol Energy 2012;86:2190–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.031>.
- [7] Wan YH. Long-term wind power variability. National renewable energy laboratory tech. rep. NREL/TP-5500-53637; 2012
- [8] Winkler J., Pudlik M, Ragwitz M., Pfluger B. The market value of renewable electricity – Which factors really matter? Applied Energy. Volume 184, 15 December 2016, Pages 464-481. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916314210>.

# ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

Агапова Е.Э., Савельева Н.С., Толстихина Л.В.  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Саяно-Шушенский филиал СФУ  
Саяногорск, рп. Черемушки, Россия  
ekaterina-eduardovna-agapova@yandex.ru, natali-saveleva-1997@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Республика Хакасия является регионом богатым, гидроэнергетическими ресурсами, большая часть которых в настоящее время не используется. Проблема эффективного использования гидропотенциала актуальна, в связи с увеличением спроса на электроэнергию для электроснабжения новых предприятий и населённых пунктов. Строительство малых ГЭС поможет решить данный вопрос, а также положительно скажется на экономическом развитии Республики Хакасия.

**Материалы и методы:** Использовался графоаналитический метод.

**Результаты:** Определены местоположение створа в соответствии с программой генерального развития Республики Хакасия, параметры малой гидроэлектростанции: установленная мощность, среднесуточная выработка электроэнергии, расчётный расход. Произведён выбор энергоэффективного оборудования, с учётом которого была уточнена годовая выработка станции. Проанализировано влияние работы гидроэлектростанции на развитие Республики Хакасия.

**Выводы:** Доказана зависимость эффективной работы ГЭС и выбранных параметров. Данная методика расчёта установленной мощности и выбора энергетического оборудования может быть использована, например, в студенческих работах.

**Ключевые слова:** малые ГЭС, электроэнергия, эффективность, гидроэнергетический потенциал.

# EFFECTIVE USE OF HYDROPOWER POTENTIAL OF THE REPUBLIC OF KHAKASSIA

E. Agapova, N. Savel'eva, L. Tolstikhina  
Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch office  
Sayanogorsk, Cheryomushki, Russian Federation  
ekaterina-eduardovna-agapova@yandex.ru, natali-saveleva-1997@mail.ru

## Abstract

**Background:** The Republic of Khakassia is a region rich in hydropower resources, but most of them are not currently used. The problem of efficient use of the hydro potential is relevant, because in the future it will be necessary to supply electricity to new enterprises and settlements. The construction of small hydroelectric power stations will help to solve this issue, as well as a positive impact on the economic development of the Republic of Khakassia.

**Materials and methods:** the graphic-analytical method was Used.

**Results:** the location of the target in accordance with the program of General development of the Republic of Khakassia, the parameters of small hydroelectric power: installed capacity, average annual electricity generation, estimated consumption. The choice of energy-efficient equipment was made, taking into account which the annual output of the station was clarified. The influence of the hydroelectric power station on the development of the Republic of Khakassia was analyzed.

**Conclusions:** the dependence of the effective operation of the HPP and the selected parameters is Proved. This method of calculation of installed capacity and selection of power equipment can be used, for example, in student work.

**Keywords:** small hydropower plants, electricity, efficiency, hydropower potential

## I. ВВЕДЕНИЕ

Республика Хакасия является регионом, богатым гидроэнергетическими ресурсами, большая часть которых в настоящее время не используется. В перспективе, с учётом развития региона, электроэнергия малых ГЭС (МГЭС) будет необходима для электроснабжения новых предприятий

и населённых пунктов. Согласно программе генерального развития Республики Хакасия будут созданы: Бейский угольный кластер, металлургическое предприятие на базе рудников в Абазе и Вершине Тёи, завод по производству электролитического металлического марганца в п. Туим и др. [1] (рис.1).



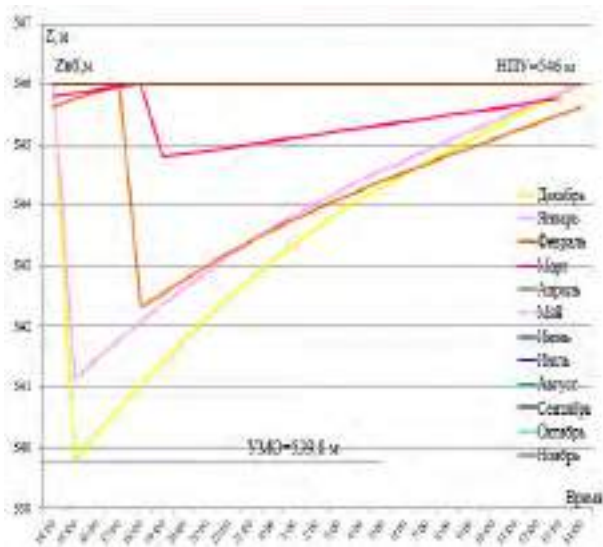


Рис. 5 – График сработки-наполнения водохранилища

Таблица I – ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГОДОЛЕТНЕЙ ВЫРАБОТКИ

Месяц	Э <sub>сут</sub> , млн кВт·ч	Э <sub>мес</sub> , млн кВт·ч	Э̄, млн кВт·ч
Январь	0,026	0,78	61,92
Февраль	0,024	0,72	
Март	0,017	0,51	
Апрель	0,096	2,88	
Май	0,353	10,59	
Июнь	0,418	12,54	
Июль	0,432	12,96	
Август	0,278	8,34	
Сентябрь	0,222	6,66	
Октябрь	0,113	3,39	
Ноябрь	0,058	1,74	
Декабрь	0,027	0,81	

### III. ВЫБОР ОСНОВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Из построенного режимного поля (рис. 6) определяем:

- максимальный напор  $H_{\max} = 19,5$  м;
- расчётный напор  $H_{\text{расч}} = 12,7$  м;
- минимальный напор  $H_{\min} = 9,9$  м;
- расчётный расход  $Q_{\text{расч}} = 181$  м<sup>3</sup>/с.

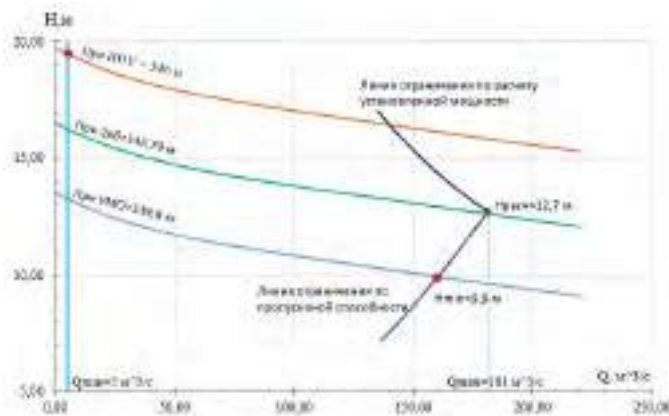


Рис. 6 – Режимное поле

По построенному режимному полю и посчитанным параметрам производим выбор энергетического оборудования для Онакской ГЭС.

Для данного максимального напора подходят гидротурбины: ПЛ20-В и ПЛ20-ГК [4], для которых рассчитываем КПД, мощность и число установленных агрегатов на проектируемой гидростанции, а также минимальные, максимальные и расчётные частоты для ряда стандартных диаметров.

Анализируя все варианты, приходим к выводу, что допустимую зону работы на ГУХ имеют турбины ПЛ20-В-315 и ПЛ20-ГК-315.

Результаты расчёта параметров гидротурбин представлены в табл. II.

Таблица II – РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

Параметры	ПЛ20-В	ПЛ20-ГК
$D_1$ , м	3,15	3,15
$\eta_T$	0,908	0,900
$N'_{\text{агр}}$ , кВт	7175,2	10670,7
$z'_a$ , шт	2,56	1,72
$z_a$ , шт	3	2
$N_{\text{агр}}$ , кВт	6133,3	9200,0

Значения годовой выработки определяем по выражению (4):

$$E_{\text{год}} = E_{\text{о-з}}^{\text{сут}} \cdot t_{\text{о-з}} + E_{\text{в-л}}^{\text{сут}} \cdot t_{\text{в-л}}, \quad (4)$$

где  $E_{\text{о-з}}^{\text{сут}}$ ,  $E_{\text{в-л}}^{\text{сут}}$  – выработка электроэнергии для характерных суток соответственно осенне-зимнего и весенне-летнего периодов;  $t_{\text{о-з}}$ ,  $t_{\text{в-л}}$  – длительность осенне-зимнего и весенне-летнего периодов, соответственно.

Для ПЛ20-В-315:

$$E_{\text{год}} = 33,17 \cdot 184 + 423,47 \cdot 181 = 82,75 \text{ млн кВт} \cdot \text{ч.}$$

Для ПЛ20-ГК-315:

$$E_{\text{год}} = 32,33 \cdot 184 + 412,02 \cdot 181 = 80,52 \text{ млн кВт} \cdot \text{ч.}$$

По результатам расчётов выбираем турбину ПЛ20-В-315, так как она обладает лучшими техническими характеристиками.

### IV. РАСЧЁТ НАЛОГОВЫХ ОТЧИСЛЕНИЙ

Рассчитаем поступления в бюджет Республики Хакасия от оплаты водного налога данной МГЭС.

Для реки Она налоговая ставка в рублях за 1 тыс. кВт·ч электроэнергии составляет 13,70 руб. [5].

Расчёт налоговых отчислений в бюджет республики Хакасия до 2025 года представлен в табл. III.

Таблица III – РАСЧЁТ НАЛОГООТЧИСЛЕНИЙ С УЧЁТОМ  
КОЭФФИЦИЕНТА НАЛОГОВОЙ СТАВКИ

Год	Коэффициент налоговой ставки	Сумма налогоотчислений за год, млн руб.
2018	1,75	1,98
2019	2,01	2,28
2020	2,31	2,62
2021	2,66	3,02
2022	3,06	3,47
2023	3,52	3,99
2024	4,05	4,59
2025	4,65	5,27

С каждым годом коэффициент налоговой ставки будет возрастать, а вместе с этим будет увеличиваться сумма оплаты налога за пользование водными ресурсами, что увеличит поступления в бюджет Республики Хакасия.

#### V. ВЫВОДЫ

1. Сооружение МГЭС на территории Республики Хакасия позволит осуществлять электроснабжение удалённых потребителей.
2. Был произведён выбор энергоэффективного оборудования планируемой МГЭС.

3. Произведён расчёт отчислений от оплаты водного налога в бюджет Республики Хакасия при строительстве планируемой МГЭС.
4. Данная методика расчёта установленной мощности и выбора энергетического оборудования может быть использована, например, в студенческих работах.

#### Список литературы

- [1] Постановление об утверждении схемы и программы перспективного развития электроэнергетики в Республике Хакасия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/432991888/>
- [2] Васильев Ю.С., Сидоренко Г.И., Фролов В.В. Методика обоснования параметров малых гидроэлектростанций // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2012. № 2, ч. 1. С. 76–84, 374, 378.
- [3] Пташкина-Гирина О.С., Саплин Л.А. Методика определения установленной мощности гидроэнергетических установок на малых реках // Наука, техн. образ. 1998. С. 92–96.
- [4] Обоснование оптимальных параметров гидроагрегатов малых ГЭС // Гидротехн. стр.-во. 2010. № 1. С. 27–30.
- [5] Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая): федер. закон от 5 августа 2000 г. № 117-ФЗ (ред. от 7 марта 2018 г.).
- [6] Сема Е.Г., Фроленко Н.С., Тенешев А.В., Толстихина Е.А. Перспективы использования гидроэнергетических ресурсов республики Хакасия // Матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. 2017.
- [7] Новокрещенов О.В. Малая гидроэнергетика.
- [8] Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 16. Ангаро-Енисейский район / Под ред. В.Г. Соколовской. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. 1. 388 с.
- [9] Обоснование оптимальных параметров. Топаж, 2010.
- [10] Григорян Л.А., Демирчян Г.Г. Определение оптимальной мощности малых ГЭС (МГЭС) с учетом использования водных ресурсов реки.

# УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ FACTS В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Айметов И.О., Маряхина С.В., Логачева А.Г.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
sssveta1995@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Применение устройств компенсации реактивной мощности типа FACTS позволяет поддерживать требуемый уровень и качество напряжения, повысить пропускную способность линий электропередачи. Алгоритмы управления данных устройств должны с одной стороны обеспечивать высокие показатели качества работы преобразователя в установившихся режимах, а с другой стороны обеспечивать работоспособность и высокое быстродействие в аварийных и послеаварийных режимах сети.

**Материалы и методы:** Использовался метод сравнения основных характеристик двух технологий.

**Результаты:** Приведены данные об уровне готовности СТАТКОМа и СТК в зависимости от класса напряжений, рассмотрены принцип работы и состав технологий.

**Выводы:** Научно-технический прогресс в области систем передачи электроэнергии развивается в направлении повышения их управляемости, устойчивости и надежности при обеспечении высокого качества энергоснабжения потребителей. Наиболее оптимально и комплексно указанные цели могут быть достигнуты путем применения технологии гибких (управляемых) линий электропередачи переменного тока (FACTS), содержащих современные многофункциональные устройства и, в частности, устройства регулирования реактивной мощности – СТАТКОМ.

**Ключевые слова:** увеличение пропускной способности, снижение потерь, технологии СТК и СТАТКОМ, лидеры производства.

# LEVEL OF DEVELOPMENT OF REACTIVE POWER COMPENSATION TECHNOLOGIES FOR FACTS IN RUSSIA AND ABROAD

I. Aymetov, S. Maryakhina, A. Logacheva  
Kazan State Energy University  
Kazan, Russian Federation  
sssveta1995@mail.ru

## Abstract

**Background:** The use of reactive power compensation devices such as FACTS allows you to maintain the desired level and quality of voltage, increase the capacity of power lines. The control algorithms of such devices must, on the one hand, to ensure the high performance of the Converter in steady-state mode, and, on the other hand, to ensure operability and high speed in emergency and post-accident modes of the network.

**Materials and methods:** A method was used to compare the main characteristics of two technologies.

**Results:** Data on the readiness level of STATCOM and STK depending on stress class are presented, the working principle and composition of technologies are considered.

**Conclusions:** Scientific and technological progress in the field of power transmission systems is developing in the direction of increasing their manageability, stability and reliability while ensuring a high quality of energy supply to consumers. The most optimally and comprehensively specified goals can be achieved by using the technology of flexible (controlled) AC transmission lines (FACTS) containing modern multi-functional devices and, in particular, reactive power control devices – STATCOM.

**Key words:** increase in capacity, loss reduction, STK and STATCOM technologies, production leaders.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире наблюдается растущий интерес к бурно развивающемуся в последние десятилетия направлению в сфере передачи электроэнергии на базе новой технологической основы – активно-адаптивных сетей, называемых Smart Grid («Умные сети»).

Базовым кластером системы Smart Grid являются устройства, относящиеся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS).

Среди мировых лидеров-производителей оборудования FACTS можно выделить такие компании, как АВВ (Швейцария), Siemens (Германия), Areva (Франция). В России

активно занимается разработкой и производством оборудования на основе передовых технологий электроэнергетики ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Вопросы увеличения пропускной способности и снижения потерь являются весьма актуальными для электросетевого комплекса любой страны. Закономерно, что среди направлений разработки FACTS развиваются технологии, позволяющие решить обозначенные выше проблемы. Примером такой технологии являются статические компенсаторы реактивной мощности.

## II. ТЕХНОЛОГИИ СТК И СТАТКОМ

На сегодняшний день статические компенсаторы для FACTS можно разделить на две укрупненные группы. Это статические тиристорные компенсаторы (СТК, в зарубежных источниках SVC) и статические компенсаторы на базе полностью управляемых полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторах, называемые СТАТКОМ (в зарубежных источниках STATCOM) [1].

Конфигурация СТК включает в себя набор фильтров высших гармоник и тиристорно-реакторную группу. Угол зажигания тиристоров изменяется так, что ток в реакторе отслеживает ток нагрузки или реактивную мощность в энергосистеме.

СТАТКОМ – источник напряжения с внутренним сопротивлением, равным нулю. Основное оборудование: трехфазные инвертор, реактор, фильтр, разъединитель, силовой трансформатор; система управления и защиты; шкафы. Схема управления СТАТКОМа состоит из управляемых полупроводниковых приборов. Она осуществляет контроль напряжения сети тока нагрузки, компенсирует реактивную мощность нагрузки, а также следит за оборудованием, осуществляя защиту в аварийных ситуациях. В табл. I приведены основные характеристики СТАТКОМ и СТК.

Таблица I – ХАРАКТЕРИСТИКИ СТК И СТАТКОМ

СТАТКОМ	СТК
Полный диапазон регулирования	Ограниченный диапазон регулирования
Низкая генерация гармоник	Высокая генерация гармоник
Быстродействие (порядка миллисекунды)	Медленное реагирование
Режим работы емкостной и индуктивный	Режим работы только емкостной
Лучшие динамические характеристики	Габаритные устройства
Меньшие размеры	Менее экономичная эксплуатация
Низкие потери мощности	–

## III. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ СТАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ ДЛЯ FACTS

Технология СТК старше СТАТКОМ на несколько десятилетий, устройства на ее основе производятся и эксплуатируются во многих организациях мира с 1960-х годов. СТАТКОМ – более молодая технология, сообщения о ней стали появляться в 1990-х.

В табл. II приведены сведения об уровне готовности технологий.

Таблица II – КЛАСС НАПРЯЖЕНИЙ СТК И СТАКОМ ПО УРОВНЯМ ГОТОВНОСТИ

Напряжение, кВ	Уровень готовности	
	СТК	СТАТКОМ
500	TRL 9	
220		
110		
10		

**Примечание.** TRL 9 – демонстрация технологии в окончательном виде при летных испытаниях образца.

Несомненными лидерами производства СТК и СТАТКОМ за рубежом можно считать такие компании, как АВВ, Siemens, General Electric, Westinghouse и др.

В России также налажено производство СТК, выполняются НИР и ОКР по разработке СТАТКОМ. Основные разработчики в России это ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ФГУП ВЭИ, ОАО «Электровыпрямитель». В ОАО «НТЦ электроэнергетики» в 2006–2007 гг. был создан СТАТКОМ, предназначенный для установки в г. Выборге на подстанцию 330/400 кВ. Мощный преобразовательный комплекс СТАТКОМ был установлен в 2009 г. на ПС 220 кВ «Могоча». В 2011–2012 гг. проведена апробация технологии в энергокластерах «Кола», «Коми», «Большое кольцо Санкт-Петербурга».

В первом отечественном СТАТКОМ, созданном ОАО «НТЦ электроэнергетики» совместно с ООО «НПЦ Энерком-Сервис», применена система управления, релейной защиты и автоматики собственной разработки. Отличием отечественного СТАТКОМ от зарубежных аналогов является то, что в нем использованы только транзисторные вентили. Такой подход создает возможность более гибкого управления и дополнительного снижения потерь.

На базе этой технологии ООО «НПЦ Энерком-Сервис» в настоящее время разрабатывает оборудование вставки постоянного тока мощностью 200 МВт для создания несинхронной связи энергосистем Сибири и Востока, в настоящее время работающих раздельно.

## Список литературы

- [1] Устройства и технологии управления линиями переменного тока (FACTS). URL: [http://www.ntc-power.ru/innovative\\_projects/devices\\_and\\_technology\\_management\\_lines\\_of\\_alternating\\_current\\_facts/](http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/devices_and_technology_management_lines_of_alternating_current_facts/) (дата обращения: 23.03.18).
- [2] СТАТКОМ. URL: [http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent\\_network/new\\_types\\_of\\_power\\_equipment\\_of\\_substations\\_and\\_overhead\\_power\\_lines/static\\_compensator\\_statcom/](http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/static_compensator_statcom/) (дата обращения: 25.03.18).
- [3] СТАТКОМ. URL: <http://nidec-asi-vei.ru/produktsiya/statkomi-dlya-nuzhd-promishlennosti-i-energetiki/> (дата обращения: 25.03.18).

# ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ МЕТОДОМ КОУТСА – РЕДФЕРНА

Алтынбаева Д.Б., Табакаев Р.Б.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
Томск, Россия  
Dba10@tpu.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Энергетика является одним из основных источников загрязнения окружающей среды. В связи с этим мировое научное сообщество стремится снизить её негативное воздействие на здоровье людей и природу. Для этого часть органического сырья, являющегося топливом для электростанций, постепенно замещают возобновляемыми ресурсами, в частности – биомассой. Сжигание биомассы традиционными способами сопровождается высокими эксплуатационными затратами, что приводит к выводу о необходимости её переработки в энергетически ценные продукты. Развитие одного из наиболее перспективных подобных направлений – термической переработки – требует изучения теплофизических свойств биомассы и изучения её кинетики разложения. Целью настоящей работы является оценка энергии активации термического разложения биомассы методом Коутса – Редферна.

**Материалы и методы:** Использовались дифференциальный термический и гравиметрический анализы, метод Коутса – Редферна для оценки энергии активации.

**Результаты:** В работе приведены результаты ДТА и ТГА проб нескольких видов биомассы (соломы, щепы и торфа). Методом Coats – Redfern, разработанным для оценки результатов термического анализа, рассчитана энергия активации термического разложения рассматриваемых проб биомассы: энергия активации первой стадии пиролиза соломы составила 74,2 кДж/моль, щепы – 85,0 кДж/моль, торфа – 68,9 кДж/моль; для второй стадии энергия активации для соломы составила – 29,1 кДж/моль, щепы – 11,7 кДж/моль, торфа – 18,9 кДж/моль.

**Выводы:** Установлено, что термическое разложение биомассы протекает в две стадии: первая начинается при температурах 162–180 °С и заканчивается при 340–366 °С; вторая стадия – от 340–366 °С до 565–595 °С. При этом наиболее энергозатратным сырьём для термической переработки является солома, а менее энергозатратным – торф.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, биомасса, низкотемпературный пиролиз, энергия активации, метод Коутса – Редферна.

## EVALUATION OF ACTIVATION ENERGY OF THERMAL DECOMPOSITION OF BIOMASS BY THE COATS – REDFERN METHOD

D. Altynbaeva, R. Tabakaev  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
Tomsk, Russian Federation  
Dba10@tpu.ru

## Abstract

**Background:** Energy is one of the main sources of environmental pollution. In this regard, the world scientific community seeks to reduce its negative impact on human health and nature. To do this, some of the organic raw materials, which are fuel for power plants, are gradually replaced by renewable resources, in particular – biomass. The combustion of biomass by traditional methods is accompanied by high operating costs, which leads to the conclusion that it is necessary to process it into energy-valuable products. The development of one of the most promising such directions – thermal processing – requires studying the thermophysical properties of biomass and studying its kinetics of decomposition. The aim of this work is to estimate the activation energy of thermal decomposition of biomass by the method of Coats – Redfern.

**Materials and methods:** Differential thermal and gravimetric analyzes were used, the Coats – Redfern method for evaluating the activation energy.

**Results:** The results of DTA and TGA of samples of several types of biomass (straw, chips and peat) are presented. The activation energy of the thermal decomposition of the biomass samples was calculated by the method of Coats – Redfern, designed to evaluate the results of thermal analysis: the activation energy of the first stage of pyrolysis of straw was 74.2 kJ/mol, chips – 85.0 kJ/mol, peat – 68.9 kJ/mol; for the second stage, the activation energy for straw was – 29.1 kJ/mol, chips – 11.7 kJ/mol, peat – 18.9 kJ / mol.



**Conclusions:** It has been established that the thermal decomposition of biomass proceeds in two stages: the first begins at temperatures of 162–180 °C and ends at 340–366 °C; the second stage is from 340–366 °C to 565–595 °C. The most energy-consuming raw material for heat treatment is straw, and less energy-consuming – peat.

**Key words:** renewable energy, biomass, low-temperature pyrolysis, activation energy, Coats – Redfern method.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], энергетика является одним из основных источников загрязнения окружающей среды. Причём наибольший ущерб окружающей среде наносят станции, использующие в качестве топлива каменные и бурые угли, антрациты. По данным Всемирной организации здравоохранения [1, 2] загрязнение воздуха приводит к преждевременной смертности нескольких миллионов человек в год, что сопоставимо с численностью крупного мегаполиса.

В связи с этим развитые и развивающиеся страны (например, США, Финляндия, Франция, Канада и др. [3]) объявили о политике по постепенному сокращению использования ископаемого органического топлива для выработки энергии. Замещение органического топлива должно осуществляться за счёт увеличения доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнце, ветер, биомасса и др. Использование ВИЭ повышает экологическую чистоту выработки энергии; уменьшает внешнюю энергетическую зависимость стран, не имеющих собственных топливных ресурсов; стимулирует развитие местного и регионального производства; способствует развитию агропромышленного комплекса и созданию новых рабочих мест [4]. В 2015 году на основе ВИЭ выработано 7,1 % электроэнергии (без учёта гидроэнергетики) [5]. При этом в Европейском союзе планируется к 2020 году увеличить долю такой выработки до 20 % [6].

Биомасса рассматривается как один из наиболее важных и перспективных ВИЭ, что обусловлено её повсеместной распространённостью и большими объёмами образования. Считается, что биомасса нейтральна в циркуляции двуокиси углерода: при её сжигании образуется такое же количество углекислого газа, что было поглощено при её жизни в результате фотосинтеза. В составе биомассы практически не содержится серы, что обеспечивает низкие выбросы SO<sub>x</sub> при её сжигании [7]. В настоящее время доля биомассы в мировом топливно-энергетическом балансе составляет около 9,7 % [5].

Однако её сжигание традиционными методами сопровождается рядом проблем, препятствующих её широкому применению в энергетике. Например, в естественном состоянии биомасса имеет высокую влажность, достигающую 30,4–79,7 % [8], что приводит к низкому значению теплоты сгорания в пересчёте на рабочее состояние. К тому же столь высокая влажность биомассы приводит к слеживанию, слипанию при транспортировке, а в зимние периоды – к смерзанию, что дополнительно усложнит процесс перевозки и разгрузки сырья [9]. Некоторые виды биомассы (например, отруби) при горении склонны к шлакованию поверхностей нагрева [10], в результате чего снижается ресурс работоспособности топливосжигающего оборудования и увеличиваются затраты на ремонтные работы. Неоднородный фракционный состав биомассы приводит к высокой величине провала через колосниковую решётку при слоевом сжигании, увеличивая потери с механическим недожогом ( $q_4$ ) и тем самым снижая общий КПД котла. Таким образом, энергетическое

использование биомассы традиционными методами сжигания сопровождается высокими эксплуатационными затратами, что препятствует её широкому применению в качестве топлива.

Ранее проведённые исследования [11] показывают перспективы термической переработки биомассы в энергетически ценные продукты, такие как высококалорийное твёрдое топливо, жидкое биотопливо или горючий газ. Сжигание этих продуктов даже традиционными методами имеет высокую эффективность и требует значительно меньших затрат по сравнению с использованием сырья в исходном виде.

Вариативное исследование термической переработки биомассы посредством физического эксперимента является трудозатратным процессом, требующим больших временных и материальных ресурсов. Построение математической модели и проведение численных исследований на её основе способствует повышению производительности и экономичности исследования. Создание модели термической переработки требует изучения большого количества физических и химических величин, необходимых для получения достоверных и адекватных результатов, в частности энергии активации.

В связи с этим целью настоящей работы является оценка энергии активации термического разложения биомассы методом Coats – Redfern.

## II. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассмотрено несколько проб биомассы: солома, щепы из различных пород древесины и низинный торф (месторождение Суховское, Томская область). Пробы предварительно высушены до воздушно-сухого состояния (табл. I).

Таблица I – Влажность исследуемых проб биомассы

Биомасса	Солома	Щепа	Торф
Влажность $w^2$ , %	8,5	8,5	11,5

Для оценки энергии активации проведены дифференциальный термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализы на термоанализаторе STA 449C Jupiter (Netzsch, Германия). Образцы нагревались со скоростью 10 °C в минуту (усреднённая скорость нагрева, согласно общепринятому стандарту полукоксования топлив ISO 647–74), температурный диапазон эксперимента составил от 20 до 600 °C. Масса навески проб составляла 50 мг. Анализы выполнены в инертной среде (He) с целью исключения влияния окислительных реакций на точность результатов исследования.

Величина энергии активации рассчитывалась по методу Коутса – Редферна [12]. В основе метода лежит гипотеза о том, что в процессе термического разложения твёрдых топлив протекают одноступенчатые реакции первого порядка, подчиняющиеся законам Аррениуса. Уравнение энергии активации согласно данному методу имеет вид:

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT}. \quad (1)$$

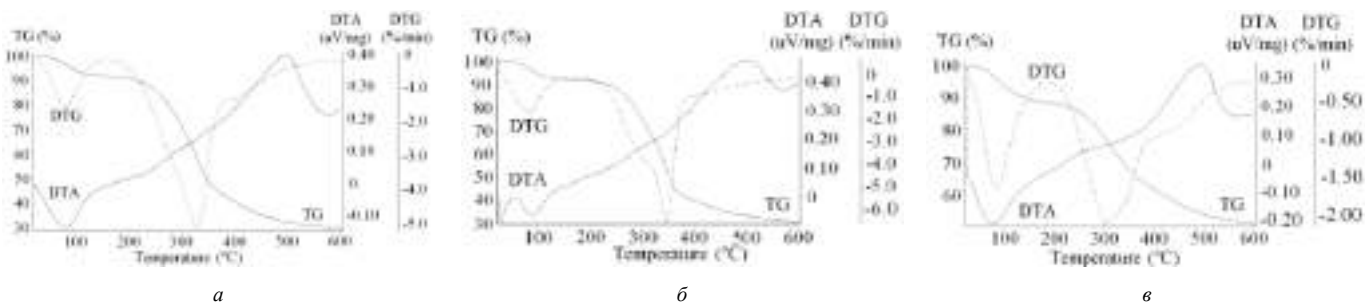


Рис. 1 – Кривые термического анализа: а – солома; б – щепы; в – торф

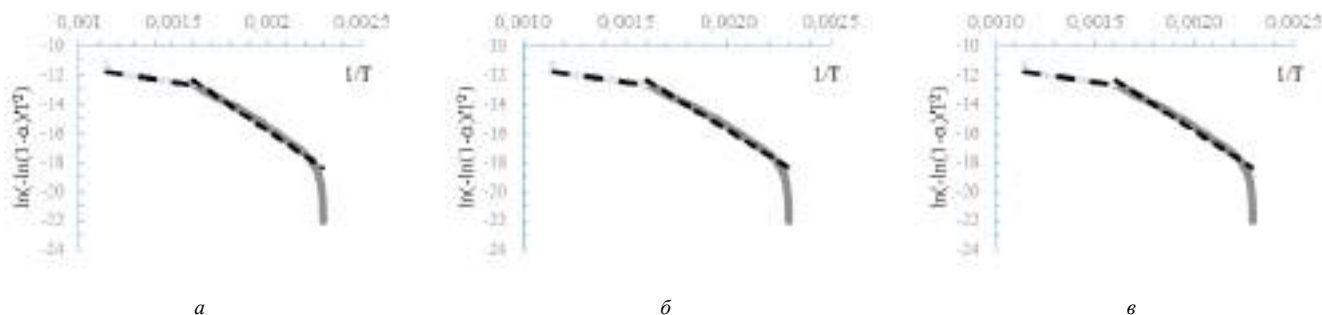


Рис. 2 – Зависимость  $\ln(-\ln(1-\alpha)/T^2)$  от  $1/T$ : а – солома; б – щепы; в – торф

Здесь  $\alpha = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_k}$ , где  $m_0$  – масса начала реакции, кг;

$m_k$  – конечная масса процесса, кг;  $m_i$  – масса в период времени  $i$ , кг;  $\alpha$  – степень конверсии;  $T$  – температура нагрева, К;  $A$  – предэкспоненциальный коэффициент;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $\beta$  – скорость реакции, К/мин.

Далее, для реакции первого порядка, в соответствии с (1), строится график зависимости  $\ln(-\ln(1-\alpha)/T^2)$  от  $1/T$ . Результатом является прямая, наклон которой равен  $E/R$ .

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты ДТА и ТГА рассматриваемых проб приведены на рис. 1. Видно, что в интервале температур от 20 до 140–150 °С наблюдается эндотермический пик, обусловленный испарением содержащейся в пробах влаги. При температурах 160–180 °С начинается термическое разложение биомассы, сопровождающееся уменьшением её массы (рис. 1, кривая ТГ). Основной экзотермический пик у соломы и щепы начинается при температуре 240 °С и оканчивается при температурах, близких к 580°С. При терморазложении торфа имеется два экзотермических пика: первый – 200–330 °С, второй – 380–560 °С.

Графически уравнение Коутса – Редферна представлено на рис. 2. Из рисунка видно, что разложение рассматриваемых проб биомассы протекает в 2-й стадии. Расчёт энергии активации для каждой стадии в зависимости от вида биомассы приведён в табл. II.

Таблица II – ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Биомасса	Энергия активации, кДж/моль		Температура, °С		
	I	II	начала разложения	переходная	окончания разложения
Солома	74,2	29,1	162	350	595
Щепа	85,0	11,7	180	366	575
Торф	68,9	18,9	180	340	565

Из полученных данных (табл. II) видно, что энергия активации на первой стадии имеет наибольшее значение для пробы щепы, наименьшее – для торфа. На второй стадии наибольшее значение энергии активации имеет солома, а наименьшее – щепы. Учитывая то, что энергия активации – это энергия, необходимая для разрыва связей между молекулами, то наиболее энергозатратным сырьём для переработки (учитывая обе стадии) является солома, а менее энергозатратным – торф.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведённых исследований других авторов [13].

### IV. ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты ДТА и ТГА проб нескольких видов биомассы (соломы, щепы и торфа). Методом Коутса – Редферна, разработанным для оценки результатов термического анализа, рассчитана энергия активации термического разложения рассматриваемых проб биомассы. Установлено, что термическое разложение биомассы протекает в две стадии: первая начинается при температурах 162–180°С и заканчивается при 340–366 °С; вторая стадия – от 340–366 °С до 565–595 °С. При этом наиболее энергозатратным сырьём для термпереработки является солома, а менее энергозатратным – торф.

### Список литературы

- [1] World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution // International Energy Agency, Paris, 2016.
- [2] The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale / J. Lelieveld [et al.] // Nature. Vol. 525. P. 367–371.
- [3] Попель О.С., Реутов Б.Ф., Антропов А.П. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 2–11.
- [4] Miguez, J.L., Lopez-Gonzalez, L.M., Salas, J.M., Porteiro, J., Granada, E., Morana, J.C., Juárez, M.C. Review of compliance with EU-2010 targets on renewable energy in Galicia (Spain) // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2006. Vol. 10. Issue 3. P. 225–247.
- [5] International Energy Agency (IEA): Key world energy statistics. France: Chirat, 2017. 97 p.
- [6] EU Road Map. URL: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/renewable\\_energy/127065\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/127065_en.htm) 2007.
- [7] Биомасса как источник энергии / Пер. с англ.; под ред. С. Соуфера, О. Заборски. М.: Мир, 1985. 368 с.
- [8] Vassilev, S.V., Vassileva, C.G., Vassilev, V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview // Fuel. 2015. Vol. 158. P. 330–350.
- [9] Uchitel', A.D., Kormer, M.V., Lyalyuk, V.P., Lyakhova, I.A., Shmel'tser, E.O., Vititnev, Y.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures // Coke and Chemistry. 2013. Vol. 56. P. 167–172.
- [10] Чернецкий, М.Ю., Дектерев, А.А., Бурдуков, А.П. Расчетное исследование факельного горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья // Журнал Сибирского федерального университета. 2013. Т. 6, Вып. 6. С. 625–636. (Сер. «Техника и технологии»).
- [11] Tabakaev, R., Shanenkov, I., Kazakov, A., Zavorin, A. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 124. P. 94–102.
- [12] Coats, A.W., Redfern, J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // Nature. 1964. Vol. 201. P. 68–69.
- [13] Lu, C., Song, W., Lin, W. Kinetics of biomass catalytic pyrolysis // Biotechnology Advances. 2009. Vol. 27. P. 583–587.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРО-, ТЕПЛО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ, ИНТЕГРАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И СРЕДСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГОГЕНЕРАЦИИ

Басенко В.Р., Айметов И.О., Манахов В.А., Логачева А.Г.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
vasiliybas123@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) России сегодня представляет собой совокупность динамически развивающихся отраслей. По своим масштабам ТЭК России является крупнейшим в мире и оказывает существенное влияние на экономический сектор страны. Поэтому заинтересованность государства, потребителей, энергетических, сбытовых и добывающих компаний в инновациях в данном секторе очевидна. В качестве ключевых характеристик, определяющих состояние систем электро-, тепло- и газоснабжения, можно выделить доступность, надежность, экономичность, эффективность, органичность взаимодействия с окружающей средой и безопасность этих систем. Выбор таких критериев не случаен, он продиктован современными требованиями, предъявляемыми к ТЭК, что позволяет сформулировать основные причины зарождения и актуальность развития интеллектуальных систем электро-, тепло- и газоснабжения, интеграции различных видов энергоресурсов и средств распределенной энергогенерации.

**Материалы и методы:** Аналитический обзор различных источников информации об интеллектуальных технологиях «Smart Grid» и распределенной генерации.

**Результаты:** Внедрение интеллектуальных технологий в ТЭК для России решит вызовы, которые стоят перед нашей страной уже сегодня. При дальнейшем развитии технологий Smart Grid встает необходимость изучения своих или адаптация уже имеющихся технологий, учитывая специфику развития энергетической отрасли в нашей стране.

**Выводы:** Выделены первоочередные пути развития тренда до 2030 г. Для повышения качества оперативного управления распределением электроэнергии от источников малой генерации и ВИЭ встанет необходимость введения и управления аналитических систем, которые снизят вероятность ошибок, совершаемых оперативным персоналом, и повысят энергоэффективность таких источников и ВИЭ. Однако развитие интеллектуальных сетей в России существенно замедляет отсутствие нормативной базы, довольно слабые экономические стимулы и состояние энергетической инфраструктуры в целом.

**Ключевые слова:** Smart Grid, распределённая генерация, энергоснабжение, энергоэффективность, топливо-энергетический комплекс.

# INTELLIGENT SYSTEMS OF ELECTRICITY, HEAT AND GAS SUPPLY, INTEGRATION OF VARIOUS TYPES OF ENERGY RESOURCES AND MEANS OF DISTRIBUTED POWER GENERATION

V. Basenko, I. Aimetov, V. Manakhov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
vasiliybas123@mail.ru

## Abstract

**Background:** The fuel and energy complex (FEC) of Russia today is a set of dynamically developing industries. In terms of its scale, Russia's fuel and energy complex is the largest in the world and has a significant impact on the country's economic sector. Therefore, the interest of the state, consumers, energy, sales and extractive companies in innovations in this sector is obvious. As key characteristics determining the state of the electricity, heat and gas supply systems, we have identified the availability, reliability, economy, efficiency, organic nature of interaction with the environment and the safety of these systems. The choice of such criteria is not accidental, it is dictated by modern requirements for the fuel and energy sector, which allows to formulate the main reasons for the emergence and relevance of the development of intelligent systems of electricity, heat and gas supply, integration of various types of energy resources and distributed power generation facilities.

**Materials and methods:** review and analysis of various sources about "Smart Grid" technologies and distributed generation.

**Results:** The introduction of intellectual technologies in the fuel and energy complex for Russia will solve the challenges facing our country today. With the further development of Smart Grid technologies, it becomes necessary to study their own or adapt existing technologies, taking into account the specifics of the development of the energy sector in our country.

**Conclusions:** Priority ways of development of a trend till 2030 are allocated. To improve the quality of operational management of the distribution of electricity from sources of small generation and renewable energy, there will be a need to introduce and manage analytical systems that will reduce the likelihood of errors committed by operational personnel and increase the energy efficiency of such sources and renewable energy sources. However, the development of intellectual networks in Russia significantly slows down the lack of a regulatory framework, rather weak economic incentives and the state of the energy infrastructure as a whole.

**Key words:** Smart Grid, distributed generation, power supply, energy efficiency, fuel and energy complex.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Вызов в виде неуклонно растущего спроса на электроэнергию для ТЭК не является новым. Но проблема отставания темпов наращивания энергетических мощностей от темпов роста энергопотребления сегодня встает все острее. Покрытие растущего уровня электропотребления ведёт к необходимости модернизации региональных электростанций и создания дополнительной сетевой инфраструктуры, связанной с увеличением трансформаторных мощностей и пропускной способности ЛЭП. Но такое решение проблемы на данном этапе носит ограниченный характер и применяется преимущественно в мегаполисах и крупных городах по техническим и финансовым причинам.

## II. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

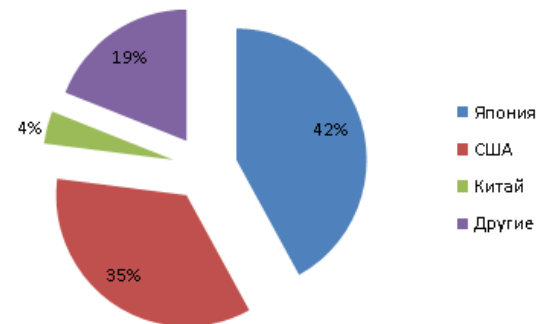
Примерами технологий, позволяющих провести «интеллектуализацию» электроэнергетики, являются управляемые устройства компенсации реактивной мощности, реакторные группы, статические тиристорные компенсаторы (СТАТКОМ), преобразователи вида тока, фазопоротные устройства, накопители электрической энергии и т. д. Многие из этих устройств успешно внедрены на территории России, например ФСК ЕЭС России, и находятся в эксплуатации.

Для передачи электроэнергии по сетям высокого напряжения внедряются самокоммутирующиеся конвертеры Voltage-Sourced Converter (VSC). Технология передачи постоянного тока высокого напряжения, использующая преобразователи VSC (с питанием от источника напряжения), является относительно новой, поскольку она использует биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ). Основными компаниями, продвигающими технологию HVDC VSC являются ABB и Siemens. Эта технология называется в ABB технологией «HVDC light», а компания Siemens использует для нее наименование «HVDC Plus».

Интеграция в мировые энергосистемы генерирующих мощностей на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) невозможна без развития технологий накопления энергии. В настоящее время на рынке доминируют накопители электроэнергии на базе литий-ионных батарей благодаря их малому весу и высокой плотности накапливаемой энергии. Ярким примером взрывного роста в производстве аккумуляторов стал знаменитый завод Tesla. Также среди лидеров отрасли – LG Chem, Samsung SDI, BYD, Contemporary Amperex Technology. По оценке Bloomberg New

Energy Finance (BNEF) Contemporary Amperex в скором времени станет крупнейшим производителем литий-ионных аккумуляторов в мире.

Применяются накопители электроэнергии и для регулирования режимов в энергосистеме – сетевые накопители электроэнергии (СНЭ). На диаграмме представлено географическое распределение мощности установленных накопителей энергии.



Географическое распределение мощности установленных накопителей энергии

Компанией Ewe Gasspeicher GmbH создаётся аккумуляторная батарея Brine4power, которая будет самой большой и мощной в мире. В батарее Brine4power используются водно-солевые электролиты с активным полимерным наполнителем, который менее вреден для окружающей среды, чем материалы, используемые в других типах потоковых окислительно-восстановительных аккумуляторных батарей. Данная батарея будет занимать две природные подземные полости, которые сейчас используются для хранения природного газа. Каждая из полостей имеет объем около 100 000 куб. м, что даст потоковую емкость батареи до 700 МВт·ч при мощности 120 МВт. Пуск в эксплуатацию намечен на 2023 г. Сейчас проект проходит стадию лабораторного тестирования на опытном образце меньшего размера. В целях повышения эффективности теплоснабжения все больше сетей модернизируются с заменой централизованных котельных на индивидуальные тепловые пункты (ИТП). ИТП осуществляют подогрев теплоносителя в зависимости от погодных условий. Автоматическое регулирование повышает эффективность отопления и позволяет использовать 70 % той энергии, которая расходуется сейчас. Организация ИТП имеет ещё ряд преимуществ: удобство эксплуатации и обслуживания; отсутствие внутридворовых сетей горячего водоснабжения; сокращение тепловых потерь и утечек воды в системах горячего водоснабжения; появляется возможность мониторинга состояния тепловых сетей,

а наличие узлов учета на вводах потребителей позволяет более точно определять фактические тепловые потери и разрабатывать мероприятия по их снижению, также сокращается число плановых и аварийных отключений, и, как следствие, повышается надежность всей энергосистемы. С развитием технологий популярность набрали ИТП блочно-модульного типа (БТП). Их преимущество в сравнении с другими типами ИТП заключается в низкой стоимости и высоком удобстве эксплуатации: модули разделены по функциональному назначению, все элементы и конструктивные части легкодоступны и возможна быстрая замена модуля на аналогичный. Более того, в России есть немалое число производителей («Теплообменные системы», ТЗПО и др.), мощность агрегатов которых достигает 12,7 ГКал.

В газоснабжении, как и в других отраслях ТЭК, для повышения эффективности внедряются технологии интеграции различных видов энергоресурсов среди которых следует выделить:

- использование тепла отходящих газов компрессорных станций (ООО «Газпром трансгаз Югорск»);
- использование турбодетандеров на газораспределительных станциях (ООО «Газпром трансгаз Чайковский»);
- применение мобильных компрессорных станций для сохранения объемов газа при проведении ремонтных работ;
- использование автономных энергоустановок для энергообеспечения удаленных объектов.

Наряду с интеллектуальными технологиями, характерными для конкретных отраслей ТЭК, есть и такие, которые применяются во всех системах энергоснабжения. Например, широко являются распространенным инструментом дистанционного мониторинга состояния оборудования. SCADA-система – это программно-аппаратный комплекс сбора данных, которые позволяют осуществлять диспетчерский контроль большого количества удаленных объектов. SCADA собирает данные с объектов и отображает их в едином диспетчерском центре, где за ними наблюдают специалисты. Диспетчер может не только наблюдать, но и управлять при различных ситуациях. SCADA-системы включают три основных структурных компонента: удаленный терминал, диспетчерский пункт управления, коммуникационная система. В целом, можно сказать, что SCADA-системы в режиме реального времени непрерывно собирает, анализирует, хранит информацию и позволяет ею управлять.

Другой общей технологией можно считать smart-счетчики (интеллектуальные счетчики) энергоресурсов. На сегодняшний день интеллектуальность приборов учета заключается в их способности коммуницировать с различными уровнями системы энергоснабжения в части передачи накопленной информации посредством сетевых технологий. Но в перспективе такие приборы смогут на основании полученных из разных источников информации осуществлять анализ потребления энергоресурсов, оптимальный выбор тарифа, источника питания, время включения приборов. Популярность набирают ветро- и солнечные электростанции. Их удобство заключается в том, что для работы не требуется дополнительных видов топлива,

быстрый ввод в эксплуатацию и экологичность. Однако существует один недостаток, который имеет большое значение: выработка электроэнергии носит непостоянный и нерегулируемый характер. Поэтому затруднена их работа в энергосистеме. Эта проблема решается совместным использованием ветрогенераторов и солнечных батарей. При их использовании в регионе, где присутствует сезонность, будут периоды, когда производительность ветрогенератора снизится, но в этот же период повысится производительность солнечной батареи, тем самым исключив сезонный провал. Тем более, если мощность подобных станций мала, а система распределенной генерации имеет достаточное количество источников энергии, то отклонения в качестве электроэнергии будут сглаживаться самой системой.

Вместе с ростом потребления электроэнергии также растёт спрос на тепло. В частных домах этот вопрос легко решается установкой, например котлов, работающих на твёрдом топливе, газе или дизельном топливе. Широко известны американские и европейские фирмы-производители котлов, такие как Lennox (США), Electrolux (Швеция); Jасpi (Финляндия), Bosch (Германия). Также можно отметить отечественные ВЭО. На использование электродетандеров накладывают ограничения стоимость и сама возможность подключения к электросети. В случае ограничения по величине подключаемой мощности одним из вариантов является применение альтернативной энергетики, в частности тепловых насосов, которые из 5 кВт электрической энергии могут сделать 15–20 кВт тепловой. Начинают находить применение гелиосистемы с солнечными коллекторами. Такие системы могут в значительной мере обеспечить потребность в горячей воде с апреля по октябрь. Окупаемость солнечных коллекторов в зависимости от качества проекта и монтажа в среднем составляет 3–6 лет.

В определенных регионах России существуют благоприятные условия для внедрения электрогенерации на базе возобновляемых источников энергии (геотермальные установки, малые ГЭС и др.). На месторождениях пароводяной смеси в вулканических районах – на Камчатке и Курильских островах – простейшим способом получения электроэнергии является использование противоавленческих паровых турбин. Энергоблоки с противоавленческими турбинами иногда используются при разработке геотермальных месторождений для привода буровых станков вместо дизелей, а также в качестве пусковых комплексов ГеоТЭС с последующей возможной заменой на конденсационные блоки. Такие турбины выпускаются в Японии, США, Италии. Их мощность обычно не превышает 10 МВт. На Калужском турбинном заводе разработаны энергоблоки Омега-500 мощностью 0,5 МВт, Туман-2 (1,7 МВт), Туман-2,5 (2,5 МВт) и Туман-4к (4,0 МВт). Выработка ГеоТЭС средней мощности 6–23 МВт.

Мини-ГЭС, в свою очередь, обладают такими преимуществами, как экологическая безопасность, надёжность, низкая стоимость выработки электроэнергии, независимость от погодных условий, могут работать даже на маленьком потоке воды.

### III. Выводы

С использованием нового технологического оборудования, а также внедрения интеллектуальных систем в сфере накопления электроэнергии повысится маневренность

и управляемость передачами энергией, сглаживаются провалы потребления во время неполной загрузки энергосистемы с последующей ее отдачей в систему в моменты пикового потребления, что способствует уменьшению зависимости генерирующих мощностей от неравномерного потребления, а также улучшает качество производимой энергии и создает возможности для гибкого подключения новых потребителей.

Внедрение объектов малой генерации в зоне децентрализованного энергоснабжения при использовании местных энергоресурсов, а также возобновляемых источников энергии способствует повышению эффективности развития энергосетевого хозяйства. Данные технические мероприятия позволят удовлетворить спрос на энергию и топливо в энергодефицитных регионах, обеспечивая надежное и качественное снабжение, тем самым упрощая энергетическое освоение новых регионов. Энергетика, основанная на возобновляемых источниках энергии, будет развиваться в виде малых гидроэлектростанций, солнечных энергоустановок, геотермальных электростанций и теплоснабжающих установок, биоэнергетических и ветровых установок, мусоросжигающих и мусороперерабатывающих энергокомплексов в крупных городах.

Теплоснабжение, несмотря на высокую значимость, остается достаточно не скоординированной частью топливно-энергетического комплекса. Поэтому производсто тепла необходимо развивать на теплоцентралях с уменьшением их роли в теплоснабжении, учитывая современные систем когенерации (газотурбинная установка с котлом-утилизатором) и автономные теплоснабжающие установки. Таким образом, к 2030 г. планируется снижение доли тепла, производимого на теплоэлектроцентралях с повышением доли распределенной генерации.

Эту нишу займут газотурбинные установки на теплоэлектроцентралях и автономные установки. Переоснащение газовых котельных, имеющих достаточные тепловые нагрузки, при технико-экономическом обосновании в ПГУ-ТЭЦ или ГТУ-ТЭЦ с централизацией и резервированием теплосетей и выводом из работы или переводом в пиковый режим мелких котельных. Указанные установки будут выполнять роль как локальных источников энергоснабжения, так и источников покрытия переменной части графика нагрузки, увеличивая тем самым коэффициент использования установленной мощности наиболее мощных энергоустановок.

В 2035 г. предусматривают значительное снижение энергоемкости российской экономики, не увеличение доли газа в структуре энергопотребления, а увеличение доли

нетопливной энергетики. Внедрение интеллектуального комплекса, основной задачей которого будет технико-экономическое сравнение ущерба от отказов системы с дополнительными затратами, которые необходимы для повышения надежности, позволит принимать обоснованные проектные решения по развитию систем газоснабжения. Принятые на основе такого анализа проектные решения будут наиболее полно отвечать существующим критериям оптимальности и надежности.

Таким образом, электрические сети уже в рассматриваемой перспективе должны обладать рядом свойств:

- доступностью электроснабжения практически для всех жителей страны;
- высокой эффективностью электроснабжения;
- требуемой надежностью и качеством электроэнергии;
- высоким уровнем информационных технологий при управлении электрической сетью;
- гибкостью при интеграции отдельных источников энергии и систем;
- приемом в сеть энергии от самых различных источников генерации;
- экологической чистотой и безопасностью для общества;
- адаптивностью к неопределенности развития генерации и потребления.

Совместно с внедрением оборудования нового поколения необходимо развивать высокоэффективную киберфизическую систему, включающую интерактивные инженерные сети из физических и коммуникационных компонентов, связанными с технологиями класса Big Data. Также необходимо начать формирование законодательной базы, способной регламентировать процессы, связанные с применением технологий, описанных выше.

Таким образом, генерирующие мощности в 2030 г. будут состоять из энергоустановок, работающих на передовых технологиях мирового уровня, позволяющих проводить их эффективную эксплуатацию.

### Список литературы

- [1] Технические науки на службе созидания и прогресса: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. 268 с.
- [2] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
- [3] Храмов С. Переоборудование существующих промышленных котельных в мини-ТЭЦ. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/771-Pereoborudovanie-sushchestvuyushchih-promyshlennyh>.
- [4] URL: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf).

# ИНТЕГРАЦИЯ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С УЧАСТИЕМ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК В РОССИИ

Басова А.Е., Шабаль Н.С.  
Филиал АО «СО ЕЭС» Тульское РДУ  
Тула, Россия  
anastabasova@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В последнее десятилетие в России наблюдается ежегодный рост вводов объектов распределенной генерации (РГ), вызванный рядом особенностей развития отечественного теплоэнергетического комплекса (ТЭК). Инициатива строительства подобных объектов идет от собственников крупных промышленных предприятий (нефтегазодобывающей, горнодобывающей, металлургической, целлюлозно-бумажной, химической и сельскохозяйственной отраслей промышленности). При этом особое внимание уделяется вопросам энергосбережения и повышения энергоэффективности для предприятий, что связано как с необходимостью обеспечения надежным электроснабжением, так и с эффективной утилизацией вторичных энергоресурсов. Максимальное увеличение эффективности использования энергоресурсов на единицу продукции для предприятий, имеющих в качестве отходов органические продукты, возможно за счет установки и использования биогазовых установок.

**Материалы и методы:** Проведен анализ опыта интеграции биогазовых установок за рубежом и в России. Использовались материалы открытых источников в объеме, позволяющем провести аналитическую оценку в интересующем вопросе.

**Результаты:** В работе уделяется внимание вопросам эффективного функционирования биогазовых установок и целесообразности их применения, даны оценки распространения данной технологии переработки вторичных энергоресурсов в России и за рубежом в настоящее время и ее перспективного развития до 2030 года. Рассмотрены вопросы интеграции объектов распределенной генерации с участием биогазовых установок.

**Выводы:** Оценены перспективы применения и развития технологии переработки вторичных энергоресурсов с применением биогазовых установок. Даны рекомендации по их интеграции и эксплуатации.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, ВИЭ, утилизация вторичных энергоресурсов, биогазовые установки, биогаз.

## INTEGRATION OF DISTRIBUTED GENERATION FROM BIOGAS. PROSPECTS FOR UTILIZATION OF BIOGAS PLANTS IN RUSSIA

A. Basova, N. Shabal  
The branch of JSC "SO UPS" Tula Regional Dispatch Office  
Tula, Russian Federation  
anastabasova@yandex.ru

## Abstract

**Background:** Over the past decade, Russia has witnessed an annual increase in the input of distributed generation objects (DG) caused by a number of features of the development of the domestic heat and power complex (HPC). The initiative to build such facilities comes from the owners of large industrial enterprises (oil and gas, mining, metallurgical, pulp and paper, chemical and agricultural industries). At the same time, special attention is paid to energy saving and energy efficiency improvement for enterprises, which is connected both with the need to provide reliable power supply and efficient utilization of secondary energy resources. Installation and utilization of biogas plants may maximize efficiency of energy resources use per unit of output for the enterprises that produce organic waste.

**Materials and Methods:** The experience of integrating biogas plants abroad and in Russia is analyzed. Results of the analysis performed are based on a sufficient amount of open-source data.

**Results:** The paper presents issues of operational efficiency of biogas plants and reasonability of their utilization, estimations of the spread of this technology for processing secondary energy resources in Russia and abroad for the time being, and prospects of long-term development of this technology for the period up to year 2030. The problems of integration of distributed generation from biogas are considered.

**Conclusions:** The paper allows prospective assessment of the application and development of technology for processing secondary energy resources using biogas plants. Recommendations for their integration and operation are given.

**Key words:** alternative energy, RES, utilization of secondary energy resources, biogas plants, biogas.



## I. ОСОБЕННОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТЭК

Отечественный ТЭК обладает рядом особенностей, выделяющих его из мировых:

- иерархический принцип структуры управления режимами Единой энергетической системы (далее – ЕЭС) для обеспечения сбалансированного единства генерации, сетевого распределения и потребления электрической энергии;
- наличие межсистемных связей большой протяженности и пропускной способности;
- неравномерность распределения топливных ресурсов по территории страны;
- значительная протяженность распределительной электрической сети;
- расположение значительной части территории России в изолированных энергорайонах (часть территории Сибири и север Дальнего Востока).

При этом можно выделить ряд проблем технического характера, негативно влияющих на его эффективное развитие:

- необходимость использования вторичных энерго-ресурсов с возможностью выработки тепловой и электрической энергии;
- целесообразность сооружения когенерационных и тригенерационных установок на существующих муниципальных и производственных котельных при их реконструкции и модернизации;
- сложность или отсутствие технической возможности технологического присоединения к электрическим сетям;
- значительная стоимость услуг по передаче и распределению электрической энергии;
- высокая степень изношенности генерирующего и сетевого оборудования. Средний возраст генерирующего оборудования составляет около 35 лет.

Указанные выше проблемные технические вопросы приводят к общему снижению надежности энергоснабжения потребителей и переходу их к установке собственных генерирующих установок (ГУ), сетей теплоснабжения. Инициатива строительства подобных объектов идет от собственников крупных промышленных предприятий (нефтегазодобывающей, горнодобывающей, металлургической, целлюлозно-бумажной, химической и сельскохозяйственной отраслей промышленности). При этом особое внимание уделяется вопросам энергосбережения и повышения энергоэффективности для предприятий, что связано как с необходимостью обеспечения надежным электро-снабжением, так и с эффективной утилизацией вторичных энерго-ресурсов.

## II. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Основными целями мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности для предприятий являются:

- максимальное увеличение эффективности использования энерго-ресурсов на единицу продукции предприятия;
- максимальное уменьшение финансовых затрат за счет снижения платы за энерго-ресурсы, топливо;
- получение дополнительной прибыли за счет уменьшения платы за энерго-ресурсы.

Максимальное увеличение эффективности использования энерго-ресурсов на единицу продукции для предприятий, имеющих в качестве отходов органические продукты, возможно за счет установки и использования биогазовых установок.

Внедрение биогазовых установок может быть рентабельно для агропромышленных предприятий с целью производства и получения электрической и тепловой энергии для собственных нужд, а также с возможностью выдачи электроэнергии в сеть. Кроме того, возможно использование биогазовых установок на мусорных полигонах и очистных сооружениях с целью эффективной утилизации свалочного газа.

## III. ПОТЕНЦИАЛ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Агропромышленный комплекс России предполагает ежегодное образование более 600 млн тонн отходов в год. При этом большая часть отходов приходится на отрасли животноводства (56 %) и растениеводства (35,6 %) [1]. В основном, это отходы ферм крупного рогатого скота, свиноферм, а также от переработки зерновых культур. На долю перерабатывающих отраслей приходится 4,7 % отходов, птицеводства – 3,7 %.

По данным корпорации «БиоГазЭнергоСтрой» [2] потенциал производства биогаза в России из образуемых отходов составляет 72 млн тыс. м<sup>3</sup>/год, из него можно произвести 151 200 млн кВт·ч/год электроэнергии или 145 636 тыс. Гкал/год тепла (по данным на 2009 г.).

## IV. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

### A. Используемое топливо

Биогаз состоит из смеси метана, углекислого газа и примесей прочих газов (аммиак, сероводород, азот и т.д.).

Биогаз – один из самых рентабельных видов топлива. 1 м<sup>3</sup> биогаза эквивалентен по теплоте сгорания 0,8 м<sup>3</sup> природного газа, 0,6 кг бензина, 0,7 кг мазута, 1,5 кг дров или 3 кг брикетированного биотоплива. При этом не следует забывать, что сырьем для биогаза являются не дорогостоящие и дефицитные природные ресурсы, а восполняемые отходы: переработка 1 т навоза дает до 50 м<sup>3</sup> биогаза. Из 1 м<sup>3</sup> биогаза можно получить 2 кВт·ч электроэнергии.

### B. Принцип работы биогазовых установок

Биогазовая установка, как правило, представляет собой герметически закрытую емкость, в которой при определенной температуре происходит сбраживание органической массы отходов, сточных вод и т.п. с образованием биогаза.

Принцип работы всех биогазовых установок одинаков: после сбора и подготовки сырья, заключающейся в доведении его до нужной влажности в специальной емкости, оно подается в реактор, где создаются условия для оптимизации процесса его переработки (рис. 1).

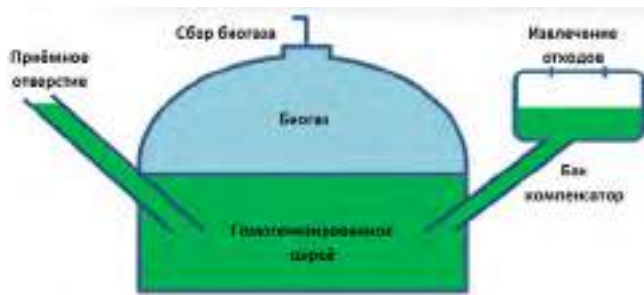


Рис. 1 – Принцип действия биогазовой установки

Сам процесс получения биогаза и биоудобрения из сырья называется ферментацией или сбраживанием. В настоящее время во всем мире для переработки отходов сельского хозяйства используют анаэробное сбраживание (в отсутствие кислорода). Процесс анаэробного сбраживания очень чувствителен к перепадам температуры. Поддержка оптимальной температуры является одним из важнейших факторов обеспечения данного процесса.

Сбраживание сырья производится за счет жизнедеятельности особых бактерий. Во время этого процесса на поверхности сырья появляется корка, которую нужно разрушать, перемешивая его.

Перемешивание осуществляется вручную или при помощи специальных устройств внутри реактора и способствует высвобождению образовавшегося биогаза из сырья.

Перед сжиганием биогаза в различных установках производится его подготовка: в основном это осушка (очистка от фракций воды) и удаление серы. Затем при помощи компрессора обеспечивается необходимое давление для подачи в камеру сгорания.

### С. Хранение биогаза

Хранение биогаза осуществляется в газгольдере. Чаще всего, он находится прямо на крыше реактора и имеет форму купола или конуса. Он изготавливается из кровельного железа, а затем, чтобы предотвратить коррозионные процессы, окрашивается несколькими слоями масляной краски. От газгольдера к месту использования в бытовых или других приборах биогаз проводят по газовым трубам.

В промышленных установках, рассчитанных на получение большого количества газа, для его хранения используются специальные мешки-газгольдеры, изготовленные из поливинилхлорида. Мешки помещаются рядом с установкой и постепенно заполняются газом. По мере наполнения эластичный материал раздувается, объем мешков увеличивается, позволяя при необходимости временно сохранить большее количество конечного продукта.

Если накапливать биогаз в газонепроницаемом резервуаре, то содержащаяся в нем химически связанная энергия может храниться очень долгое время и ее можно использовать без потерь.

### Д. Производимая продукция

Продукция, получаемая в результате эксплуатации биогазовой установки, представлена на рис. 2.

Следует отметить, что при раздельном производстве электроэнергии и тепла КПД биогазовой установки составляет примерно 58 %. Применение биогазовой когенерационной установки позволяет увеличить КПД до 85–90 % [2].

### Е. Преимущества производства биогаза

Использование биогазовых установок имеет ряд положительных экологических и экономических аспектов для предприятий, таких как:

- уменьшение выбросов метана в атмосферу в соответствии с требованиями Киотского протокола, а также возможность получения прибыли в рамках механизмов протокола (продажа квот, проекты совместного осуществления);
- производство бесплатной электроэнергии и тепла для собственных нужд либо выдача внешним потребителям;
- производство и использование экологически чистых органических удобрений;
- резкое сокращение санитарно-защитной зоны вокруг агропромышленного предприятия;
- обеззараживание органических отходов животноводства и птицеводства;
- отсутствие загрязнения воздушного бассейна в районе агропромышленного предприятия;
- отсутствие загрязнения почвы и грунтовых вод органическими отходами.

При условии комплексного использования продукции биогазовой станции срок её окупаемости составляет от 3 до 7 лет [2].

## V. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ БИОГАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

### А. Отечественный опыт

В целях стимулирования производства электрической энергии на базе ВИЭ НП «Совет рынка» в 2014 году разработано «Положение о признании генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии, квалифицированным генерирующим объектом».

В таблице представлены объекты генерации, функционирующие в настоящее время.

Для биогазовых станций в России характерно использование в качестве сырья для производства биогаза отходов свиноводческих ферм и ферм КРС.

Следует отметить, что большинство представленных объектов генерации, работающих на биогазе, имеют в качестве генерирующей установки когенерационный агрегат (газопоршневой двигатель) австрийского производства.

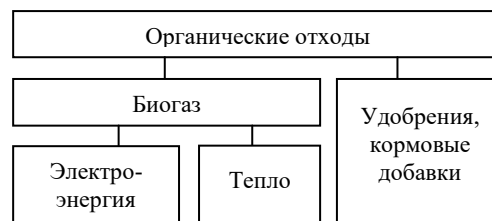


Рис. 2 – Производимая биогазовой установкой продукция

Станция, геолокация, компания-производитель	Дата запуска, год	Установленная мощность, МВт
БГУ село Дошино Медынского района Калужской области, корпорация «БиоГазЭнергоСтрой»	2009	2,4
«Мортадель», Селекционно-Генетический Центр, ООО «Агрофирма «Мортадель» (Владимирская обл.)	2011	–
«Лучки», Белгородская область, ООО «АльтЭнерго» (Белгородская обл.)	2012	3,6
«Байцурь» (Белгородская область), ОАО «Региональный центр биотехнологий» (г. Белгород)	2012	1
Мини-ТЭЦ «Белый ручей», Вологодская область, Вытегорский район, п. Депо	2014	6
Белгородская область, Прохоровский район, Лучковский сельский округ	2015	3,6
Станция активной дегазации полигона ТБО «Новый Свет-Эко», Ленинградская область, п. Новый Свет	2015	2,4

Как видно из таблицы, рынок биогаза в России в настоящее время не развит и только начинает набирать обороты.

#### *В. Применение данной технологии за рубежом*

В большинстве европейских стран энергия, производимая в результате переработки органических отходов в биогазовых установках, составляет около 3–4 % всей потребляемой энергии в стране. В Финляндии, Швеции, Австрии, Дании, которые поощряют использование энергии биомассы на государственном уровне, доля ее энергии достигает 15–20 % от всей потребляемой энергии. При этом 75 % биогаза производится из отходов сельского хозяйства (в основном, отходы растениеводства и птицефабрик), 17 % – из органических отходов частных домохозяйств и предприятий, еще 8 % – канализационных очистных сооружений.

Рынок биогаза в США развивается значительно медленнее, чем в Европе. Примерно 80 % всех биогазовых проектов в США базируются на молочно-товарных фермах, используя навоз крупного рогатого скота для выработки энергии. Общая мощность всех установок на таких фермах приближается к 60 МВт.

Рынок биогаза активно развивается в Китае и Индии, получая значительную поддержку со стороны государства.

#### VI. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ДАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ В РОССИИ ДО 2030 ГОДА

Основная тенденция в развитии биогазовых установок в России до 2030 г. видится в строительстве энергоустановок мощностью от 1 до 5 МВт в местных масштабах, направленных в основном на покрытие собственных нужд производств и для продажи на оптовом рынке электроэнергетики, где в роли потребителя будут в основном домохозяйства, находящиеся поблизости.

При благоприятной для данной отрасли тарифной политике в отношении ВИЭ единичные биогазовые установки будут находиться повсеместно с условием наличия объекта поставки сырья (птицефабрики, свинокомплексы, свалки ТБО в регионах по утилизации и рекультивации

существующих полигонов); при этом большей доли в объеме выработки электроэнергии в регионах, не специализирующихся на производстве сельскохозяйственной продукции, занимать не будут.

Таковыми проектами являются: строительство до конца 2022 г. четырех объектов по термической переработке отходов в энергию на территории Московской области и одного в городе Казань, а также строительство корпорацией «Биогазэнергострой» БГС в поселке Ромодановское (Республика Мордовия) мощностью до 4 МВт и БГС при птицефабрике «Синявенская» (Ленинградская область) мощностью до 8 МВт.

Иная картина предполагается в Южных регионах страны (ЮФО, ПФО, и в регионах черноземья ЦФО) с благоприятными условиями для получения биогаза: большое количество сырья, которое возможно переработать в топливо, а так же растущее потребление, особенно в ЮФО.

Согласно совместным проектам компаний «Биогазэнергострой», «Агроимпорт» и немецких KTG и TonniesFleisch планируется строительство до 20 биогазовых станций мощностью от 1 до 5 МВт в Белгородской, Ростовской и Воронежской областях. Активное участие администрации данных областей способствует этому. В соответствии с Постановлением Правительства Белгородской области № 427-пп от 29.10.2012 г. «Развитие возобновляемых источников энергии на 2013-2015 годы и на период до 2020 года» здесь планируется введение 223,3 МВт мощностей альтернативной энергетики, в основном за счёт биогазовых станций.

Планируемый ввод распределенной генерации в регионах ЮФО, ПФО и других благоприятно отразится на экономике регионов:

- повысит надежность электроснабжения при стабильном росте числа отключений;
- гарантирует минимизацию затрат на обеспечение электроснабжения (строительство распределительных сетей с целью увеличения пропускной способности);
- повысит запас генерирующих мощностей при регулировании частоты и перетоков в регионе.

#### VII. ВЫВОДЫ. ПРЕИМУЩЕСТВА И ОСОБЕННОСТИ ВВОДА ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

Набирающее обороты строительство объектов РГ, в частности строительство биогазовых установок для предприятий, имеющих в качестве отходов органические продукты, позволяет:

- утилизировать и перерабатывать отходы производства, используя их в качестве вторичных энергоресурсов;
- исключить огромные затраты на оплату технологического подключения к централизованным сетям;

- обеспечить бесперебойность электро- и теплоснабжения собственного производства;
- снизить ущерб от некачественной энергии, аварийного выхода из строя оборудования и недоотпуска продукции;
- получить более экологичный энергоноситель, снизив антропогенную нагрузку на экосистемы;
- увеличить прибыль за счет снижения затрат на покупку тепловой и электрической энергии.

При этом для изолированных энергорайонов открывается перспектива накопления электроэнергии: кроме традиционных накопителей возможно сохранение тепловой энергии, газа.

Учитывая вышесказанное, тенденция к увеличению доли объектов РГ, в том числе на базе ВИЭ, в отечественной электроэнергетике более чем вероятна. При этом сеть низкого напряжения, в которую ведется интеграция данных объектов, требует серьезной подготовки (необходимость пересмотра топологии релейной защиты и автоматики, а также систем учета и оплаты электроэнергии) в связи с ее низкой автоматизацией, в отличие от сети высокого напряжения.

#### Список литературы

- [1] Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК: справочник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 296 с.
- [2] Корпорация «БиоГазЭнергоСтрой». Презентация. Перспективы использования биоустановок в России. URL: <http://www.bioges.ru/upload/common/present.pdf>.

# КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И СРЕДСТВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Батуева Д.Е., Жуковский Ю.Л.  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»  
Санкт-Петербург, Россия  
dasha-batueva4@rambler.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Существующая на сегодняшний день энергетическая инфраструктура активно развивалась в эпоху второй промышленной революции и сейчас топливно-энергетический комплекс является наиболее консервативным элементом. Однако следующий этап развития в рамках концепции четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» не может существовать без глубокой интеграции систем электро-, тепло- и газоснабжения, которые разрознены в управлении и законодательстве, что является основным барьером на пути образования энергетической «системы систем».

**Материалы и методы:** Использовались методы статистического анализа и анализ с помощью искусственных нейронных сетей.

**Результаты:** Проанализировано состояние энергосистемы России и спрогнозирован вектор развития топливно-энергетического комплекса, создана модель для выявления корреляционной связи и оценки влияния определенных параметров на свойства энергосистемы, выявлены приоритетные направления технологического развития, на которые будет спрос в результате энергетической интеграции.

**Выводы:** Произведен обзор существующего законодательства, программ инновационного развития электроэнергетики, дорожной карты EnergyNet, выделены ключевые тренды развития энергетики, проанализированы возможности для развития данных технологий в Российской Федерации.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы, распределенная энергетика, ВИЭ, системы хранения энергии, энергетический переход.

# KEY TECHNOLOGIES OF INTEGRATION OF ENERGY RESOURCES AND MEANS OF DISTRIBUTED GENERATION

D. Batueva, Y. Zhukovskiy  
Saint Petersburg Mining University  
Saint Petersburg, Russian Federation  
dasha-batueva4@rambler.ru

## Abstract

**Background:** The existing energy infrastructure has been actively developed in the era of the second industrial revolution and now the fuel and energy complex are the most conservative element. However, the next stage of development within the framework of the concept of the fourth industrial revolution “Industry 4.0” cannot exist without a profound integration of electricity, heat and gas supply systems that are scattered in management and legislation and form a “system of systems”.

**Materials and Methods:** Statistical analysis and modeling in the STATISTICA program are used.

**Results:** The state of the energy system of Russia is analyzed and the vector of the development of the fuel and energy complex is forecasted, a model is created to identify the correlation relationship and assess the influence of certain parameters on the properties of the energy system and identify priority areas for future demand.

**Conclusions:** Review of existing legislation, programs for innovative development of the electric power industry, the EnergyNet road map was made, key trends in the development of energy were identified, opportunities for the development of these technologies in the Russian Federation were analyzed.

**Key words:** intelligent systems, distributed energy, renewable energy sources, energy storage systems, energy transition.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Существующая на сегодняшний день энергетическая инфраструктура активно развивалась в эпоху второй промышленной революции. На сегодняшний день, в эпоху уже третьей промышленной революции, топливно-энергетический комплекс является наиболее консервативным элементом.

Следующий этап развития в рамках концепции четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» не может существовать без глубокой интеграции систем электро-, тепло- и газоснабжения, которые в настоящее время разрознены в управлении и законодательстве.

Рост количества людей, нарастающая урбанизация и экспоненциально увеличивающиеся объемы информации потребуют увеличения потребления электроэнергии на 50 %, при этом ужесточаются требования к экономичности, энергобезопасности, экологичности, энергоэффективности и адаптивности энергетической инфраструктуры.

Развитие цифровых и информационных технологий в последнее десятилетие стало возможным благодаря глубокой электрификации и возможности наращивать как информационно-коммуникационную инфраструктуру, так и средства обработки и хранения данных.

В рамках решения проблем растущего спроса на электроэнергию и физического износа сетей закономерным было рождение концепции «Smart Grid», в основе которой лежит идея повышения управляемости потоками электроэнергией на основе информации. Однако цифровое изменение только электрической сети не сможет стать основой перехода к новому этапу технологического развития. Сегодня очевидно, что интеллектуализации и интеграции должны быть подчинены все системы генерации, преобразования, транспортировки и использования энергии. При этом лидирующие страны мира отчетливо понимают, что коллаборация между энергетической «системой систем» (System of System – SoS) и другими SoS критически необходима в «Индустрии 4.0» для достижения общих целей устойчивого развития в интересах будущих поколений.

## II. ИНТЕГРАЦИЯ

Объединение (интеграция) является ключевым фактором, поскольку коллаборация в рамках достижения общей цели необходима по нескольким направлениям:

- сотрудничество видов ресурсов – углеводороды, возобновляемые и вторичные энергетические ресурсы;
- сотрудничество различных видов генерации (централизованной и децентрализованной, гибкой и нерегулируемой) и накопителей (минутных, сезонных, энергии и продуктов производства);
- сотрудничество участников-потребителей, передачи и производства энергии;
- сотрудничество оборудования – изношенное и новое, перегруженное и недоиспользуемое;

- сотрудничество видов потребителей энергии – бытовой, промышленный, транспорт и т. д.;
- сотрудничество в рамках предоставления услуг – поддержания устойчивости, качества, надежности, автономности, экологической безопасности, экономичности и др.;
- сотрудничество между SoS – «умный город», «умное месторождение», «умный завод» и т. д.

На сегодняшний день технологии промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT), Всеобъемлющего Интернета (Internet of Everything, IoE) и искусственного интеллекта (Artificial Intelligence (AI)) являются одними из наиболее обсуждаемых тенденций в мире. Вещи нового поколения (smart things – умные вещи) будут не только умными, но и интегрированными в сеть – они смогут взаимодействовать друг с другом или с внешней средой [1]. Ключевая идея заключается в организации вычислительной сети реальных физических объектов: автомобилей, электродвигателей, беспилотных летательных аппаратов, роботизированных узлов, «умных счетчиков».

## III. АНАЛИЗ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РОССИИ

Разные страны пытаются решать свои проблемы в энергетике, необходимо выделить, какие технологии особенно важны для России, для этого был проведен анализ ключевых проблемных зон российской энергетики и сырьевой базы.

### A. Энергосистема РФ

На 1 января 2018 г. общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 246,9 ГВт. В структуре установленной мощности электростанций ЕЭС России представлены: ТЭС – 68,24 %, ГЭС – 20,6 %, АЭС – 11,16 %, СЭС – 0,22 %, ВЭС – 0,06 %.

### B. Тенденции использования различных ТЭР

Газовая генерация является основной производственной структуры электроэнергетики. В течение последнего десятилетия продолжился рост доли газа в топливном балансе электростанций ЕЭС России – с 63 до 72 % [2].

В 2017 г. выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России, включая производство электроэнергии на электростанциях промышленных предприятий, составила 1 053,862 млрд кВт·ч (на 0,5 % по сравнению с 2016 г.). Фактическое потребление электроэнергии в Российской Федерации в 2017 г. составило 1 039,88 млрд кВт·ч. Производство электроэнергии к 2020 г. прогнозируется в размере 1126,2 млрд кВт·ч, а электропотребление увеличится до 1115 млрд кВт·ч.

Совокупная мощность объектов распределенной генерации в России по состоянию на 2017 г. составляет 23,5 ГВт: 8,5 ГВт станций до 25 МВт, работающих вне ЕЭС, 15 ГВт более мощных станций в ЕЭС.

Износ энергетического оборудования электростанций всех типов и систем транспорта, передачи и распределения электрической и тепловой энергии составляет – 56 %, а по оборудованию электрических и тепловых сетей – до 80 %. Демонтаж генерирующих мощностей за период 2011–2030 гг. составит 82,1 ГВт, что создаст потребность во вводе новых мощностей.

### С. Финансирование

Доля ТЭК в ВВП РФ составляет 22,6 %. Доля ТЭК в экспорте составляет 56,9 %. Ключевыми направлениями для инвестиционных проектов в сфере энергетики являются АЭС и ГЭС. Для увеличения эффективности использования энергии в промышленности из федерального бюджета в 2018–2020 гг. на программу «Энергоэффективность и развитие энергетики» выделено почти 31 млрд руб.

### IV. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЭК

Согласно Целевому топливно-энергетическому балансу России на период до 2035 г. предусматривается уменьшение производства нефти и конденсата, рост производства природного и попутного газа, сохранение доли твердого топлива на уровне 12–13%, увеличение доли нетопливных источников энергии в производстве первичных ТЭР на 2 % [3].

Освоение углеводородного потенциала континентального шельфа арктических морей и северных территорий России сыграет стабилизирующую роль в динамике добычи нефти и газа в стране, компенсируя возможный спад уровня добычи в традиционных нефтегазодобывающих районах.

По прогнозам Минэнерго России объём генерации за счет ВИЭ в РФ к 2024 г. составит 2,5% в энергобалансе. К 2024 г. Правительство РФ планирует увеличить установленную мощность объектов генерации на основе ВИЭ до 6 ГВт [4].

В ЕЭС на период 2025–2035 гг. прогнозируется дефицит генерирующей мощности, однако распределенной генерацией можно восполнить половину создавшегося дефицита (около 36 ГВт к 2035 г.).

Достижение всех указанных параметров в экономике и энергетике страны будет результатом перехода на ресурсно-инновационный путь развития ТЭК.

### V. МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ

В результате проведенного анализа выбрана группа из 71 параметра, которые характеризуют изменяющуюся энергосистему. Они влияют на пять ключевых свойств: экологичность, энергобезопасность, экономичность, эффективность и адаптивность. Для выявления корреляционной связи и оценки влияния выбранных параметров на свойства энергосистемы решено применить искусственную нейронную сеть с многослойным перцептроном (Multilayer Perceptron, MLP) и радиальными базисными функциями (Radial Basis Function network, RBF), как наиболее подходящие для классификации и кластеризации, реализованную в программе STATISTICA Automated Neural Networks. Входные параметры разбиты на блоки для упрощения обучения ИНС и снижения нагрузки на вычислительные мощности. Выходными векторами ИНС являлись оценки по пяти представленным свойствам энергосистемы по состоянию 2017 г. Размерности выходных оценок от 0 до 1, где 0 это полное отсутствие соответствующего свойства, а 1 соответствует идеализированному состоянию системы.

Для каждой из технологий установлена оценочная взаимосвязь с соответствующим свойством и на основе экспертных мнений распределены весовые коэффициенты влияния: сильное, существенное, умеренное, слабое, отсутствие влияния. Соответственно, предлагаемая модель позволяет произвести прогнозную оценку на спрос тех технологических направлений, которые ближайшее десятилетие будут преобладать с точки зрения устранения нарастающих проблем в интегрированных энергетических системах.

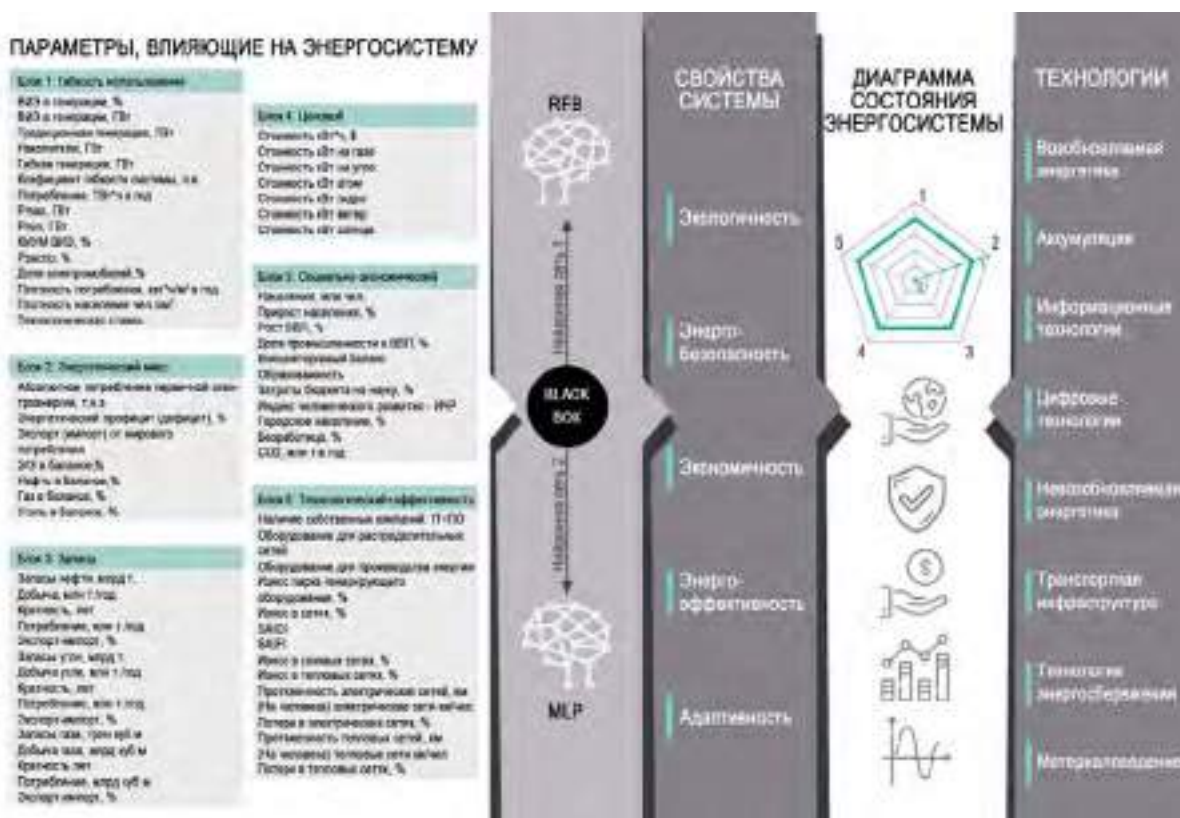


Рис.1 – Модель анализа параметров, влияющих на энергосистему

## VI. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Произведена оценка влияния ключевых технологий, используемых в настоящее время и которые будут успешно развиваться до 2030 г., характеризующих энергосистему в целом на 2018-2030 гг., основываясь на статистических данных и данных прогнозов развития, на пять ключевых параметров: адаптивность, экологичность, энергоэффективность, энергобезопасность, экономичность.



Рис. 2 – Прогноз изменений свойств энергосистемы

Главный внутренний вызов состоит в необходимости глубокой и всесторонней модернизации ТЭК России, преодолении высокого износа значительной части инфраструктуры и производственных фондов. Главной проблемой является значительный нереализованный потенциал организационного и технологического энергосбережения, превышающий 1/3 общего потребления ТЭР в стране.

Прогноз спроса: главные – цифровые, информационные технологии, энергосбережение; умеренные – ВИЭ, материаловедение, аккумуляция; не приоритетные – не ВИЭ, транспорт.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что несмотря на различные проблемные места в энергетической системе, переход к интеграции невозможен без масштабной цифровизации и информатизации. Именно эти технологии будут являться основой решения главной проблемы, характерной для энергосистемы – приобретение большей гибкости при интеграции различных энергетических ресурсов. Наиболее существенным для России остаются вопросы энергосбережения и эффективности, специфическое отношение потребителей к расходованию ресурсов, очевидно, должно быть сломлено не повышением тарифов, а образовательными сдвигами. Воспитание «культуры энергосбережения» должно идти в ногу со временем и быть основанной на «сервисах энергетической информатизации», что само собой невозможно без цифровизации систем электро-, тепло- и газоснабжения. На следующем этапе должна решаться задача интеграции системы с децентрализованными объектами, это значительно увеличит адаптивность и энергобезопасность.

Очевидным становится вопрос объединения региональных энергосистем в континентальные и более масштабные системы, для взаимной компенсации недостатков и приобретения синергетических плюсовых эффектов в проблемных свойствах.

### Список литературы

- [1] Жуковский Ю.Л., Котелева А.В. Методы определения ресурса жизненного цикла электромеханического оборудования // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016.
- [2] Веселов Ф.В., Ерохина И.В. Перспективы использования ГТУ и ПГУ в энергетике России. // ИНЭИ РАН: LVIII Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин. Рябинск, 2016.
- [3] Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 г. (редакция от 1 февраля 2017 г.)
- [4] Новак А.В. Итоги работы Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2012–2017 гг. М., 2018.



# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Болотов П.В.

Филиал АО «СО ЕЭС» Владимирское РДУ  
Владимир, Россия  
bolotovp@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Распределённая генерация (РГ) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – один из трендов мировой энергетики. В настоящее время электроэнергетика России характеризуется высокой долей централизованной выработки электроэнергии на объектах традиционной энергетики. Учитывая мировой опыт в становлении энергетики и последние поручения правительства РФ, можно сделать вывод, что распределённая генерация будет активно развиваться и в нашей стране. Для успешной интеграции распределённой генерации на основе ВИЭ необходимы технические и экономические модели, основанные на новых технологиях, которые учитывают особенности режимов работы ВИЭ и смогут в полной мере раскрыть потенциал РГ. Одной из таких технологий является блокчейн, или технология распределённого реестра.

**Материалы и методы:** Для написания статьи использовались общенаучные методы исследований на основе анализа и синтеза.

**Результаты:** Определены основные преимущества, недостатки и технические ограничения применения технологии блокчейн в распределённой генерации на основе ВИЭ.

**Выводы:** Предложена концепция модели работы распределённой генерации на основе ВИЭ с использованием технологии блокчейн. Планируется дальнейшее моделирование предложенной концепции с применением математических пакетов имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** распределённая генерация, просьюмер, блокчейн, умный контракт.

# THE USE OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN DISTRIBUTED GENERATION BASED ON RENEWABLE POWER SOURCES

P. Bolotov

The branch of Joint-stock Company «System Operator of the United Power System», RDU Vladimir  
Vladimir, Russian Federation  
bolotovp@yandex.ru

## Abstract

**Background:** One of the main trends of global power industry is distributed generation (DG) based on renewable energy sources (RES). Nowadays, Russian power industry can be described as power system with high share of centralized traditional power plant production. Analyzing global experience and actual government commissions, it may be concluded that in our country distributed generation will grow rapidly. Needs technical and economic models based on technological innovations considering peculiarities of RES for successful integration of DG. Distributed ledger technology - blockchain is one of the perspective technology for the DG.

**Materials and Methods:** General scientific methods of analysis based on synthesis and analysis were used for this research.

**Results:** Engineering constraints, key benefits and disadvantages of blockchain application in distributed generation based on RES were discovered.

**Conclusions:** Conception of blockchain application in distributed generation based on RES is proposed. Further mathematical simulation of proposed conception is planned.

**Key words:** distributed generation, prosumer, blockchain, smart contract.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Широкую известность технология блокчейн приобрела совместно с криптовалютами, одной из которых является биткоин. У многих данные понятия следуют неразрывно и являются синонимами, но это не так. Технология блокчейн (как основа функционирования криптовалют) лишь показывает, на что она способна, степень применения этой технологии гораздо шире. Блокчейн – это выстроенная по определённым правилам непрерывная последовательная цепочка блоков, содержащих некоторую информацию [1]. Информация в блоках может быть абсолютно любой. В этой особенности технологии блокчейн и скрывается широта её применения, начиная от видеоигр и заканчивая финансами и энергетикой. Основными преимуществами данной технологии являются: отсутствие посредников, безопасность, прозрачность, автоматизация. Все эти свойства позволяют использовать ее в работе распределённой генерации, а особенно генерации на основе ВИЭ.

Распределённая генерация для энергосистемы нашей страны – понятие такое же новое, как и технология распределённого реестра.

Основная доля электроэнергии вырабатывается на крупных блоках ТЭС, ГЭС и АЭС [2]. Доля выработки электроэнергии на объектах РГ с использованием ВИЭ крайне незначительна (рис. 1).

Распределённая генерация – генерация, присоединенная к распределительной сети на низком и среднем напряжении. Стоит отметить, что понятие «распределённая генерация» довольно широкое и включает в себя объекты различной мощности:

- до 100 кВт – микрогенерация;
- от 100 кВт до 1 МВт – минигенерация;
- от 1 до 25 МВт – малая генерация.

Основой применения технологии блокчейн в распределённой энергетике являются микро- и мини-генерации небольших потребителей-производителей электроэнергии, использующих возобновляемые источники энергии. Это обусловлено тем, что потребление и генерация таких участников крайне нестабильны и труднопредсказуемы. Учёт и выставление счетов за произведённую и потреблённую электроэнергию происходят в ручном режиме, требующем определённых затрат времени.

## VII. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Текущее законодательство РФ в области энергетики не подразумевает участия бытовых потребителей-производителей в производстве электроэнергии. Согласно «Поручению о стимулировании развития микро-генерации на основе возобновляемых источников энергии» [3] и «Плану мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт» [4] в ближайшем будущем появится законодательная основа функционирования распределённой микрогенерации в составе Единой энергетической системы России (ЕЭС России). Таким образом, устраняются законодательные ограничения для использования малой распределённой генерации в энергетике. С вводом поправок в законодательство появляется такое понятие, как потребитель-производитель электроэнергии, или просьюмер. Просьюмер (англ. *producer*

*and consumer*) – участник рынка электроэнергии, который одновременно потребляет и производит электроэнергию (рис. 2). Просьюмер по своему усмотрению сможет продавать излишки электроэнергии в сеть, которые гарантирующий поставщик должен выкупить по заранее оговоренной цене, равной средневзвешенной нерегулируемой стоимости электроэнергии на оптовом рынке.

Применение такой интеграционной модели РГ в составе ЕЭС России (без использования технологии блокчейн или других средств автоматизации) несёт ряд серьезных недостатков:

- просьюмер не может выбрать, по какой цене, у кого и в какое время покупать электроэнергию;
- просьюмер не может выбрать, по какой цене, кому и в какое время продать излишек произведённой или накопленной электроэнергии.

В то же время применение технологии блокчейн в РГ может сделать экономически обоснованным и выгодным участие бытовых потребителей в производстве электроэнергии без государственного стимулирования и помощи посредников в лице сбытовой компании.

Важно отметить, что в странах западной Европы и США распределённая генерация на основе ВИЭ давно (с 1980 г.) развивается и функционирует в составе энергосистем. Развитие этого направления в энергетике связано с возникновением энергетического кризиса в конце 70-х годов XX века. В настоящее время в Германии доля ВИЭ в общем отпуске ЭЭ составляет около 34 %. При этом просьюмерами на основе СЭС производится около 20 ГВт мощности.

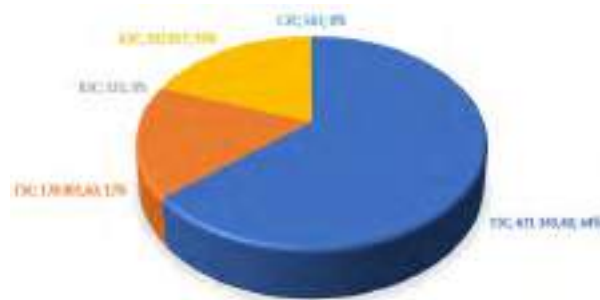


Рис. 1 – Структура выработки электроэнергии электростанциями ЕЭС России, млн кВт·ч

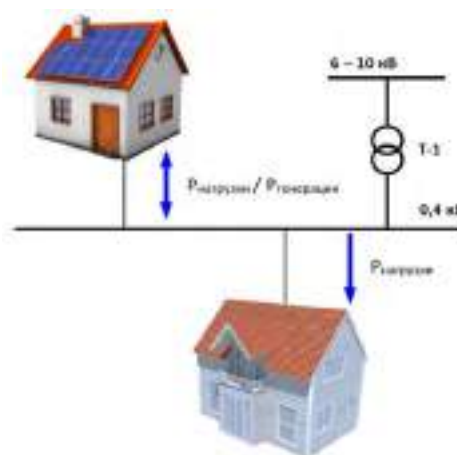


Рис. 2 – Схема перетоков мощности у просьюмера/традиционного потребителя

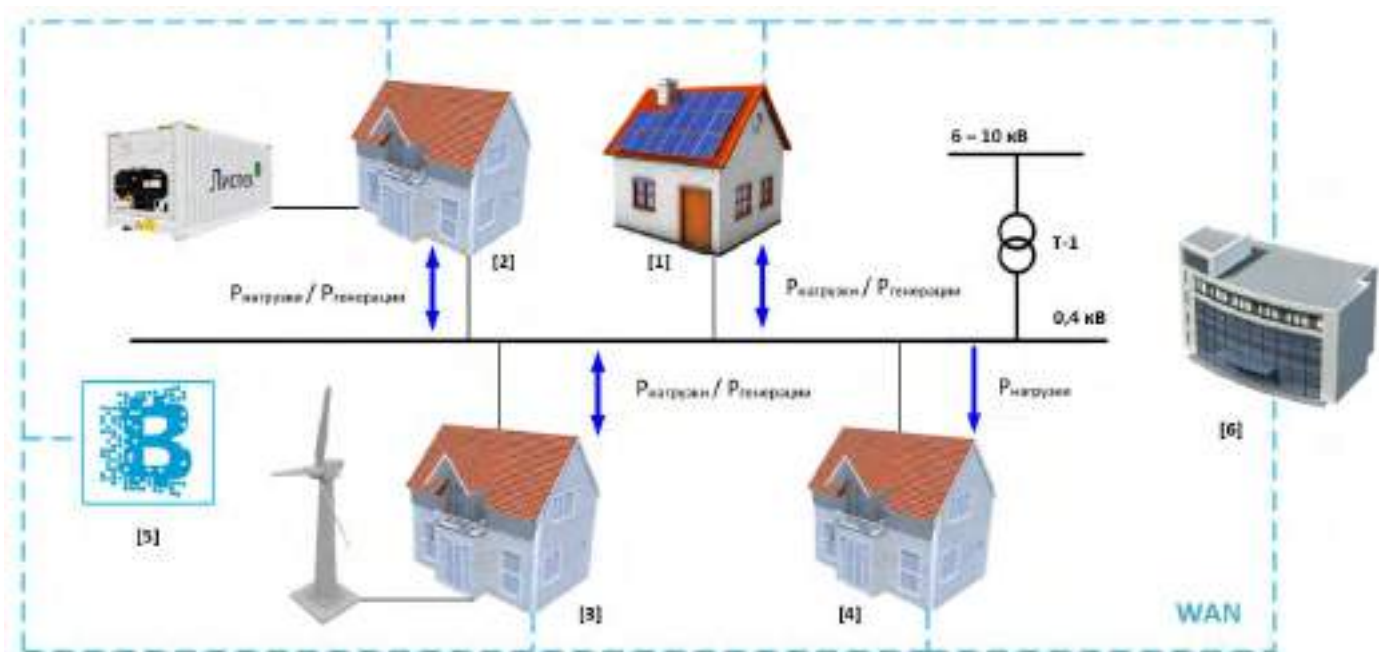


Рис. 3 – Модель интеграции РГ на основе ВИЭ с применением технологии блокчейн: 1 – просьюмер с СЭУ; 2 – просьюмер с накопителем энергии; 3 – просьюмер с ВЭУ; 4 – традиционный потребитель; 5 – объединение просьюмеров на основе технологии блокчейн; 6 – сбытовая организация

Но, как и у нас в стране, применение технологии блокчейн в энергетике находится в состоянии предложения концепции.

#### VIII. МОДЕЛЬ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИЭ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Технология блокчейн позволяет группировать в общую сеть потребителей-производителей электроэнергии для выполнения взаиморасчётов с любым участником объединения. Технологической основой при таком союзе выступают устройства-клиенты, объединённые в общую глобальную (WAN) или локальную сеть (LAN) посредством стека протоколов TCP/IP. В этот альянс может быть включена и сбытовая организация, которая выступает в качестве поставщика электроэнергии, аналогично текущей схеме продажи электроэнергии потребителям (рис. 3).

Устройствами-клиентами могут быть как интеллектуальные счётчики с определёнными вычислительными мощностями, так и персональные компьютеры участников сети. При использовании персональных компьютеров интеллектуальные счётчики выступают лишь точками учёта потреблённой или произведённой электроэнергии.

Концепция взаимодействия при таком объединении потребителей-производителей электроэнергии выглядит следующим образом. В зависимости от стоимости электроэнергии, сложившейся на рынке, каждый просьюмер в определённый момент времени выбирает, у кого и в каком объёме ее купить. Это может быть сбытовая организация, которая продаёт электроэнергию по цене рынка, либо другой потребитель-производитель, у которого в данный момент наблюдается излишек и цена ниже рыночной. Просьюмер, кроме непосредственной выработки электроэнергии, может запасать ее в накопителях энергии и продавать в часы наибольших цен. В данную модель взаимодействия могут быть включены и обычные потребители электроэнергии, участвующие в объединении для верификации блоков данных.

Данный функционал в технологии блокчейн позволяет реализовать «умные контракты». «Умный контракт», или «smart contract» – это аналог договора на электроснабжение между потребителем электроэнергии (абонентом) и сбытовой организацией. В «умном контракте» содержится информация о количестве электроэнергии, готовой к поставке, и её стоимость, а также алгоритм осуществления взаиморасчёта. В случае, если потребителя устраивает стоимость электроэнергии, заключается контракт (транзакция) и осуществляется поставка. Все транзакции, совершённые в определённый момент времени, группируются в блоки данных, распределяются по всем участникам объединения и верифицируются. После осуществления поставки производится оплата поставленной электроэнергии. Алгоритм оплаты также содержится в «умном контракте». Оплата производится посредством перечисления традиционных валют с банковского счёта потребителя на банковский счёт поставщика. Кроме того, взаиморасчёт можно выполнять без использования традиционных средств, применяя криптовалюты.

#### IX. ВЫВОДЫ

С учётом опыта западных стран, функционирование распределённой генерации с использованием ВИЭ возможно и без применения технологии блокчейн. Но только использование технологии блокчейн в распределённой генерации позволяет полностью автоматизировать процессы покупки, продажи и поставки электроэнергии. Потребителям и производителям нет необходимости следить за показанием счётчиков, оплата всей поставленной или потреблённой электроэнергии происходит без участия человека с помощью «умных контрактов». Данное преимущество позволяет многократно уменьшить время финансовых расчётов на рынке и выполнить оплату сразу после поставки электроэнергии.

Благодаря распределённому хранению информации о потреблении и поставке электроэнергии у всех участников объединения многократно снижается риск умышленных

махинаций в отношении друг друга, а надёжность работы всей системы многократно повышается. Для того чтобы вывести из строя функционирующее объединение, нужно вывести из строя большую часть участников.

В ходе дальнейшей либерализации рынка электроэнергетики и мощности их стоимость для населения будет только возрастать. При увеличении стоимости электроэнергии у населения появляется экономический стимул для принятия простому потребителю статуса просьюмера. При данном взаимодействии потребителей и производителей процесс продажи и покупки электроэнергии происходит непосредственно между поставщиком и потребителем. Таким образом, в перспективе сбытовая надбавка гарантирующего поставщика при покупке электроэнергии у просьюмера полностью ликвидируется, что, в свою очередь, снизит стоимость электроэнергии для конечного потребителя. Снижение стоимости на электроэнергию достигается также за счёт частичного исключения платы за услуги по ее передаче, которые составляют значительную часть ее цены (рис. 4).

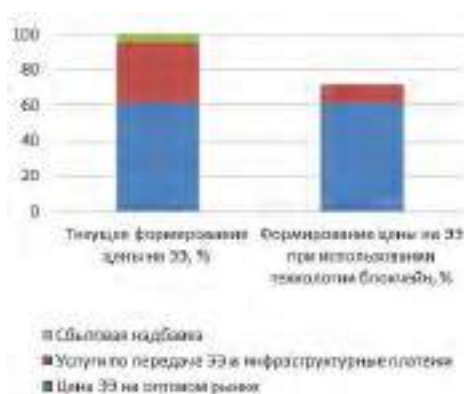


Рис. 4 – Формирование цены на ЭЭ в текущих условиях и с применением технологии блокчейн

Небольшое увеличение процента инфраструктурных платежей наблюдается за счёт появления расходов на поддержание функционирования WAN/LAN.

Несмотря на все достоинства, в технологии блокчейн, как и в любой инновационной идее, есть свои слабые стороны. В настоящее время большим минусом и технологическим ограничением данной технологии является

необходимость выполнения верификации блоков. Для выполнения этого действия необходима определённая вычислительная мощность компьютерной техники, выступающей в качестве устройств-клиентов. На текущий момент данная проблема полностью не решена, но в перспективе с ней возможно справиться за счёт изменения концепции верификации блоков.

Дальнейшее развитие и применение технологии распределённых реестров в энергетике будет полностью зависеть от проводимых изменений в законодательстве. Для государства внедрение новых технологий в отрасль является приоритетом, поэтому можно предположить, что технология блокчейн найдет своё применение.

Подводя итог, выделим основные достоинства и недостатки применения технологии блокчейн в энергетике.

#### Достоинства:

- автоматизация процесса продажи и покупки электроэнергии;
- хранение данных в распределённой базе;
- высокая отказоустойчивость;
- отсутствие посредников при выполнении расчётов;
- снижение стоимости электроэнергии для конечного потребителя.

#### Недостатки:

- для верификации блоков данных необходима вычислительная мощность.

#### Список литературы

- [1] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Блокчейн>.
- [2] Отчет о функционировании Единой энергетической системы в 2017 году // АО «СО ЕЭС». 2018. 20 с.
- [3] Резолюция правительства РФ от 11 февраля 2017 г. № АД-П9-776.
- [4] План мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт от 19 июля 2017 г.
- [5] Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации, 3-е изд. Учебный центр НП «Совет рынка», 2017.
- [6] Микрогенерация на основе ВИЭ // Энергетический бюллетень. 2017.

# ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Бочков И.С., Амиров Д.И.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
ilya.ilya.isaev@list.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Солнечные фотоэлектрические установки (СФУ) обычно располагаются на открытом пространстве (воде, вдоль магистралей, открытых местностях, крышах зданий и жилых комплексов), а также на электромобилях, поверхности которых накапливают слои пыли. Это делает солнечные панели уязвимыми к различного рода загрязнителям. Таким образом, необходимо исследовать, насколько влияние внешних факторов окружающей среды снижает мощность солнечных фотоэлектрических установок.

**Материалы и методы:** Использовались факторный метод и метод табличного и графического отображения данных.

**Результаты:** Выявлены основные изменения в показателях при измерении мощности с воздействием внешних факторов загрязнения солнечных фотоэлектрических установок.

**Выводы:** Получены результаты зависимости мощности солнечных фотоэлектрических установок от природы загрязняющего панель вещества. Составлены следствия по проведённым экспериментам, где наиболее выгодно использование солнечных панелей с учётом факторов воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** фотогальванические установки, солнечные панели, окружающая среда, солнце, загрязнение, экология.

# THE INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT ON THE WORK OF SOLAR PANELS

I. Bochkov, D. Amirov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russia  
ilya.ilya.isaev@list.ru

## Abstract

**Background:** Solar panels are usually located in open space (water, along highways, open areas, on the roofs of buildings and residential complexes), and also on electromobility, the surfaces of which will accumulate dust layers. This makes solar panels vulnerable to various kinds of contaminants. Thus, it is necessary to investigate how much the influence of external environmental factors reduces the power of photovoltaic plants.

**Materials and Methods:** The method of tabular and graphical data mapping and the factor method.

**Results:** The main changes in the indicators for measuring the power with the influence of external pollution factors of the Federal State University.

**Conclusions:** The results of the dependence of the photovoltaic system power on the nature of the substance polluting the panel are obtained. Investigations were made on the experiments carried out, where the most beneficial use of solar panels taking into account environmental factors.

**Key words:** photovoltaic plants, solar panels, the environment, the sun, pollution, a solar panel, ecology.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом всё больше прогрессирующих стран переходят на использование «зеленой» энергетики. Выработка энергии с применением мощности Солнца занимает значительную часть в ней. Солнечные панели устанавливаются в различных экологических условиях окружающей среды, что по-разному сказывается на работоспособности фотоэлементов.

На работу солнечных панелей оказывают влияние различные виды загрязнений. К ним относятся пыль, грязь, капли воды, песок, пепел, осадки, содержащие разнообразные вещества и микроэлементы. Данные факторы следует учитывать, так как они могут затемнять поверхность панели, нагревать её либо отклонять лучи от нее, что может существенно снизить производительность установки.

## II. СХЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При проведении эксперимента использовались солнечная панель «1,5W Solar Panel 81X137», натриевая лампа NAV-T 70W, мультиметр BORT BMM-1000N (рис. 1). В ходе эксперимента была найдена мощность солнечной панели. Во время исследования были учтены все факторы изменения работоспособности солнечных установок: повышение и понижение температуры, интенсивность и расстояние от источника света до солнечной панели, угол падения лучей.

На панель поочередно наносился слой, препятствующий свету (грязь, соль, пыль) и включался источник света, затем панель очищалась и опыт повторялся.

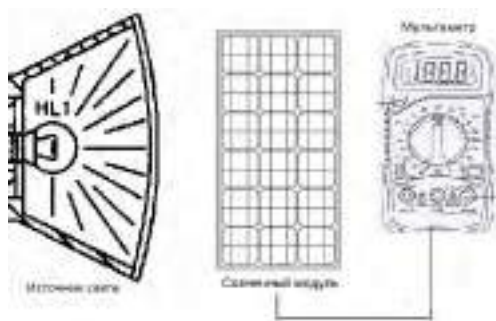


Рис. 1. – Экспериментальная установка

Мощность солнечной панели  $P_{с.п}$  рассчитали по формуле, Вт:

$$P_{с.п} = IU,$$

где  $U$  – напряжение солнечной панели, В;  $I$  – сила тока солнечной панели, А. Показания силы тока и напряжения сняли с мультиметра, подключенного к панели.

Результаты измерения представлены в таблице, сравнительная характеристика мощностей приведена на диаграмме (рис. 2).

ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ ПРИ НАНЕСЕНИИ НА НЕЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Номер опыта	Загрязняющий фактор	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт
1	Без загрязнителя	5,29	0,15	0,7935
2	Земля, грязь	5,2	0,1	0,52
3	Пыль	5,1	0,09	0,459
4	Соль	5,25	0,11	0,5775
5	Пыль, грязь, соль	5,05	0,06	0,303

Каждый слой загрязняющего фактора одинаковой толщины наносился на чистую солнечную панель для выравнивания условий во всех экспериментах. Источник света периодически отключали во избежание перегрева солнечной панели, что могло повлечь за собой уменьшение мощности и различия в измерениях.

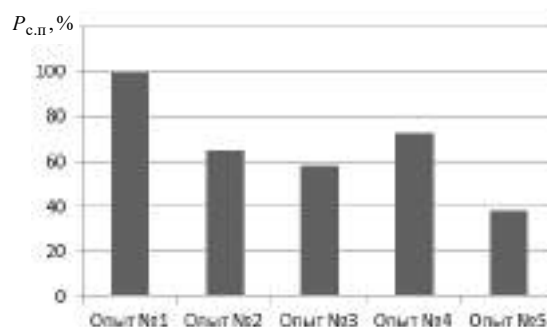


Рис. 2 – Сравнительная характеристика мощностей

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ

После проведения опыта было замечено, что каждый из факторов загрязнения изменил мощность солнечной панели (уменьшил), но стоит учесть, мощность панели не была снижена больше, чем на 50 % от первоначальной при нанесении каждого загрязнителя по отдельности слоем около одного миллиметра. В меньшей степени загрязняла соль, что позволяет говорить о целесообразности использования солнечных панелей на воде, где возможны солевые образования, т. е. в океанах, морях, а также на кораблях, передвигающихся за счёт электродвигателя, функционирующего от автономного источника электроэнергии. Больше всего сократили мощность солнечной панели пыль и грязь, так как они являлись препятствием для прохождения солнечных лучей. Следует также учесть эту проблему в будущем, при установке солнечных панелей вдоль дорог и магистралей, на электромобилях и светофорах. Кроме того, в процессе исследования выяснилось, что пыль, нанесённая на солнечную панель, нагревается достаточно быстро, что также сказывается на работоспособности солнечных батарей.

### Список литературы

- [1] Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / под ред. Э.В. Сарнацкого, С.А. Чистовича. М.: Стройиздат, 1990.
- [2] Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения: пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. М.: ПРОМСТРОЙПРОЕКТ, 1993. 45 с.
- [3] Виссаронов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: МЭИ, 2008.

# ФОРМИРОВАНИЕ ИМИДЖА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Вавилова Ж.Е.

Казанский государственный энергетический университет  
Казань, Российская Федерация  
zhannavavilova@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В специализированной литературе по связям с общественностью в энергетическом секторе нередко отмечается, что работа отрасли стратегически важна для развития всего государства, а коммуникационное сопровождение этой работы, в том числе формирование имиджа энергетического предприятия, является залогом высокой степени доверия публик к организации. При этом недавно опубликованный аналитический отчет об исследовании коммуникационной работы организаций топливно-энергетического комплекса России в социальных сетях дает представление о недостаточности мер по формированию имиджа российских энергетических компаний на медиаплатформах.

**Материалы и методы:** При подготовке материала работы был проведен качественный анализ контента страниц энергетических компаний Республики Татарстан в социальных сетях.

**Результаты:** Выявлены основные особенности осуществления коммуникаций в сфере энергетики с целью формулирования специфики формирования имиджа предприятия современными коммуникативными инструментами, в том числе на медиаплатформах. Проанализированы попытки взаимодействия с публиками в Интернете, которые предпринимают отечественные предприятия энергетической отрасли, а также дан краткий обзор контента страниц энергетических компаний Республики Татарстан.

**Выводы:** На данный момент компании энергетического сектора Татарстана не воспринимают формирование имиджа на медиаплатформах как одну из стратегически важных задач.

**Ключевые слова:** имидж, формирование имиджа, энергетика, социальные медиа.

# BUILDING AN IMAGE OF A POWER ENGINEERING ENTERPRISE VIA SOCIAL MEDIA

Zh. Vavilova

Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
zhannavavilova@mail.ru

## Abstract

**Background:** In papers on public relations in the energy sector, it is often noted that the work of the industry is strategically important for the development of the entire country, and communication support of this work, including building an image of a power engineering enterprise, is a guarantee of a high degree of public confidence in the organization. At the same time, a recently published analytical report on the study of how organizations of the fuel and energy complex of Russia are represented in social networks supposes inadequacy of image-building measures of Russian energy companies operating on media platforms.

**Materials and Methods:** When preparing the paper material, a qualitative analysis of the content of pages of Tatarstan energy companies in social networks was carried out.

**Results:** The main features of communications management in the energy sector have been identified in order to formulate the peculiarities of image building with the help of modern communication tools, including social media. Attempts to interact with publics on the Internet, undertaken by domestic energy companies, have been analyzed, and a brief overview of the pages' content of Tatarstan energy companies is given.

**Conclusions:** At the moment, Tatarstan energy companies do not perceive image building on media platforms as one of their strategically important tasks.

**Key words:** image, image building, power engineering, social media.

## I. СПЕЦИФИКА УПРАВЛЕНИЯ КОММУНИКАЦИЯМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ

Важность управления коммуникациями в сфере производства для бизнеса (B2B), куда традиционно относят энергетическую отрасль, обусловлена тем, что деятельность этих компаний определяет основные макроэкономические показатели развития государства [1, с. 115], поэтому имидж конкретных предприятий сектора неотъемлемо связан с имиджем страны в целом. На операционном уровне нормально функционирующие энергетических компаний чрезвычайно значимо для экономического развития страны; для общества гораздо важнее надежность работы энергетического комплекса и централизованного теплоснабжения, нежели чем, например, деятельность бутиков брендовой одежды. При этом последние тратят гораздо больше усилий по налаживанию и поддержанию связей со своими аудиториями, что обусловлено, в первую очередь, высокой конкуренцией в секторе. Осмысление этого парадокса при поиске ориентиров в управлении организационными коммуникациями должно способствовать определению стратегии, целей и средств для реализации этой стратегии на уровне коммуникаций энергетического предприятия. В статье будет предпринята попытка резюмировать основные особенности осуществления коммуникаций в сфере энергетики с целью формулирования специфики формирования имиджа предприятия современными коммуникативными инструментами, в том числе на медиаплатформах.

Специалист по стратегическим коммуникациям в бизнесе Д. Чернов в книге «Волна, или Как управлять коммуникативными коммуникациями в России, когда все меняется» выделяет следующие особенности управления коммуникациями в секторе производства «Бизнес для бизнеса», к которому относится энергетика: большой объем реализации и прибыли; отсутствие зависимости протекания производственного процесса от смены собственника; продолжительный оборот денежных средств; влияние органов власти на успех предприятия при сравнительно небольшом влиянии персонала на эффективность бизнеса; отсутствие конкуренции; многократная разница между себестоимостью и продажной ценой; региональная концентрация производства [1, с. 116–121]. Как мы видим, в фокусе коммуникаций – представители органов власти как ключевая аудитория на каждой стадии развития бизнеса, от зарождения до стабилизации, при этом отношения с широкой общественностью не имеют большого смысла при отсутствии розничного продукта. Внутренняя аудитория также не рассматривается автором как ключевая, поскольку персонал не так сильно влияет на эффективность бизнеса, как в сфере услуг; в условиях автоматизации процессов требования к квалификации персонала сменяются требованиями к неукоснительному соблюдению правил техники безопасности.

В. Громов в работе «PR в энергетике» также отмечает, что монопольность энергетической отрасли задает тон управлению коммуникациями на предприятиях сектора [2, с. 28]: сегодня отсутствует настоящая конкурентная борьба между производителями электроэнергии, так как эта деятельность изначально находилась в руках государства. Сохранившаяся с советских времен инфраструктура обуславливает отсутствие борьбы за рынки сбыта,

поскольку обеспечение двух соседних регионов энергией не делает энергосбытовые компании конкурентами. Поставщики альтернативной энергии (например, индивидуальные котельные) в основном обеспечивают новые жилые секторы, не предлагая возможности переключения уже эксплуатируемым объектам. К другим особенностям индустрии автор относит специфику законодательных ограничений возможности повышения и снижения стоимости энергии, одновременность процессов ее производства, распределения и потребления, низкую способность к брендированию и дифференцированию от товара конкурентов, а также высокую вероятность аварийных ситуаций техногенного характера на предприятии.

В связи с этим многие из инструментов маркетинга остаются незадействованными – из традиционного маркетингового комплекса выпадает продуктовая составляющая, при недифференцируемых свойствах товара и отсутствии ассортимента, ценовая составляющая, при жесткой регуляции тарифов, а также локационная составляющая, ограничивающая канал распределения товара зоной расположения объекта энергопотребления. Это обуславливает необходимость более широкого применения технологий связей с общественностью, в том числе по формированию имиджа компании-поставщика энергии. Потенциальный масштаб аварий на производстве в секторе возвращает внутреннюю аудиторию в фокус коммуникативных практик предприятий. Кроме того, в условиях рыночной экономики, когда энергетические предприятия разделены между разными компаниями-собственниками и потребители получают возможность самостоятельно выбрать поставщика электроэнергии, перейдя на обслуживание к другой энергосбытовой организации, неизбежно возникают предпосылки для конкуренции между ними за рынки сбыта и потребителей. При этом поддержание делового имиджа при контактах с представителями органов власти остается приоритетным направлением в управлениях коммуникациями. В связи с этим возрастает необходимость интегрированного формирования имиджа, учитывающего особенности взаимодействия предприятия с разнообразными публиками и препятствующего фрагментированному восприятию деятельности компании – например, когда аудитория не ассоциирует поставщика товаров или услуг с той фирмой, рекламу которой видит по телевизору. Этот диссонанс может усилиться в ситуации, когда один и тот же человек или группа входят в несколько аудиторий организации, например, являясь ее работниками, акционерами и потребителями продукции в одно и то же время.

## II. ФОРМИРОВАНИЕ ИМИДЖА КАК ПРОЕКЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ

Формирование благоприятного имиджа традиционно является одним из важнейших направлений работы связей с общественностью. С точки зрения реализации коммуникационной стратегии, мероприятия по созданию имиджа необходимы для адекватной передачи миссии, ценностей, культуры и других элементов идентичности организации ее аудиториям. Базовое определение организационного имиджа (от английского *image* – образ, картинка) – это «образ или отражение организации в глазах и умах ее публик. Это чувства и убеждения по поводу организации в восприятии публик, сформированные в результате накопления сообщений» [3, с. 89]. В результате проецирования организационной идентичности в коммуникационном потоке, представитель аудитории получает некий



импринт, который при всей относительной стабильности варьируется от индивида к индивиду и может трансформироваться с течением времени, а также заимствоваться у третьих лиц при дефиците информации о компании. Так, оценки представителей средств массовой информации и лидеров мнений часто формируют имидж в ментальной сфере индивидов, которые не сталкивались с работой организации или не сформировали собственного мнения о ней.

С точки зрения контроля компании над собственным имиджем выделяют три типа коммуникативных потоков: первичная коммуникация (невербально формирующая имидж через опыт взаимодействия публики и компании, например, через пользование ее продуктом), вторичная (сообщения по официальным коммуникационным каналам организации, в том числе имиджевая реклама) и третичная (версии о деятельности компании от третьих лиц, в том числе от средств массовой информации). Сегодня можно вести речь о конвергенции двух последних типов потоков на базе онлайн-платформ: здесь не только компания может заявить о себе, проинформировать аудиторию о важном нововведении, но также получить обратную связь как от внешней, так и от внутренней аудитории. Поддержание этой связи способствует формированию ведущего информационного потока, освещающего работу предприятия, предлагающего версию событий «от первого лица» и возможность мгновенного реагирования на любые альтернативные версии на платформе. Формирование собственного дискурса необходимо любой организации, поскольку она является наиболее информированным субъектом в вопросах собственной деятельности, способным предоставить самый полный отчет аудиториям, в том числе средствам массовой информации и регулирующим органам [4, 5]. Концентрация сообщений в среде, открытой любому представителю каждой из публик компании, препятствует формированию фрагментированного имиджа, когда работник предприятия, его акционер и потребитель его же продукции – в одном лице – получает интерферирующие сообщения. Несомненно, коммуникационные потребности у разных аудиторий разные, поэтому сообщения могут варьироваться в зависимости от интересов публик, однако все они должны базироваться на организационной идентичности и единой стратегии позиционирования. Тем самым, потенциал социальных медиа открывает возможности для стратегически спланированной самопрезентации компании, что способствует интегрированному формированию имиджа с учетом специфики работы энергетического сектора и идентичности конкретной организации.

### III. МЕДИАПЛАТФОРМЫ КАК СРЕДА ФОРМИРОВАНИЯ ИМИДЖА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

Формирование имиджа онлайн-инструментами на разнообразных медиаплатформах – тренд последнего десятилетия, в который успешно вписываются многие российские коммерческие и некоммерческие организации. Попытки взаимодействия с публиками в Интернете предпринимают и отечественные предприятия энергетической отрасли. Опыт работы российского топливно-энергетического комплекса на мировых медиаплатформах систематизирован в недавнем аналитическом отчете об исследовании представленности организаций топливно-энергетического комплекса России в социальных сетях [6]. Было выбрано 906 организаций, входящих в энергетическую систему

Российской Федерации, и проанализирована их коммуникационная деятельность на шести наиболее популярных в стране социальных платформах. По результатам исследования приходится констатировать, что подавляющее большинство компаний, входящих в топливно-энергетический комплекс страны, пренебрегают онлайн-каналами для коммуникаций с публиками; при наличии сайтов у каждой из исследованных компаний, лишь 20 % предоставляют ссылки на официальные страницы в социальных сетях. Большая часть страниц в социальных сетях, проанализированных авторами отчета, имеет низкую коммуникативную ценность: зачастую подписчиков страниц компаний даже меньше, чем управляющих этими страницами; информационные сообщения неактуальны, имеют низкую новостную ценность и минимум откликов. Все это не способствует тому, чтобы руководство энергетических организаций имело возможность формировать повестку дня и курс развития своей отрасли, влиять на циркуляцию информации, формирующей мнения и отношения публик к работе компаний и сектора в целом.

Качественный анализ контента страниц энергетических компаний Республики Татарстан в социальных сетях подтверждает эти результаты. Так, сообщество холдинга Татэнерго в социальной сети ВКонтакте отличается низкой коммуникационной активностью (два поста за 2017 г., четыре – за 2016, по три за 2015 и 2014 гг.; всего 256 участников на 8 мая 2018 г.). Нет публичных ответов на многочисленные запросы о вакансиях, стена замусорена рекламными объявлениями, не имеющими отношения к работе предприятия и отрасли (юридические услуги). На момент проведения исследования все семь постов за 2018 г. были посвящены необходимости смены полисов медицинского страхования или содержали другую информацию медицинского характера, в том числе рекламу платных медицинских услуг [7]. В фильмотеке из четырех сюжетов, загруженных от семи до десяти лет назад, лишь один имеет непосредственное отношение к энергетике – поздравление работников отрасли с 23 февраля (от 22 февраля 2008 г.). У ролика девять просмотров и один положительный комментарий. 53 снимка в фотоальбоме говорят о неформальном характере сообщества – некоторые кадры (за 2008 и 2009 гг.) сделаны во время праздничных застолий и представляются не совсем подходящим визуальным сопровождением официальной группы.

Казанская ТЭЦ-1 демонстрирует гораздо более эффективную работу по формированию имиджа (профессионального, делового, спортивного, экологического и т. д.). Среди постов преобладают новостные сообщения о работе компании, отчеты о заседаниях, сведения о досуговой деятельности работников, поздравления с праздниками, в том числе профессиональными. Фильмотека включает 44 видеоматериала на разнообразные темы (в основном, увлечения сотрудников и юмор). 41 фотоальбом содержит более двух тысяч фотографий, посвященных спортивной («Настольный теннис», «Волейбол»), социальной («Субботник на озере Кабан», «Субботник») и досуговой деятельности работников предприятия («Пиццерия», «НКЦ», «Худ. самодеятельность 2011»). Однако необходимо отметить более чем скромные масштабы онлайн-сообщества (184 участников на 8 мая 2018 г., чуть больше подписчиков в сервисе организации в Instagram – 253), односторонний характер информационного взаимодействия (или даже воздействия со стороны администраторов сообщества) и низкий уровень грамотности авторов большинства сообщений [8].

Более высокие показатели можно отметить у Филиала ОАО «ТГК-16» «Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1)» с относительно высоким для филиала уровнем подписки ВКонтакте (523 участника на 8 мая 2018 г.), позиционированием на странице Telegram-канала и высокой информативностью сообщений, в том числе негативного для организации содержания (репортажи с места аварий, информация о проведении слушаний по искам к ТЭЦ и т. д.). Тем самым организация имеет возможность формировать повестку дня, предлагая собственную версию событий, а также создавать имидж ответственной, информационно открытой компании [9]. Собрание видеоматериалов включает 35 сюжетов на разнообразные темы, в том числе образовательного характера («Как работает ГРЭС?»); при этом часть видео недоступна («Защита рук рабочего» и некоторые другие). 84 фотоальбома содержат почти 5000 фотографий. Сюжеты посвящены праздникам («День энергетика»), спортивной жизни предприятия («Дартс 2017», «Турслет 2016»), разнообразным поездкам, экскурсиям и конференциям.

Обзор можно продолжить, но очевидно, что на данный момент компании энергетического сектора Татарстана не воспринимают формирование имиджа на медиаплатформах как одну из важнейших коммуникационных задач. Даже в лучшем случае группа организации в социальной сети рассчитана на внимание внутренней аудитории, в худшем – работа на медиаплатформе не ведется вовсе. Ни одно из предприятий энергетики республики не попало в список лидеров рейтинга эффективности коммуникаций на медиаплатформах, составленного авторами аналитического отчета об исследовании представленности организаций топливно-энергетического комплекса России в социальных сетях в 2016 году («ТЭК России в социальных сетях. Итоги 2016»). Учитывая, что имидж является нематериальным активом организации, который имеет денежное выражение и повышает стоимость компании

по сравнению с конкурентами, которые не вкладывали ресурсов для формирования и поддержания своего имиджа, руководству предприятий необходимо включить коммуникации в сферу своих стратегических интересов. При всей, казалось бы, несерьезности и неформальности, коммуникации в социальных сетях удерживают компанию в фокусе внимания ее публик к обоюдному интересу и эффективной работе всего сектора.

### Список литературы

- [1] Чернов Д.В. Волна, или Как управлять корпоративными коммуникациями в России, когда все меняется: практический путеводитель для первых лиц и руководителей коммуникационных служб. М.: Коммуникационная группа АГТ, 2008. 264 с.
- [2] Громов В. PR в энергетике. Самара: ИД «Бахрах-М», 2013. 144 с.
- [3] Вавилова Ж.Е. Стратегическое управление коммуникациями: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 175 с.
- [4] Вавилова, Ж. Е. Формирование этического дискурса как элемент управления коммуникациями в энергетике // Сб. матер. докл. Национального конгресса по энергетике. Казань, 2014. Т. 5. С. 118–127.
- [5] Вавилова Ж.Е. Этический дискурс в управлении вопросами: стратегические коммуникации в сфере экологических рисков // VI Международная научно-практическая интернет-конференция «Стратегические коммуникации в современном мире: от теоретических знаний к практическим навыкам» URL: <https://www.sgu.ru/conference/strategicheskie-kommunikacii-v-sovremennom-mire-ot-0/riski-sovremennyh-socialnyh-kommunikaciy> (дата обращения: 16.03.18).
- [6] ТЭК России в социальных сетях. Итоги 2016. Аналитический отчет об исследовании представленности организаций топливно-энергетического комплекса России в социальных сетях. URL: <http://center-esipova.ru/stati/publikacii/> (дата обращения 08.05.18).
- [7] Холдинг Татэнерго. URL: <https://vk.com/club1702963> (дата обращения: 08.05.18).
- [8] Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1. Страница ВКонтакте. URL: <https://vk.com/club23184883> (дата обращения: 08.05.18).
- [9] Филиал ОАО «ТГК-16» «Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1)». URL: <https://vk.com/nktec> (дата обращения: 08.05.18).

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Ворошилов А.А., Шалухо А.В., Липужин И.А.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева»

Нижний Новгород, Россия

alejandro.voroshilov@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В связи с расширением применения источников малой распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии, актуальной задачей является интеграция децентрализованных генерирующих мощностей в электротехнический комплекс России. Эффективным решением поставленной задачи является механизм виртуальной электростанции. Для создания полномасштабных проектов виртуальной электростанции требуются решения многих задач – технических, методологических, нормативных. Изучению вопросов взаимодействия источников малой распределенной генерации с распределительной электрической сетью посвящены работы многих отечественных ученых и научных коллективов. Однако большинство из них связаны с теоретическими расчетами, математическим и компьютерным моделированием. В данной работе посредством лабораторного стенда исследуются технические аспекты функционирования электротехнического комплекса – виртуальная электростанция.

**Материалы и методы:** Использовались метод подобия, сформулированный Кирпичевым – Гухманом, и графический метод. Исследования проведены на разработанном авторами лабораторном стенде виртуальной электростанции.

**Результаты:** На основе масштабных моделей изготовлен лабораторный стенд, моделирующий электротехнический комплекс виртуальной электростанции с источниками малой распределенной генерации. Сравнение значений токов и напряжений, полученных при теоретическом расчете и физической модуляции, свидетельствует о корректной работе лабораторного стенда. Проведены исследования электротехнического комплекса виртуальной электростанции на лабораторном стенде.

**Выводы:** Проведенные эксперименты выявили особенности работы электротехнического комплекса виртуальной электростанции, которые стоит учитывать при проектировании. Определены причины возникновения данных особенностей.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, виртуальная электростанция.

## INVESTIGATION OF WORK OF VIRTUAL POWER PLANT WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

A. Voroshilov, A. Shaluhov, I. Lipuzhin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russian Federation

alejandro.voroshilov@yandex.ru

## Abstract

**Background:** In connection with the expansion of the use of small distributed generation sources based on renewable energy sources, the actual task is the integration of decentralized generating capacities into the electrical engineering complex of Russia. An effective solution is the mechanism of a virtual power plant. To create full-scale projects of a virtual power plant, many tasks are needed – technical, methodological, regulatory. Studies of the interaction of small distributed generation sources with the distribution network are devoted to the work of many domestic scientists and research teams. However, most of them are related to theoretical calculations, mathematical and computer modeling. In this paper, through a laboratory stand, technical aspects of the operation of an electrical complex-a virtual power plant -are studied.

**Materials and methods:** We used the similarity method formulated by Kirpichev-Gukhman, and the graphical method. The research were conducted on a developed laboratory stand of a virtual power plant.

**Results:** On the basis of large-scale models, a laboratory stand was constructed simulating the electrotechnical complex of a virtual power plant with sources of small distributed generation. Comparison of the values of currents and voltages obtained during theoretical calculation and physical modulation testifies to the correct operation of the laboratory bench. The research of the electrotechnical complex of a virtual power plant on a laboratory bench was carried out.

**Conclusions:** The conducted experiments revealed the features of the operation of the electrical complex of a virtual power plant, which should be taken into account in the design. The reasons for the appearance of these features are determined.

**Key words:** distributed generation, renewable energy sources, virtual power plant.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы развития малой распределенной генерации (МРГ), в том числе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), делают крайне актуальной задачу их эффективной интеграции в электроэнергетический комплекс России. Одно из перспективных решений связано с объединением источников распределенной генерации в так называемые виртуальные электростанции (ВиЭС) [1].

Под ВиЭС понимается управляемая активно-адаптивная микросеть, агрегирующая источники малой генерации, накопители электроэнергии, ее потребителей и потребителей-регуляторов нагрузки.

Для создания полномасштабных проектов ВиЭС требуются решения многих задач – технических, методологических, нормативных. Статья посвящена исследованию технических аспектов работы электротехнического комплекса, связанного с распределительной электрической сетью (РЭС) и включающего несколько источников МРГ.

## II. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Изучению вопросов взаимодействия источников МРГ с РЭС посвящены работы многих отечественных ученых и научных коллективов. Однако большинство из них связаны с теоретическими расчетами, математическим и компьютерным моделированием [2].

На базе кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева разработан лабораторный стенд, моделирующий электротехнический комплекс ВиЭС с источниками МРГ.

Упрощенная однолинейная схема стенда и внешний вид представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

В основу стенда положены масштабные модели элементов системы электроснабжения типового поселка (коэффициент масштабируемости  $k_M = 100$ ). Пересчет параметров производился по основным законам электротехники (законы Ома и Кирхгофа) с учетом третьей теоремы подобия, сформулированной Кирпичевым – Гухманом [3].

Особенностью стенда является модульная конструкция, что обеспечивает возможность реализации различных вариантов структуры ВиЭС.

В состав лабораторного стенда (рис. 2) входят 9 функциональных блоков: 1 – источник питания; 2 – регулировочный трансформатор; 3 – распределительное устройство; 4 – активная нагрузка; 5 – имитатор ветрогенератора; 6 – аккумуляторная нагрузка; 7 – двигательная нагрузка; 8 – имитатор солнечной электростанции; 9 – система управления.

Напряжение питания стенда равно 220 В (однофазное исполнение), установленная мощность активной нагрузки составляет 1900 Вт, двигательной нагрузки – 550 Вт, имитатор ветрогенератора рассчитан на 2000 Вт, максимальная мощность солнечной электростанции – 2000 Вт.

В лабораторном стенде использованы серийные инверторы отечественного производителя, применяемые в реальных системах электроснабжения. Основные технические характеристики преобразователей приведены в таблице.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания №13.2078.2017/4.6.

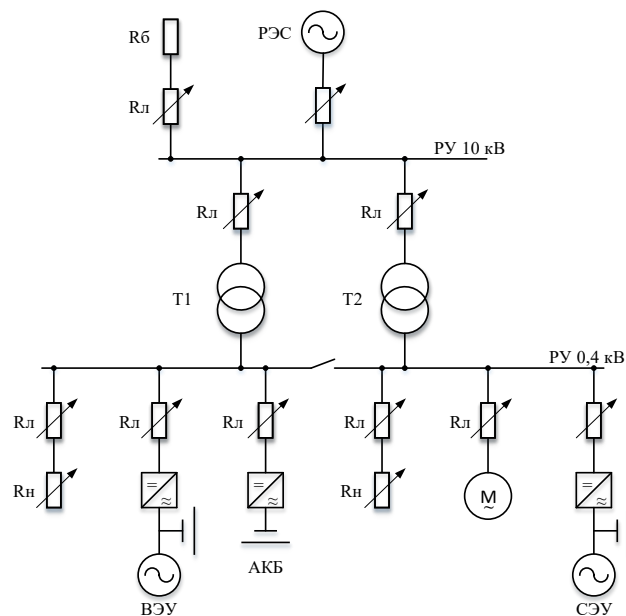


Рис. 1 – Упрощенная однолинейная схема лабораторного стенда ВиЭС

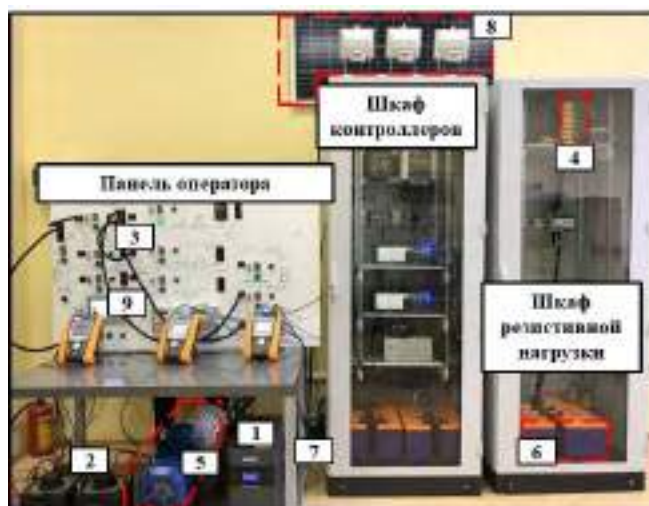


Рис. 2 – Внешний вид лабораторного стенда ВиЭС

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНВЕРТОРОВ

Параметр	Значение
Мощность, Вт	2000
Напряжение на аккумуляторе, В	24
Синусоидальное напряжение на выходе	есть
Диапазон рабочих частот на выходе, Гц	50/60
Генерация излишков энергии от аккумуляторов в сеть	есть
Приоритет использования возобновляемых источников для питания нагрузки	есть
Поставка излишков энергии от источника, подключенного к выходу переменного тока, в сеть	есть

## III. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения особенностей при работе моделируемой ВиЭС с источниками МРГ составлена программа исследований, включающая следующие режимные сценарии:

1. Динамическое изменение нагрузки и напряжения на ТП 0,4 кВ при питании первой от РЭС.
2. Динамическое изменение нагрузки и напряжения на ТП 0,4 кВ при питании первой от РЭС и одного источника МРГ.
3. Динамическое изменение нагрузки и напряжения на ТП 0,4 кВ при питании первой от РЭС и нескольких источников МРГ.

Данные исследования проводились при двух вариантах модуляции РЭС:

- 1) она задается существующей сетью университета (прямое подключение стенда к сети 220 В);
- 2) питание стенда осуществляется через источник бесперебойного питания (ИБП).

Исследуемая схема представлена на рис. 3. Красными точками обозначены места установки анализаторов качества электрической энергии АКИП АКЭ-824. С помощью приборов снимались осциллограммы тока и напряжения, а также производились измерения показателей качества электрической энергии, установленных ГОСТ 32144-2013 [4].

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнение результатов исследований, полученных с помощью лабораторного стенда и теоретических расчетов на фоне основных законов электротехники (законы Ома и Кирхгофа), показало, что масштабная модель, реализованная в лабораторном стенде, соответствует реальной системе электроснабжения поселка. Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями тока и напряжения не превышают 10 %.

При работе системы в сценариях 2 и 3 установлено резкое возрастание тока ( $0,1-0,7I_{уст}$ ) в начальный момент выдачи через инвертор излишков мощности от источников МРГ в РЭС. Величина данного возмущения зависит от мощности и внутренних настроек преобразователя, в частности от показателя генерируемой мощности, который задается в процентах и зависит от степени заряда аккумуляторных батарей. При проектировании сетей с источниками МРГ большой мощности стоит учитывать данный аспект для настройки релейной защиты и автоматики.

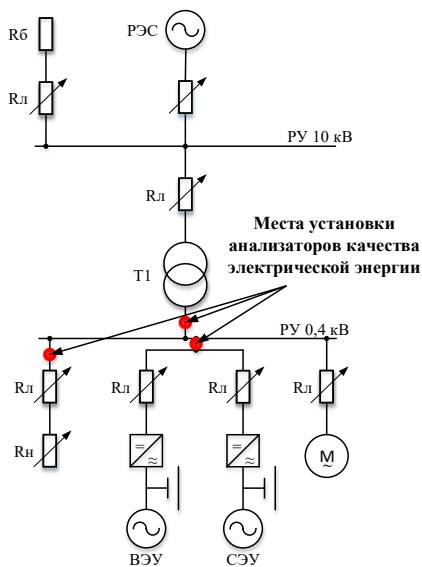


Рис. 3 – Исследуемая схема

Также резкие скачки тока в начальный момент выдачи через инвертор излишков мощности от источников МРГ в РЭС оказывают негативное воздействие на напряжение питающей сети. Можно предположить, что при включении более мощного источника МРГ, значение напряжения может превысить допустимый предел, что негативно отразится на потребителях, чувствительных к перепадам напряжения (рис. 4, 5).

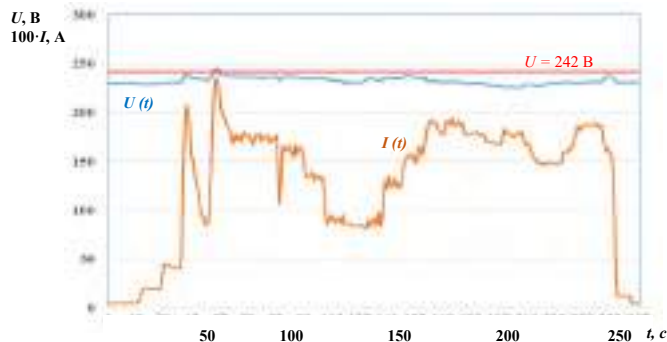


Рис. 4 – Осциллограммы тока и напряжения при питании от РЭС и включении двух источников МРГ в точке за трансформатором ТП 0,4 кВ

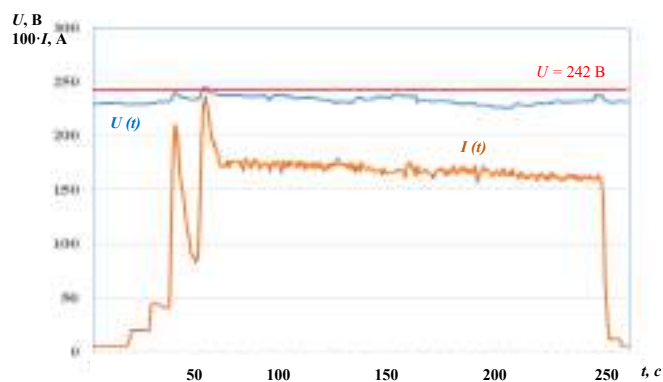


Рис. 5 – Осциллограммы тока и напряжения при питании от РЭС и включении двух источников МРГ в точке ее подключения

Исследования сценариев работы при изменении напряжения на ТП 0,4 кВ показали, что оно на входе инвертора зависит от напряжения питающей сети. Поэтому его изменение на ТП 0,4 кВ оказывает влияние на сеть в целом и не воздействует на величину выдаваемой инвертором мощности до того момента, пока не снизится до минимального рабочего. При отсутствии напряжения на входе инвертор не может генерировать мощность в «Сеть». Следовательно, использование данного типа инверторов не позволяет реализовать автономный (островной) режим работы ВиЭС.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен лабораторный стенд, представляющий собой модель ВиЭС с источниками МРГ. Коэффициент масштабируемости  $k_M = 100$ .

На основании теоретических расчетов и физической модуляции установлено, что расхождения между расчетными и экспериментальными значениями тока и напряжения не превышают 10 %, что свидетельствует о корректной работе лабораторного стенда.

Проведенные исследования выявили следующие особенности, которые стоит учитывать при проектировании ВиЭС:

1. При пуске инверторов в режим выдачи в «Сеть» наблюдаются кратковременные изменения тока, величиной от 10 до 70 % его установившегося режима. Величина данного возмущения зависит от мощности и внутренних настроек преобразователя, в частности от показателя генерируемой мощности, который задается в процентах и связан со степенью заряда аккумуляторных батарей.
4. Показатели качества электроэнергии находятся в пределах, установленных ГОСТ 32144-2013, за исключением режима питания нагрузки от РЭС и источников МРГ. Для данного случая зафиксировано отклонение напряжения от номинального 11,4 %.

#### Список литературы

Этот аспект стоит учитывать при настройке релейной защиты и автоматики для предотвращения ложных срабатываний.

2. В установившемся режиме при работе инверторов наблюдаются незначительные колебания тока (до 15 %).
3. Применяемый в стенде тип инверторов жестко привязан к питающему напряжению, и выдача в «Сеть» от источников МРГ в изолированном режиме невозможна.

- [1] План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы. URL: [http://nti.one/markets/docs/DK\\_energynet.pdf](http://nti.one/markets/docs/DK_energynet.pdf).
- [2] Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. № 5(124). С. 131–142.
- [3] Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1976. 60 с.
- [4] Расширенное описание АКПП АКЭ-824. URL: <https://prist.ru/produces/pdf/ake-823,ake-824.pdf>.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ АСПЕКТОВ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Галимова Л.К., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.  
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»  
Казань, Россия  
kandelovna-leisan@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Повышение конкурентоспособности становится одним из ключевых проблем экономической политики правительств разных стран. Успех политики увеличения конкурентоспособности государственной экономики во многом находится в зависимости от стадии развития экономики.

**Материалы и методы:** Использовались концепция конкурентоспособности Всемирного экономического форума, оценка качества жизни стран в журнале International Living, индекс процветания в институте Legatum Institute.

**Результаты:** Ориентиры увеличения конкурентоспособности экономики имеют все шансы быть достигнутыми при соблюдении условий макроэкономической устойчивости, качества национальных институтов.

**Выводы:** Сделано исследование методов установления конкурентоспособности национальных экономик. Аргументирована потребность определения конкурентоспособности на основе учета общественных условий. Установлены современные требования и условия развития конкурентоспособности.

**Ключевые слова:** конкурентоспособность страны, эффективность национальных экономик, сравнительное преимущество, конкурентные преимущества.

# DEFINITION OF THE MAIN ASPECTS OF THE COMPETITIVENESS OF THE NATIONAL ECONOMY

L. Galimova, N. Yudina, S. Livshits, T. Dunaeva  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
kandelovna-leisan@mail.ru

## Abstract

**Background:** Increasing competitiveness is becoming one of the key problems of the economic policies of governments of different countries. The success of the policy of increasing the competitiveness of the state economy is largely dependent on the stage of economic development.

**Materials and methods:** The concept of competitiveness of the World Economic Forum, the assessment of the quality of life of countries in the journal International Living, the index of prosperity at the Institute of the Legatum Institute were used.

**Results:** The guidelines for increasing the competitiveness of the economy can be achieved if the conditions of macroeconomic stability, the quality of national institutions are met.

**Conclusions:** A study is made of methods for establishing the competitiveness of national economies. The need to define competitiveness based on the consideration of social conditions is argued. The modern requirements and conditions for the development of competitiveness are established.

**Key words:** the competitiveness of the country, the effectiveness of national economies, comparative advantage, competitive advantages.

В условиях глобализации экономических отношений увеличивается роль концепции конкурентоспособности. Основой классического взгляда, связывающего конкурентоспособность со структурой потерь экономики и с эволюцией ее денежного курса, является способность изготовления продуктов с невысокой себестоимостью по сравнению с другими товарами других стран.

Оценка производительности национальных экономик через призму валютного курса и при помощи структур издержек никак не признается удовлетворительной. Это повергло ученых и правительства государств к потребности в большей степени принимать во внимание компоненты неценовой конкурентной борьбы [1].

М. Портер установил, что должен быть обнаружен новый аспект, выходящий далеко за рамки издержек и базирующийся на концепции инноваций. Его основная концепция состоит в том, что «благополучие страны создается, а не наследуется. Оно не вырастает из природных богатств страны, ее трудового потенциала, процентных ставок или стоимости валюты, как утверждает классическая экономическая теория». Согласно этому суждению, конкурентоспособные преимущества формируют благосостояние [4]. Согласно концепции, поддержание положительных конкурентоспособных сторон в глобальной экономике находится в зависимости от регионального соответствия мотивация и «вещи-знания», с которыми не могут сравниться удаленные конкуренты. Экономика сейчас характеризуется тем, что он называет «кластерами» – географическими концентрациями взаимозависимых фирм, специализированных поставщиков, фирм в связанных отраслях экономики, что соперничают и сотрудничают друг с другом. Портер доказал, что основные компании-экспортеры в ряде разных государств принадлежат к эффективным группам конкурентов в рамках связанных сфер.

В концепции М. Портера дано 3 расширенных пояснения влиянию кластеров на конкурентоспособность:

- 1) повышение конкурентоспособности благодаря открытию доступа с целью увеличения доступа к данным и вознаграждение дополняющей хозяйственной работы;
- 2) повышение инновационного потенциала компании путем наиболее стремительного распространения научно-технических знаний и инноваций;
- 3) стимулирование высоких темпов формирования новых компаний при помощи формирования сотрудниками компании своих компаний посредством отделения (spin-off).

Он использовал понятие государственного «ромба», в котором отмечены определения конкурентоспособного преимущества как концепции, элементы которой взаимно обостряются, результатом которого представляется стремительное увеличение производительности. Этими четырьмя детерминантами являются условия факторов изготовления, связанные отрасли, условия спроса, структура, конкуренция компаний.

Повышение конкурентоспособности становится одним из ключевых проблем экономической политики правительств разных стран. Успех политики увеличения конкурентоспособности государственной экономики находится в зависимости от стадии развития экономики. Подразделение на 3 стадии развития находится в основе концепции конкурентоспособности, предложенной Всемирным экономическим форумом [5]:

1. «Факторная стадия» распространяется на государства с низкой степенью развития, для которых привлечение производственных условий является главным условием макроэкономического роста [2]. Для них стоимость является основным активом в глобальной конкурентоспособности.

2. «Инвестиционная стадия» затрагивает государства со средней прибылью, где увеличение находится в зависимости от вложений и конкурентоспособность достигается при помощи применения мировых технологий во внутреннем производстве.
3. «Инновационная стадия» принадлежит государствам с высокой степенью финансового развития, осуществившим переход от экономики, импортирующей технологические процессы, к экономике, образующей их.

Разработанную Портером практическую реализацию концепции конкурентоспособности осуществляет организация Всемирный экономический форум – неправительственная система, базирующаяся на членстве, содействующая установлению взаимодействия между основными заинтересованными группами сообщества. Определение конкурентоспособности следует из значимости финансового увеличения с целью достижения благосостояния: «Немногие вещи значат для благосостояния граждан страны больше, чем совокупные темпы экономического роста. Для богатых стран положительные темпы роста означают более высокие заработки, прибыли, уровень занятости населения, расширение возможностей для бизнеса. Для бедных стран положительная динамика роста выводит народ из состояния бедности, поскольку его доход растет вместе со средним ВВП» [3].

Американский журнал *International Living* каждый год дает оценку качеству жизни в 194 государствах мира. Специалисты оценивают каждую страну по 100-балльной системе, сравнивая стоимость проживания, качество развлечений, состояние экономики, свободу, состояние здоровья, развитие инфраструктуры, личную безопасность.

По данным 2017 г. пятый год подряд 1-е место занимает Франция – 82 балла из 100. Россия же получила 54 балла, а за 2016 г. – 49 баллов, что говорит об улучшении качества жизни. Ученые исследовательского института Legatum Institute вывели индекс процветания, исследовав 104 страны. Учитывались уровень комфорта для жизни и экономические показатели страны. В 2016 г. Россия занимала 95-е место, а в 2017 г. 101-е. За год потеряла сразу 6 позиций – худшее изменение среди европейских стран.

Ориентиры увеличения конкурентоспособности экономики имеют шансы быть достигнутыми при соблюдении макроэкономической устойчивости, качества национальных институтов, технологических улучшений.

### Список литературы

- [1] Коршунова Г.В. Проблемы формирования конкурентоспособности национальной экономики // *Финансы и кредит*. 2016. № 6. С. 74–78.
- [2] Коршунова Г.В. Критерии анализа конкурентоспособности трансформируемой экономики // *Финансы и кредит*. 2016. № 7. С. 58–60.
- [3] Романова Л.Е. Конкурентное взаимодействие субъектов товарного рынка. Тула: Тул. гос. ун-т, 2014. 222 с.
- [4] Портер М. Международная конкуренция / Пер. с англ.; под ред. В.Д. Щетинина. М.: Междунар. отношения, 2015.
- [5] Blanke J., Paua F., Sala-I-Martin X. The Growth Competitiveness Index, CHAPTER 1.1. Analyzing Key Underpinnings of Sustained Economic Growth.



# КОСВЕННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Гибадуллин Р.Р.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

torianin@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Анализ литературных источников показал, что исторически двигатель внутреннего сгорания со свободным поршнем известен достаточно давно и использовался ограниченно, например в воздушных компрессорах или как генератор газов для последующей работы в турбоустановке. Однако, начиная с 90-х годов XX века, в мире стартовали исследования двигателя со свободным поршнем, в англоязычной литературе известного как Free-Piston Engine, в сочетании с гидравлическим насосом как силового агрегата автомобиля, а затем и в сочетании с линейным генератором электрического тока. Генератор возвратно-поступательного движения, или линейный электрогенератор со свободным поршнем, в англоязычной литературе известный как Free-Piston Generator, является относительно новым видом устройств, вырабатывающих электроэнергию, и представляет интерес как перспективная концепция энергоустановки для гибридного транспорта, а также для передвижных и стационарных электрических энергоустановок.

**Материалы и методы:** В статье описан косвенный метод определения положения подвижного элемента (ПЭ) электрических машин возвратно-поступательного действия (ЭМВПД). Методика реализована на основе данных напряжений обмоток и результатах измерений параметров ЭМВПД.

**Результаты:** В рамках Федеральной целевой программы по теме «Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10–20 кВт для тяжелых условий эксплуатации» разработан и создан испытательный стенд для проведения исследований этих образцов, а также косвенный метод контроля положения подвижного элемента ЭМВПД.

**Выводы:** Разработанный метод определения положения ПЭ ЭМВПД позволяет полностью отказаться от датчика положения. При этом отношение сигнал/шум составило 30,15 дБ, чувствительность  $27^\circ$  эл. на мм, коэффициент корреляции между значениями положения, рассчитанного по разработанной методике, и положения, определенного по данным датчика, равен 0,994, что показывает достаточно высокую эффективность методики.

**Ключевые слова:** машина возвратно-поступательного действия, аппаратно-программный комплекс, бездатчиковый метод.

## INDIRECT METHOD OF CONTROLLING THE POSITION OF THE MOVABLE ELEMENT OF THE ELECTRIC MACHINE OF THE RECIPROCATING ACTION

R. Gibadullin

Kazan State Power Engineering University,

Kazan, Russian Federation

torianin@mail.ru

## Abstract

**Background:** The analysis of literature sources has shown that historically the internal combustion engine with a free piston is known for a long time and was used limited, for example, in air compressors or as a gas generator for further work in a turbine unit. However, since the 90s of the 20th century, the world began researching an engine with a free piston, known in English literature as the “Free-Piston Engine” in combination with a hydraulic pump as a power unit of a car, and then in combination with a linear electric generator current. The reciprocating or linear generator with a free piston, known in the English literature as the “Free-Piston Generator”, is a relatively new type of power generating device and is of interest as a promising concept for a power plant for hybrid transport as well as for mobile and stationary electric power installations.

**Materials and methods:** The article describes the sensorless method of determining the position of a moving element of electric machines of reciprocating action. The method is implemented on the basis of the data of the winding voltages and the results of measurements of the parameters of electric machines of reciprocating action.

**Results:** Within the framework of the Federal Target Program on the development of an experimental sample of a reciprocating 10–20 kW reciprocating electric machine for heavy-duty operation, a test bench has been designed and built for conducting experimental samples of an electric reciprocating machine, an indirect method has been developed and developed control the position of the movable element of the reciprocating electric machine.

**Conclusions:** The developed method for determining the position of the movable element of the reciprocating electric machine allows completely to abandon the position sensor. The signal-to-noise ratio was 30.15 dB, the sensitivity was 27° the correlation coefficient between the position values calculated by the developed method and the position determined from the sensor data is 0.994, which shows a sufficiently high efficiency of the technique.

**Key words:** reciprocating machine, hardware-software system, sensorless method.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Большинство существующих линейных двигателей и генераторов оснащаются датчиками положения, которые позволяют определить только относительное расстояние. Это значит, что ПЭ электрической машины при запуске находится в произвольном положении, а датчик вычисляет его перемещение относительно первоначальной точки. Данное решение не способствует осуществлению эффективного управления такого рода машинами. При этом применение дополнительных датчиков не только приводит к увеличению затрат, но и порой даже невозможно. К примеру, передовые разработчики линейных генераторов зачастую совмещают их с двигателями внутреннего сгорания, что позволяет достигать высоких частот колебаний ПЭ. А это, в свою очередь, влечет за собой повышение рабочих температур элементов машины. В таких условиях контактные датчики работать не смогут. Бесконтактные датчики (лазерный триангуляционный) необходимо наводить непосредственно на ПЭ, причем под определенным углом, что, естественно, при вышеуказанной конструкции невозможно. В этой связи разработка бездатчикового метода определения положения ПЭ такого рода машин является актуальной задачей [1].

Для решения данной задачи нами была разработана методика определения точного положения ПЭ машины в режиме генератора по данным напряжения обмоток.

## II. ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЭМВПД

В отличие от вращающихся электрических машин, форма сигнала напряжения ЭМВПД имеет сложный характер (рис. 1). Это связано с тем, что ПЭ то ускоряется, то замедляется. Соответственно, меняются и амплитуда сигнала, и его период. Рассматривать такого рода сигнал как синусоидальный не представляется возможным [2].

Напряжения, токи, потоки электрических машин переменного тока можно представить как векторы в некоторой системе координат. Выбор системы координат влечет за собой изменение вида соотношений, которые описывают процессы, происходящие в машине [3].

Неподвижная трехфазная система координат имеет три оси, расположенные на плоскости под углом в 120 градусов, пересекающиеся в ее начале. Данная система позволяет отобразить процессы, происходящие в машине, на плоскость при представлении токов, напряжений и потокосцеплений в виде вращающихся векторов (рис. 2).

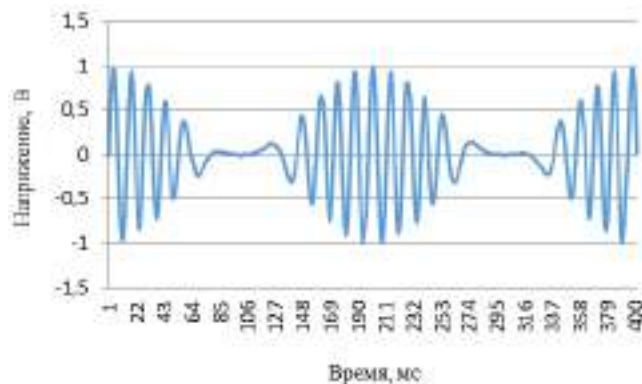


Рис. 1 – Форма сигнала напряжения ЭМВПД

Например, трехфазный ток в обмотках статора двигателя можно представить в виде вектора  $I_S$ , имеющего следующие свойства:

- амплитуда вектора равна амплитуде тока в фазе ( $I_S$ );
- начало вектора совпадает с началом координат;
- вектор вращается на плоскости вокруг начала координат с угловой скоростью  $\omega$ .

На рис. 2:

$$\begin{aligned} I_{SA} &= I_S \cos \lambda; \\ I_{SB} &= I_S \cos(\lambda - 120^\circ); \\ I_{SC} &= I_S \cos(\lambda - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, три связанные скалярные величины фазных токов характеризуются в данной системе координат обобщенным вектором тока. Аналогично в виде обобщенных векторов в данной системе координат могут быть представлены фазные напряжения и потокосцепления электрических машин.

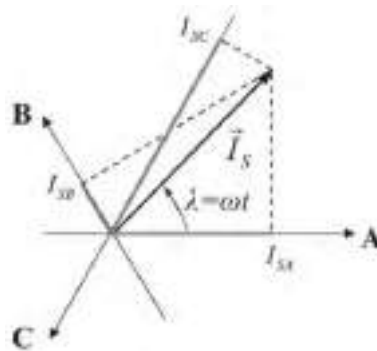


Рис. 2 – Отображение обобщенного вектора тока в неподвижной трехфазной системе координат

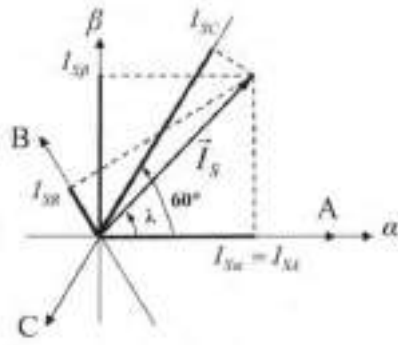


Рис. 3 – Отображение обобщенного вектора тока в неподвижной Декартовой системе координат

Для определения угла  $\lambda$  необходимо перейти с неподвижной трехфазной системы координат на неподвижную Декартову систему координат. Система имеет две перпендикулярные оси  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 3). Удобно выбирать оси так, чтобы одна из них совпадала с одной из трехфазных осей. Начало координат совпадает с началом координат описанной выше трехфазной системы.

Переход из трехфазной системы в Декартову (двухфазную) часто называют переходом от реальной трехфазной машины к абстрактной, обобщенной двухфазной [1].

Получим формулы перехода из трехфазной системы в Декартову. В зарубежной литературе этот переход называют преобразованием Кларка:

$$\begin{cases} -I_{SC} = I_S \cos(60^\circ - \lambda) = I_S \left( \frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right); \\ I_{SB} = I_S \cos(120^\circ - \lambda) = I_S \left( -\frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right). \end{cases} \quad (2)$$

Выразив из суммы этих уравнений  $I_S$ , получим:

$$I_S = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3} \sin \lambda}. \quad (3)$$

Кроме того, исходя из рис. 3:

$$I_{S\beta} = I_S \sin \lambda. \quad (4)$$

Отсюда следует:

$$I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

В итоге формулы преобразований координат при переходе из трехфазной системы в двухфазную выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} I_{S\alpha} = I_{SA} \\ I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (6)$$

### III. КОСВЕННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

После определения проекций обобщенного вектора на оси  $\alpha$  и  $\beta$  ( $I_{S\alpha}$  и  $I_{S\beta}$ ) можно определить угол  $\lambda$  между обобщенным вектором и осью  $\alpha$ :

$$\lambda = \arctg \frac{I_{S\beta}}{I_{S\alpha}}. \quad (7)$$

При проведении данной операции стоит учесть то, что угол будет определяться в пределах  $90^\circ$  с соответствующим знаком в зависимости от четверти. Следовательно, необходимо преобразовать полученное значение угла для I–III четвертей (если обобщенный вектор вращается по часовой стрелке) [2].

Аппаратно-программный комплекс (АПК), применяемый на разработанном и созданном нами испытательном стенде, позволяет проводить измерения напряжений обмоток ЭМВПД с высокой точностью и, что не менее важно, частотой. Полученные данные можно использовать как координаты обобщенного вектора, находящегося в неподвижной трехфазной системе координат. Далее по описанному способу определяется значение угла  $\lambda$  [3].

Приращение (уменьшение) угла  $\lambda$  соответствует изменению положения ПЭ, значение которого зависит от конкретного исполнения ЭМВПД.

Рассмотрим одну из точек рис. 1 (номер измерения – 151). В данной точке:  $U_A = -1,425$ ;  $U_B = 1,154$ ;  $U_C = -0,275$ . Указанные значения принимаются в качестве координат обобщенного вектора  $U_S$ , находящегося в неподвижной трехфазной системе координат. Для перехода на неподвижную Декартову систему координат воспользуемся соотношениями (6):

$$\begin{aligned} U_{S\alpha} &= U_A = -1,425 \text{ В}; \\ U_{S\beta} &= \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3}} = \frac{1,154 + 0,275}{\sqrt{3}} = 0,825 \text{ В}, \end{aligned}$$

где  $U_{S\alpha}$  и  $U_{S\beta}$  – координаты обобщенного вектора  $U_S$  соответственно на осях  $\alpha$  и  $\beta$  неподвижной Декартовой системы координат.

Далее по формуле (7) вычисляем угол  $\lambda$ :

$$\lambda = \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} = -\arctg \frac{0,825}{1,425} = -30,069^\circ.$$

Угол определен, но для того чтобы измерительная система «понимала», на сколько сдвинулся обобщенный вектор, необходимо преобразовать полученное значение так, чтобы при достижении магнитом крайнего положения паза угол  $\lambda$  был равен  $360^\circ$ . Для этого воспользуемся следующим алгоритмом:

- если  $U_{S\alpha} > 0$  и  $U_{S\beta} > 0$ , то

$$\lambda = \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (8)$$

- если  $U_{S\alpha} < 0$  и  $U_{S\beta} > 0$ , то

$$\lambda = 180 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (9)$$

- если  $U_{S\alpha} < 0$  и  $U_{S\beta} < 0$ , то

$$\lambda = 180 + \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (10)$$

- если  $U_{S\alpha} > 0$  и  $U_{S\beta} < 0$ , то

$$\lambda = 360 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|. \quad (11)$$

Таким образом, для нашего случая ( $U_{S\alpha} = -1,425$ ;  $U_{S\beta} = 0,825$ ) необходимо воспользоваться формулой (9):

$$\lambda = 180 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right| = 180 - 30,069 = 149,931^\circ.$$

Применение вышеописанного способа позволяет достаточно точно контролировать перемещение ПЭ.

Запишем универсальную формулу, позволяющую определить расстояние  $d_{об}$ , пройденное ПЭ за один оборот обобщенного вектора  $U_S$ , мм:

$$d_{об} = \left[ \frac{l_{тр}}{K_{об}} (360 - \lambda) \right] / 360, \quad (12)$$

где  $l_{тр}$  – длина рабочего хода ПЭ;  $K_{об}$  – количество оборотов обобщенного вектора  $U_S$  на полную длину  $l_{тр}$  рабочего хода ПЭ;

$K_{об}$  соответствует количеству оборотов вектора  $U_S$  до его смены направления вращения (при смене направления движения ПЭ направление вращения обобщенного вектора тоже меняется). В нашем случае  $K_{об} = 9$ .

Далее переведем информацию о новом обороте вектора  $U_S$  в двоичный код следующим образом: если значение угла  $\lambda$  в следующей точке больше чем в текущей точке на  $100^\circ$ , то 1, в противном случае 0.

После программа суммирует количество единиц от точки начала отсчета до текущей. Таким образом, мы реализовали своеобразный счетчик оборотов обобщенного вектора. Теперь необходимо ввести ограничение на максимальное количество оборотов вектора  $U_S$  так, чтобы оно соответствовало длине рабочего хода ПЭ (соответствовало  $K_{об}$ ): если количество оборотов вектора  $U_S$  до текущей точки больше  $K_{об}$ , то остаток деления

количества оборотов вектора  $U_S$  до текущей точки на  $K_{об}$ , в противном случае – количество оборотов вектора  $U_S$  до текущей точки.

Поскольку количество точек, при которых угол сбрасывается (точка начала нового оборота) на единицу меньше чем  $K_{об}$ , то реализуем следующий алгоритм: если результат предыдущего условия равен 9, то 0, в противном случае – результат предыдущего условия.

Таким образом, мы реализовали счетчик оборотов вектора  $U_S$ , который автоматически определяет момент смены направления движения ПЭ.

Для определения текущего положения  $d$  ПЭ предлагается следующее условие: если количество оборотов вектора  $U_S$  до текущей точки меньше 1, то  $d_{об}$ , в противном случае имеем, мм:

$$d = K_{от} \frac{l_{тр}}{K_{об}} + d_{об}, \quad (13)$$

где  $K_{от}$  – количество оборотов вектора  $U_S$  до текущей точки.

При применении вышеописанной методики точность определения положения зависит только от точности нахождения угла  $\lambda$ . К примеру, если точность определения угла составит  $2^\circ$ , то положение можно вычислить с точностью 0,074 мм (при  $l_{тр} = 120$  мм). Для того чтобы добиться такого результата, достаточно измерить напряжение на статорной обмотке 1620 раз за рабочий ход, что более чем достижимо на АПК, за счет применения высокоскоростного контроллера NI CompactRIO 9066.

### Список литературы

- [1] Gibadullin R.R. Assessment, Calculation And Choice Of Design Data For Reversible Reciprocating Electric Machine / A.M. Kopylov, I.V. Ivshin, A.R. Safin, R.Sh. Misbakhov, R.R. Gibadullin // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 12. С. 31449–31462.
- [2] Гибадуллин Р.Р. и др. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно-поступательного действия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 105–112.
- [3] Гибадуллин Р.Р. и др. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9–10. С. 102–108.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ РОССИИ И МИРА

Гильманова А.Р.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
gilmanovaaliya@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Неотъемлемой частью энергосбережения является использование возобновляемых источников энергии. Их применение, в отличие от традиционных источников энергии, более экологично и экономично. В России, по сравнению с развитыми странами мира, использование нетрадиционных источников энергии находится на раннем этапе становления. Таким образом, необходимо выяснить соотношение между объемом применения в России и мире возобновляемых источников энергии, таких как энергии ветра, солнца, биоэнергетика и геотермальная энергия.

**Материалы и методы:** При создании доклада и диаграммы, содержащейся в нем, применялось программное обеспечение Microsoft Office.

**Результаты:** Определено соотношение между объемами использования в мире и в России нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, построена диаграмма.

**Выводы:** Доля возобновляемых источников энергии в общей выработке электроэнергии в России очень мала, что требует изменений вслед за опытом всех развитых стран мира.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, ветровая энергетика, солнечная энергетика, биоэнергетика, геотермальная энергетика.

# USE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY: COMPARATIVE EXPERIENCE OF RUSSIA AND THE WORLD

A. Gilmanova  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
gilmanovaaliya@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The use of renewable energy sources is an integral part of energy saving. Their use, unlike traditional energy sources, is more ecological and economical. In Russia, in comparison with the developed countries of the world, the use of non-traditional energy sources is at an early stage. Thus, it is necessary to clarify the relationship between the use of renewable energy sources in Russia and in the world, such as wind energy, solar energy, bioenergy and geothermal energy.

**Materials and methods:** The Microsoft Office software was used to create the report and the diagram contained in it.

**Results:** The ratio between the use of non-traditional and renewable energy sources in the world and in Russia is determined, and a diagram is constructed.

**Conclusions:** The share of renewable energy in total electricity generation in Russia is very small, which requires changes following the experience of all developed countries of the world.

**Key words:** renewable energy sources, wind energy, solar energy, bioenergy, geothermal energy.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача энергосбережения – сохранение природных ресурсов. Это не только рациональное расходование энергетических ресурсов, но и привлечение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для покрытия потребностей народного хозяйства в электроэнергии. С каждым годом углеводородных источников энергии становится все меньше, запасы их в недрах земли иссякают. В то же время мы все больше убеждаемся в том, что использование топливных ресурсов для получения энергии вредит экологии, причем в масштабе всей планеты. Впоследствии придется вкладывать средства для того, чтобы хотя бы

как-то компенсировать экологический вред, нанесенный использованием органического топлива в энергетике. Поэтому в настоящее время все развитые страны оценили перспективы применения его альтернативы – возобновляемых источников энергии, так как они более экологичны и экономичны, ведь, как известно, энергетика, экономика и экология неразрывно связаны.

## II. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Основными источниками возобновляемой энергии являются энергии ветра, солнца, биоэнергетика и геотермальная.

### III. ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

Энергия ветра широко используется как источник «чистой» энергии в большом количестве стран мира и развивается усиленными темпами. Например, в Дании процент выработки электроэнергии ветроустановками доходит до 42 %, в Португалии до 27 % от всей вырабатываемой электроэнергии страны, и далее по убывающей [9]. В России же использование ветровой энергии столь широко не распространено, хотя энергетический потенциал позволяет (в теории) вырабатывать до 30 % всей электроэнергии страны силами ветроустановок [5].

### IV. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

Использование энергии солнца так же распространено, как и ветра, особенно в развитых странах мира. По установленной мощности лидирует Евросоюз (в Германии 31 % электроэнергии вырабатывается силами солнечных электростанций, в Италии – 16 %), не сильно отстает и Китай с его 8 % [2]. В России положение куда более плачевное. Электроэнергия, вырабатываемая с помощью солнца, от общего объема выработанной электроэнергии занимает лишь тысячные доли процента [3].

### V. БИОЭНЕРГЕТИКА

Биоэнергетика популярна во многих странах мира, но все же не в той мере, что солнечная и ветровая. 35 ГВт электроэнергии в мире вырабатывается с помощью биомасс, из всех государств лидирует в этом направлении США – 7 ГВт приходится на эту страну [6]. Сравнивать такой объем, произведенный этим способом электроэнергии, с российскими вполне возможно и даже нужно, так как общий потенциал биомассы в РФ был оценен в 15–20 тыс. МВт, а это 15–20 ГВт [1].

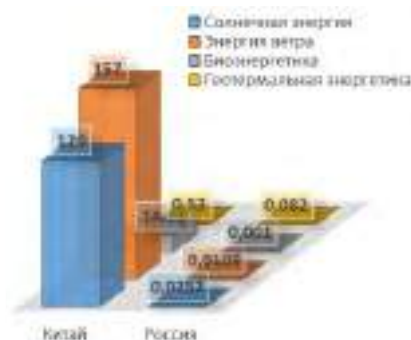
### VI. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Потенциальная мощность геотермальных установок в мире уступает большинству установок, использующих другие возобновляемые источники энергии. Лидером в этом направлении является США, там 3 ГВт вырабатывается с помощью энергии недр земли. Следующие – Филиппины (2 ГВт). В России такой источник энергии используется мало (0,082 ГВт), преимущественно там, где это территориально обоснованно [8].

### VII. СРАВНЕНИЕ «РОССИЯ – КИТАЙ»

Китай – государство, наиболее успешно развивающее в настоящее время возобновляемую энергетику. Огромные суммы инвестируются в ВИЭ этого государства. На Китай стоит равняться. Наглядно представить разницу в выработке электроэнергии с помощью ВИЭ в России и мире (образец – Китай) поможет диаграмма (рисунок). Можно увидеть, что по выработке электроэнергии с помощью ВИЭ в ГВт российская возобновляемая энергетика находится лишь в зарождающемся состоянии.

Это и неудивительно, так как в КНР установленная мощность, получаемая путем использования ВИЭ, превышает всю установленную мощность электроэнергетики России (630 ГВт против 236 ГВт) [10].



Использование возобновляемых источников энергии в сравнении (Россия – Китай)

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии очень мала – примерно 1 % [7]. К 2035 г. планируется повышение этого значения в 20 раз, преимущественно за счет ввода в действие новых генерирующих мощностей на основе ВИЭ и развития научно-технической базы, а также применения современных технологий [4]. Но, разумеется, это все произойдет только при условии экономической эффективности использования данных возобновляемых источников энергии.

### Список литературы

- [1] Альтернативная энергетика «Биоэнергетика в России» URL: <https://alternativenergy.ru/bioenergetika/608-bioenergetika-v-rossii.html>.
- [2] Рютер Г., Гурков А. Мировая солнечная энергетика: переломный год. Deutsche Welle.
- [3] Никитин Д. РБК «Трудный путь к солнцу: согреть ли Россию солнечная энергетика», 2013. URL: <https://www.rbc.ru/economics/17/06/2013/57040a8a9a7947fcbd44a26c>.
- [4] Проект энергетической политики Российской Федерации до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации (ред. от 1 февраля 2017 г.).
- [5] Энергетический портал. Вопросы производства, сохранения и переработки энергии. URL: <http://www.energo-info.ru/>
- [6] Urban F, Mitchell T. Climate change, disasters and electricity generation Archived 2012-09-20 at the Wayback Machine. London: Overseas Development Institute and Institute of Development Studies.
- [7] Greenpeace «Возобновляемые источники энергии». URL: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/nuclear/accidents/chemobyl/25yrs/renewable-energy/>
- [8] Holm Alison. Geothermal Energy: International Market Update, Geothermal Energy Association, cc. 7.
- [9] REN21: Renewables Global Status Report 2015 URL: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf).
- [10] Renewable power wastage declined during Jan-Sept: NEA.
- [11] URL: <https://www.reuters.com/article/us-china-renewables-waste/renewable-power-wastage-declined-during-jan-sept-nea-idUSKBN1D14DV>.

# РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА МИКРОМАШИНАХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И ВИЭ

Демин Ю.И., Скоморохов А.А., Чернокнижников В.Д., Шагимарданов П.Д.  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»  
Ставрополь, Россия  
iudemin@ncfu.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Развитие современных электрических сетей характеризуется, в первую очередь, их интеграцией с элементами малой распределенной генерации (MRG) с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) (в первую очередь, солнечной энергетикой) и силовых высоковольтных бесконтактных коммутирующих устройств (БКУ). Сочетание названных факторов, наряду с цифровыми системами управления, предполагает переход к активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления: Smart Grid и далее к подстанциям нового поколения в сети – iSAS. В связи с этим становятся актуальными разработка и исследование всех составляющих таких сетей с целью повышения их технико-экономических показателей. Одним из путей решения названных проблем являются разработка и исследование электродинамических моделей на микромашинах (ЭДМ), ключевую роль в которых занимают силовые и электронные устройства, управляемые микропроцессорами и (или) компьютерами.

**Материалы и методы:** Рассмотрены электронные устройства, моделирующие основные элементы управления и регулирования ЭДМ с MRG и ВИЭ: системы возбуждения и АРВ, моментные характеристики турбин генераторов (газовые турбины, дизели, ветродвигатели), преобразователи DC/AC для ВИЭ, AC/AC либо AC/DC/AC для источника переменной частоты ветрогенератора, системы управления моделью БКУ и т. п.

**Результаты:** Определена структура основных электронных устройств управления и регулирования ЭДМ с MRG и ВИЭ. Приведены данные по разрабатываемым на основе современных представлений электронным устройствам: стабилизированным блокам AC/DC, входящим в состав систем возбуждения и питания моделей турбин (двигателей постоянного тока типа СЛ – 360 и СЛ – 661М), трехфазным генераторам (сельсины ДИ – 511) и асинхронным ветромашинам (асинхронные двигатели АОЛ-012-2-AC); инверторам DC/AC (24 – 48 / 220 – 380) для солнечных панелей и асинхронных ветромашин; алгоритму управления БКУ и моделью в целом.

**Выводы:** Для предложенной силовой схемы ЭДМ с MRG и ВИЭ разработана организационная структура, включающая в свой состав электронные устройства, выполняющие функции управления и регулирования силовыми элементами и моделью в целом. Получены технические решения для названных электронных устройств. Разработаны алгоритмы управления ЭДМ с MRG и ВИЭ и электронными устройствами.

**Ключевые слова:** малая распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, электродинамическая модель, электронные устройства для управления и регулирования.

## THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES CONSISTING OF ELECTRODYNAMIC MODEL FOR THE MICROMACHINES OF THE POWER SUPPLY SYSTEM WITH SMALL DISTRIBUTED GENERATION AND RENEWABLE ENERGY

Yu. Demin, A. Skomorohov, V. Chernoknignikov, P. Shagimardanov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education “North-Caucasian Federal University”  
Stavropol, Russian Federation  
iudemin@ncfu.ru

## Abstract

**Background:** The development of modern electric networks is characterized, first of all, by their integration with elements of small distributed generation (MRG) with renewable energy sources (RES) (primarily solar power) and high-voltage contactless switching devices (BCU). The combination of these factors, along with digital control systems, involves the transition to actively adaptive networks with distributed intelligent automation and control system: Smart Grid and further to the substations of the new generation in the network: iSAS. In this regard, the development and research of all components of such networks in order

to improve their technical and economic indicators become relevant. One of the ways to solve these problems is the development and research of electrodynamic models on micro machines (EDM), a key role in which occupy the power and electronic devices controlled by microprocessor and (or) computers.

**Materials and methods:** Electronic devices modeling the main control and regulation elements of EDM with MRG and RES are considered: excitation and ARV systems, torque characteristics of generator turbines (gas turbines, diesel engines, wind turbines), DC/AC converters for RES, AC/AC or AC/DC/AC for a variable frequency source of a wind turbine, control systems of the BKU model, etc.

**Results:** The structure of basic electronic devices control and regulation of EMF with the IWG and renewable energy. The data on the electronic devices developed on the basis of modern views: stabilized AC/DC units included in the excitation and power supply systems of turbine models (DC motors such as SL-360 and SL-661M), three-phase generators (selsyns DI – 511) and asynchronous wind turbines (asynchronous motors AOL-012-2-AC); inverters DC/AC (24 – 48 / 220 – 380) for solar panels and asynchronous wind turbines; control algorithm BKU and the model as a whole.

**Conclusions:** For the proposed power circuit EDM with MRG and RES developed organizational structure, which includes electronic devices that perform the functions of control and regulation of power elements and the model as a whole. Technical solutions for these electronic devices are obtained. Developed control algorithms of EDM with the MRG and renewable energy and electronic devices.

**Key words:** small distributed generation, renewable energy sources, electrodynamic model, electronic devices for control and regulation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К 2018 г. около 70 % генерирующих мощностей российских электростанций исчерпали свой ресурс и вопрос об эффективности небольших энергоисточников становится особо актуальным для многих строящихся и функционирующих объектов. Для энергосистемы в целом эффект более долгосрочный. Ценность МРГ для энергосистемы в простейшем приближении равна маржинальной стоимости мощности в системе с добавкой распределенной генерации и без нее, за вычетом платы за мощность, которую владелец данного объекта может получить за мощность своей установки. Далее возникает экономия, возникающая за счет: возможности отдаления нового сетевого строительства, снижения потерь в сетях и перетоков мощности, увеличения надежности и т. п. Очевидно, что такой расчет глобальной ценности распределенной генерации требует комплексного подхода [1]. На сегодняшний день единой методологии или инструмента для анализа МРГ с ВИЭ в России нет. Таким образом, можно лишь грубо оценить возможные последствия от применения МРГ [2]. Несмотря на имеющиеся имитационные модели названных систем на основе известных инструментов [3, 4], остаются актуальными разработки иных инструментов. К ним можно отнести ЭДМ, ключевую роль в которых занимают современные электронные устройства управления и регулирования, позволяющие наглядно и с достаточно высокой точностью (при применении теории подобия [5]) проводить исследования процессов в системах с МРГ.

## II. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МРГ И ВИЭ

Принципиальная схема односекционной системы электроснабжения с МРГ и ВИЭ, помимо известных нагрузок и питающей системы, могут содержать такие элементы, как ко- и тригенераторы с газопоршневыми турбинами, ветрогенераторы с различными типами ветродвигателей, микро- и мини-ГЭС, солнечные панели с преобразователями DC/AC и т. п. [1, 2].

## III. СТРУКТУРА ЭДМ НА МИКРОМАШИНАХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МРГ И ВИЭ

Структура разрабатываемой ЭДМ на микромашинах системы электроснабжения с МРГ и ВИЭ состоит из двух блоков: силовой части и электронных устройств, осуществляющих управление моделью и регулирование ее элементов (рис. 1). Электронные устройства ЭДМ включают в себя:

- 1) блок питания, осуществляющий возбуждение синхронных машин (АРВ) и питание (возбуждение) машин постоянного тока;
- 2) преобразователи постоянного тока в переменный (инверторы) и переменного тока с нестабильной частотой от асинхронного (синхронного) ветродвигателя в ток стандартной частоты (возможно с промежуточным звеном постоянного тока);
- 3) систему управления двигателями постоянного тока, имитирующими различные виды турбин, АРС, механизмы нагрузки;
- 4) контроллеры зарядки аккумуляторов;
- 5) системы управления ЭДМ, БКУ, имитациями аварийных ситуаций, релейной защиты и автоматики, отбором тепловой энергии.

Из блоков 1–5 предполагается смоделировать устройство и исполнять команды управления и регулирования с помощью АЦП/ЦАП и программной среды LabVIEW (рис. 1) [6].

Состав силовой части следующий:

- синхронные генераторы, моделируемые двумя сельсинами типа ДИ511;
- двигатели постоянного тока СЛ-365 и СЛ-661М;
- трансформаторы и ЛАТР;
- асинхронные двигатели типа AOL-012-2-С;
- солнечная панель с отбором электрической и тепловой энергии.



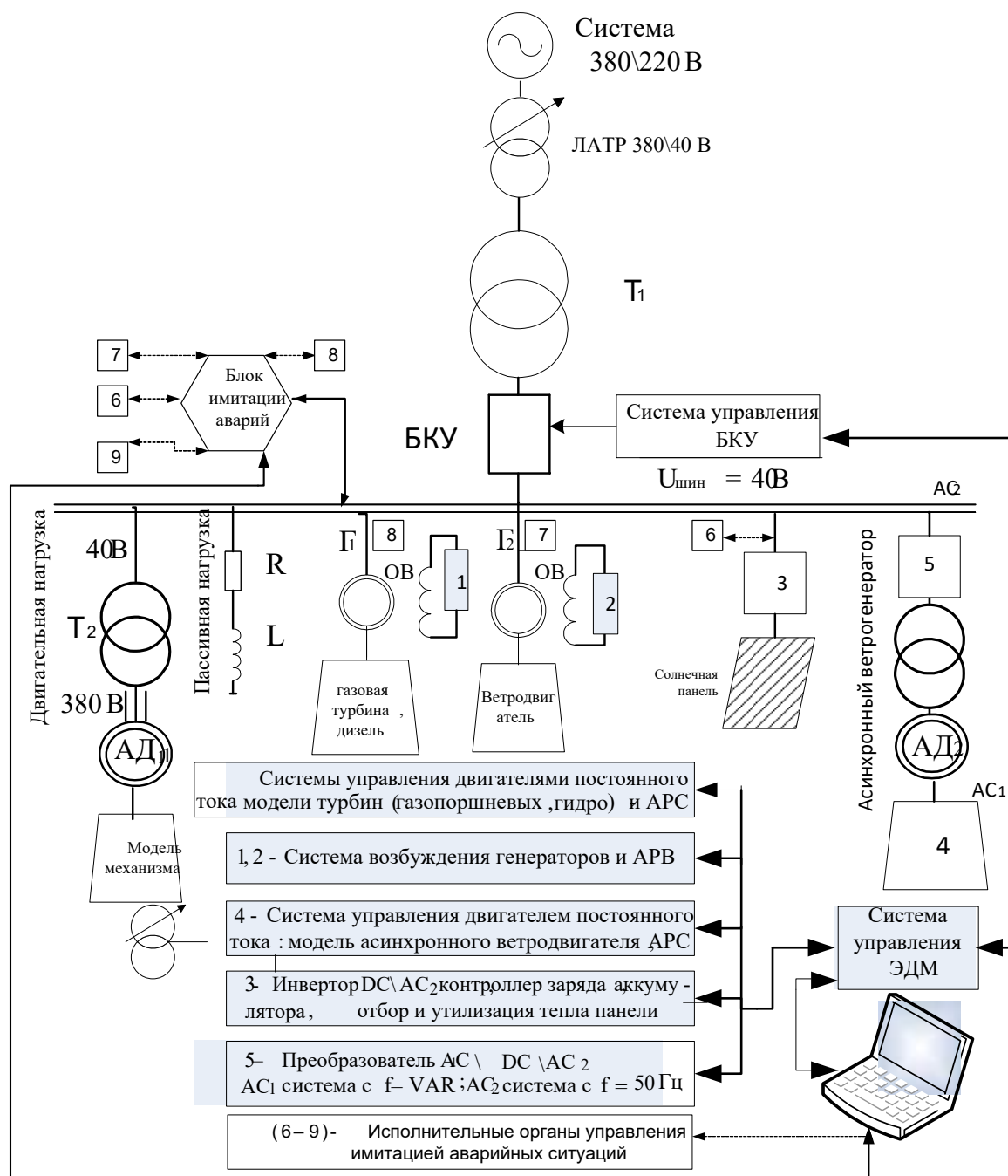


Рис. 1 – Структурная схема ЭДМ с МРГ и ВИЭ:  $G_1$  и  $G_2$  – синхронные генераторы;  $OB$  – обмотки возбуждения генераторов;  $AD_1$  и  $AD_2$  – асинхронные двигатели;  $T_1$  и  $T_2$  – трансформаторы

### III. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ЭДМ НА МИКРОМАШИНАХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МРГ И ВИЭ

В качестве основы разрабатываемых электронных блоков 1 и 2 были выбраны современные импульсные источники питания, являющиеся инверторной системой [7, 8]. В таких источниках переменное входное напряжение сначала выпрямляется. Полученное постоянное напряжение преобразуется в прямоугольные импульсы повышенной частоты и определённой скважности, подаваемые на трансформатор (в случае с гальванической развязкой от питающей сети) или напрямую на выходной фильтр нижних частот (без гальванической развязки). В этих блоках могут применяться малогабаритные трансформаторы.

Это объясняется тем, что с ростом частоты повышается эффективность его работы и уменьшаются требования к габаритам (сечению) сердечника (рис. 2). В большинстве случаев такой сердечник может быть выполнен из ферромагнитных материалов. В импульсных источниках стабилизация напряжения обеспечивается посредством отрицательной обратной связи. Обратная связь позволяет поддерживать выходное напряжение на относительно постоянном уровне вне зависимости от колебаний входного напряжения и величины нагрузки (рис. 2). Основу корректора коэффициента мощности (ККМ), функциональная схема которого приведена на рис. 3, составляет повышающий преобразователь [7, 8].



Рис. 2 – Структура электронных блоков питания и преобразователей ЭДМ

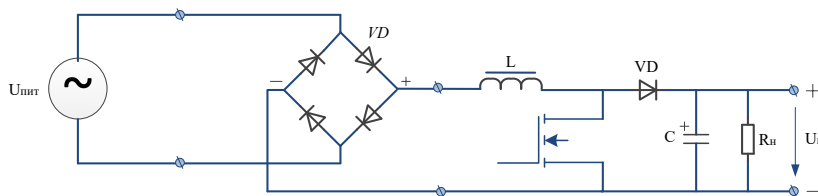


Рис. 3 – Структура ККМ с выпрямительным мостом

ККМ обеспечивает потребление тока по форме, совпадающего с питающим напряжением, и позволяет наиболее эффективно использовать сети питания, так как мощность, рассеиваемая в питающих линиях, в этом режиме минимальна. Узел защиты ККМ обеспечивает отключение корректора при выходе входного или выходного напряжения за пределы допустимых значений.

Вторичный преобразователь напряжения (ВПН) должен обеспечивать преобразование высокого постоянного входного напряжения в низкое переменное (импульсное) напряжение. При работе совместно с выходным выпрямителем и фильтром вторичный преобразователь напряжения формирует на выходе блока постоянное напряжение необходимой величины: для двигателей постоянного тока  $U_{\text{вых}} = 110 \text{ В}$  с максимальным током до 2 А (рис. 2). Кроме того, вторичный преобразователь напряжения обеспечивает гальваническую развязку входных и выходных цепей. Обратная связь ВПН служит для передачи схеме управления ВПН информации о выходном напряжении и потребляемом токе.

Алгоритмы моделирования традиционных турбин: тепло-, гидро-, дизельные, ветро-, реализуемые в ЭДМ, приведены в [9, 10]. Электронный (цифровой) синтез систем АРВ – СД генераторов и АРС турбин осуществляется в соответствии с алгоритмами, приведенными в [5, 9, 11]. Моменты сопротивления механизмов с постоянными и квадратичными зависимостями взяты из [12]. Мельницы имитируются в соответствии с экспериментальными характеристиками, описанными в [13].

Алгоритм управления БКУ предполагает ручной и автоматический режимы. В первом случае осуществляется типовая синхронизация (включение) шин 40 В к сети [14]. Автоматический режим предполагает подключение шин при недостатке суммарной генерируемой мощности на шинах (автономная работа от системы – избыток генерируемой мощности). Система управления ЭДМ ориентирована на выполнение следующих режимов:

- выбор и сборка силовой схемы ЭДМ с подключением всех необходимых электронных (цифровых) блоков;
- выбор и подключение измерительных устройств;
- имитация средств релейной защиты и автоматики;

- реализация алгоритмов контроллера зарядки аккумуляторов солнечной панели (асинхронного ветрогенератора) и управления отбором тепловой энергии.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Определена структура основных электронных устройств управления и регулирования ЭДМ с МРГ и ВИЭ. Приведены данные по разрабатываемым на основе современных представлений электронным устройствам: стабилизированным блокам AC/DC, входящим в состав систем возбуждения и питания моделей турбин, трехфазных генераторов и асинхронных ветромашин; инверторам DC/AC (24 – 48/220 – 380) для солнечных панелей и асинхронных ветромашин; алгоритму управления БКУ и моделью в целом.

#### Список литературы

- [1] Ньюшлосс Дж., Ряпин И.Ю. Тенденции развития распределенной генерации. URL: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5371](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5371) (дата обращения: 05.04.17).
- [2] Рыхтер В.О., Зильберштейн О.Б. Тенденции развития рынка оборудования малой генерации // Наукоедение. 2015. Т. 7, № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/31EVN415.pdf>.
- [3] Среда PSCAD/EMTDC. URL: <http://inteco-electro.ru/pscad-studies.html>.
- [4] MatLab. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [5] Веников В.А. Теория подбора и моделирования: учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
- [6] NI. URL: <http://www.ni.com/ru-ru.html>.
- [7] Аверин С.В., Малышев М.А. Сравнение основных структур преобразователей постоянного напряжения для коррекции коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2009. № 4. С. 31–36.
- [8] Borodin D.B. et al. Direct Boost Converter with Zero Voltage Transition and PWM Control (ZVT-PWM) // International Scientific-Technical Conference APEIE. 2016. Vol. 10, № 1. 1496 p.
- [9] Черновец А.К. Электрическая часть АЭС (переходные процессы в системах электроснабжения): учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1980.
- [10] Ветрогенераторы турбинного типа. URL: <https://energo.house/veter/vetrovaya-turbina.html>.
- [11] Груздев И.А., Шахаева О.М. Системы автоматического регулирования синхронных генераторов. Л.: ЛПИ, 1978. 78 с.
- [12] Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 135 с.
- [13] Демин Ю. И. Структура имитационной модели функционирования на ПЭВМ системы электроснабжения 6–10 кВ с бесконтактными коммутаторными устройствами // Физ.-мат. моделир. систем: матер. VII Междунар. семинара. Воронеж, 2011. Ч. 2. С. 137–144.
- [14] Важнов А.И. Электрические машины. Л.: Госэнергоиздат, 1968. 768 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕННУЮ ГЕНЕРАЦИЮ

Дубайлова В.В., Мухлынин Н.Д.

ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия  
lera35110@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Переход электроэнергетики России к рыночной модели стимулирует крупных потребителей к покупке электроэнергии (ЭЭ) по ценовым категориям, требующим от них планирования почасового электропотребления на следующие сутки и впоследствии оплату отклонений фактического потребления от планового. Для потребителей, имеющих сложность с коррекцией графика нагрузки, становится выгодным размещать в своей сети генераторные установки с целью снижения величины отклонений фактического потребления от планового. Появляется необходимость создания алгоритмов управления генерацией для минимизации затрат потребителя на энергообеспечение.

**Материалы и методы:** В качестве исследуемого материала был рассмотрен потребитель, покупающий ЭЭ по 5-й ценовой категории, со среднесуточной нагрузкой 2400 кВт, у которого в управлении находится дизель-генераторная установка мощностью 150 кВт. Для управления генерацией применялся механизм модели опережающего управления.

**Результаты:** Описано использование модели опережающего управления с целью снижения затрат потребителя на энергообеспечение. Изучено влияние величины окна прогноза на эффективность работы генераторной установки.

**Выводы:** Управление потребительскими генераторными установками позволяет минимизировать плату за отклонение фактического объема потребления ЭЭ от планового. Рассмотренная методика может быть реализована в системах электроснабжения потребителей, покупающих ЭЭ по 5-й и 6-й ценовым категориям.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, модель опережающего управления, ценовые категории электроэнергии.

## FIELD OF APPLICATION OF THE MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR THE DISTRIBUTED GENERATION CONTROL

V. Dubaylova, N. Mukhlynin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
Yekaterinburg, Russian Federation  
lera35110@gmail.com

## Abstract

**Background:** The transition of electric power industry in Russia to a market model stimulates large consumers to purchase electricity by price categories that require the consumer to plan hourly electricity consumption for the next day and, subsequently, to pay for deviations of actual consumption from the plan. For consumers who have difficulty with the correction of the load schedule, it becomes profitable to place generator in their network in order to reduce the deviation of actual consumption from the planned one. There is a need to create generation control algorithms to minimize consumer costs for energy supply.

**Materials and Methods:** A consumer buying electricity at the 5th price category of electricity with an average daily load of 2,400 kW, who controls diesel generator set with electric power of 150 kW, was considered as research material. To generation control, the mechanism of the model predictive control (MPC) has been used.

**Results:** The application of the MPC with the purpose of reducing the consumer's costs for electricity supply is described. The influence of the forecast window magnitude on the efficiency of the generator operation has been studied.

**Conclusions:** The control of consumers' generator sets allows to minimize costs for deviation the actual amount of electricity consumption from the planned one. The considered technique can be realized in power supply systems for consumers who buy electricity at 5 and 6 price categories of electricity.

**Key words:** distributed generation, model predictive control, price categories of electricity.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетика России последние годы находится в постоянном изменении – от регулируемой модели движется к рыночной. В связи с этим вместо устанавливаемых ранее тарифов на электроэнергию (ЭЭ) для юридических лиц возникли так называемые ценовые категории ЭЭ [1].

В теории 5-я и 6-я ценовые категории дают возможность крупным потребителям минимизировать затраты на покупку ЭЭ. Однако с ростом ценовой категории повышаются предъявляемые к потребителю требования. Потребители, покупающие ЭЭ по 5-й и 6-й ценовым категориям, обязаны предоставлять сбытовой организации почасовой план использования ЭЭ на следующие сутки.

Эти данные необходимы для участия сбытовой организации в торгах на рынке на сутки вперед (РСВ). В случае отклонения фактического электропотребления предприятия от заявленного плана, сбытовая организация автоматически участвует в торгах на балансирующем рынке (БР) от лица потребителя, закупая необходимую ЭЭ в случае перерасхода либо продавая излишки. Участие предприятия на БР, как правило, ему не выгодно, так как цены на нем должны покрывать издержки энергосистемы, связанные с перераспределением ЭЭ в сети [3].

Согласно механизму ценообразования на рынках ЭЭ для потребителей, выбравших 5-ю ценовую категорию, расчет ежемесячных затрат  $C$  на ее приобретение производится по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^n \left( W_i^\Phi p_i + (W_i^\Phi - W_i^{\text{план}}) p_i^{\Delta W} \right) + p_{\text{мес}}^{\Delta W} (W_{\text{мес}}^\Phi - W_{\text{мес}}^{\text{план}}), \quad (1)$$

где  $W_i^\Phi$  – фактическое потребление ЭЭ за час  $i$ ;  $W_i^{\text{план}}$  – планируемое потребление ЭЭ за час  $i$ ;  $p_i$  – стоимость ЭЭ в сети общего пользования на час  $i$ ;  $p_i^{\Delta W}$  – плата за отклонение фактического потребления от планируемого за час  $i$ ;  $n$  – количество часов в месяце;  $W_{\text{мес}}^\Phi$  – фактическое потребление ЭЭ за месяц;  $W_{\text{мес}}^{\text{план}}$  – планируемое потребление ЭЭ за месяц;  $p_{\text{мес}}^{\Delta W}$  – плата за отклонение фактического потребления от планируемого за месяц.

Все цены, указанные в (1), формируются на конкурентных рынках и являются экзогенными для предприятия.

Следовательно, потребитель может снижать затраты на приобретение ЭЭ только за счет изменения фактического и (или) планируемого потребления.

Коммерческий интервал времени, внутри которого определяется величина платы потребителя за отклонение фактического объема потребления ЭЭ от планового, равен одному часу.

Главной целью данного исследования является разработка методики, позволяющей оперативно управлять потребителемскими генераторными установками таким образом, чтобы затраты, связанные с отклонением фактического потребления ЭЭ от планового, были минимальными. В основу рассматриваемой методики положена идея применения модели опережающего управления для снижения величины отклонения на каждом коммерческом интервале.

## II. МОДЕЛЬ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Модель опережающего управления давно и широко известна в области управления генераторными установками [2].

Механизм модели опережающего управления заключается в определении характера изменения формы графика нагрузки на прогнозируемых интервалах времени, называемых горизонтом прогноза, и формировании управляющего воздействия (УВ) на генератор на начало текущего временного интервала с целью минимизации целевой функции  $F$ .

В данной работе предлагается усовершенствованный вариант модели опережающего управления. Особенностью предлагаемой методики является добавление в окно формирования УВ предшествующего интервала для компенсации той части отклонений, которая осталась не скомпенсированной на предыдущем диспетчерском интервале времени.

Формирование УВ на генератор происходит на интервале времени, называемом диспетчерским, или горизонтом управления. Для осуществления модели опережающего управления диспетчерский интервал должен быть меньше или равен коммерческому интервалу.

Таким образом, целевая функция  $F$ , состоящая из суммы квадратов отклонений фактического (прогнозируемого) значения объемов потребления от его планового значения, может быть записана через средние значения мощности на каждом диспетчерском интервале согласно (2):

$$F = (P_{-1}^\Phi - P_{-1}^{\text{план}})^2 + \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{пр}} - P_i^{\text{план}})^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $P_{-1}^\Phi$ ,  $P_{-1}^{\text{план}}$  – фактическая и планируемая мощности на предыдущем диспетчерском интервале времени;  $n$  – число диспетчерских интервалов в горизонте прогноза;  $P_i^{\text{пр}}$ ,  $P_i^{\text{план}}$  – прогнозируемая и планируемая мощности на диспетчерском интервале времени  $i$ .

В данной работе за диспетчерский интервал предлагается принять 15-минутный период, т. е. коммерческий часовой интервал разделен на четыре диспетчерских интервала. Это даст возможность изменять режим работы генераторной установки до четырех раз в течение часа.

Величина отклонений на часовом или месячном интервале зависит от величины диспетчерского интервала управления. Снижение интервала управления генерирующей установкой приведет к уменьшению величины отклонения на конец рассматриваемого коммерческого интервала времени. Однако уменьшение величины диспетчерского интервала может привести к перерасходу топлива.

Поиск оптимальной величины горизонта управления с точки зрения минимизации двух переменных – расхода топлива и величины отклонений – послужит темой для дальнейших исследований.

Механизм модели опережающего управления представлен на рис. 1.

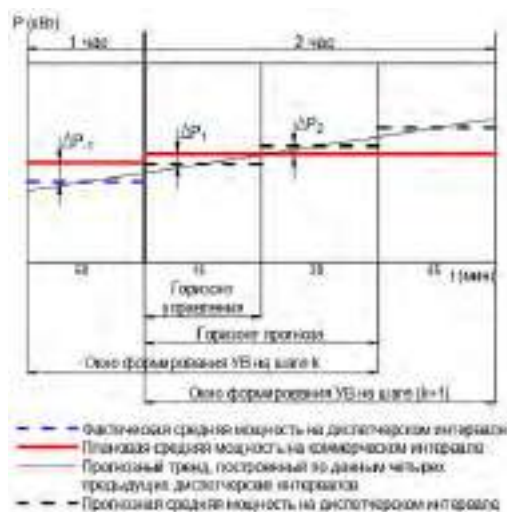


Рис. 1 – Механизм модели опережающего управления

Представленная методика управления установками РГ для регулирования почасового потребления ЭЭ состоит из следующих этапов [5]:

1. По измеренным данным предшествующего интервала времени выполняется прогнозирование потребляемой ЭЭ на некоторый конечный отрезок времени, называемый горизонтом прогноза.
2. По полученным прогнозным значениям электропотребления оценивается величина УВ.
3. Выполняется оптимизация УВ с учётом всего комплекса ограничений, наложенных на управляющие и регулируемые переменные. Находится оптимальное управление генератором.
4. На временном отрезке, соответствующем горизонту управления, реализуется найденное оптимальное УВ.
5. По окончании диспетчерского интервала осуществляется измерение фактического состояния. Измеренные величины принимаются за новые начальные условия для прогнозирования.
6. Окно формирования УВ сдвигается на шаг вперед, и повторяются пп. 1–5.

Результатом одного прохождения представленного цикла является выдача УВ на увеличение или уменьшение мощности генератора по сравнению с предшествующим режимом его работы. Повторение процедуры расчета УВ происходит циклически от интервала к интервалу без деления на часовые, суточные или месячные промежутки.

Следует отметить, что величина окна формирования УВ может быть разной в зависимости от количества временных интервалов, составляющих горизонт прогноза. Оценка влияния величины горизонта прогноза на эффективность работы генераторной установки представлена в следующей части данной работы.

### III. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТА ПРОГНОЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для моделирования в качестве тестового объекта выбран потребитель, покупающий ЭЭ по 5-й ценовой категории, среднесуточная нагрузка которого составляет 2400 кВт. На одной шине с нагрузкой потребителя установлена дизель-генераторная установка (ДГУ) мощностью 150 кВт.

Прогнозирование осуществлялось с использованием линейного тренда. К рассмотрению приняты следующие величины горизонта прогноза – 1, 2 и 3 диспетчерских интервала. Горизонты прогноза большей величины существенно увеличивают объем вычислений, необходимых для построения оперативного управления, и в данной работе не рассматриваются. Кроме того, с расширением горизонта прогноза увеличивается средняя нагрузка генератора, что может привести к неэкономичной работе ДГУ.

Дифференцированная по часам расчетного периода нерегулируемая цена на ЭЭ определяется коммерческим оператором по результатам конкурентного отбора заявок для балансирования системы в отношении объема превышения фактического потребления над плановым и планового – над фактическим [1].

В условиях тестового моделирования было принято, что цена превышения фактического потребления над плановым составляет 0,8 руб./кВт·ч, а планового над фактическим для каждого часа расчетного периода составляет 0,3 руб./кВт·ч.

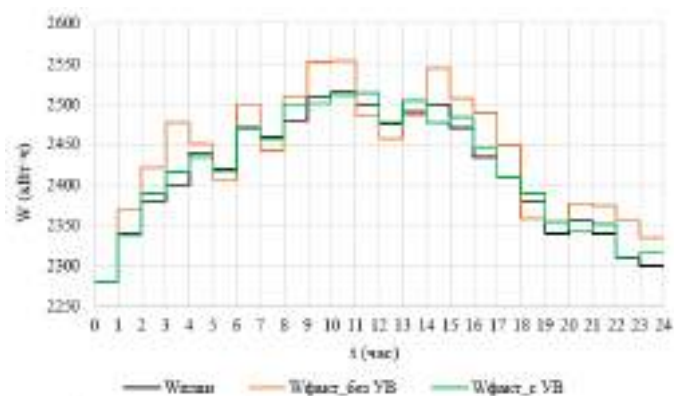


Рис. 2 – Графики планового и фактического почасового потребления ЭЭ

В таблице приведены результаты расчета суммарных затрат потребителя на отклонения фактического потребления от планового при разном количестве диспетчерских интервалов в горизонте прогноза.

Примечательно, что независимо от величины горизонта прогноза экономия от УВ на генерацию составляет более 400 руб. в сутки. По полученным значениям электропотребления видно, что это достигается приближением фактического значения потребления к плановому путем осуществления оперативного управления ДГУ. Наибольший экономический эффект от формирования УВ достигается при горизонте прогноза, сформированном из трех диспетчерских интервалов.

На рис. 2 представлен график планового почасового потребления ЭЭ, а также графики фактического потребления без УВ и при его наличии, сформированного Методика управления генераторными установками для регулирования почасового потребления снижает не только величину почасовых отклонений, но и абсолютную сумму отклонений за расчетный период.

При формировании УВ также учитывались эксплуатационные ограничения на загрузку ДГУ с целью поддержания генератора в зоне экономичной работы [6].

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стоит отметить следующие особенности приведенной оптимизации, выполненной на основе модели опережающего управления [4]:

1. Ее применение позволяет снизить затраты потребителя на энергообеспечение путем снижения величины отклонений фактического потребления от планового на коммерческом интервале времени.
2. Добавление в окно формирования УВ предшествующего интервала позволяет минимизировать ту часть отклонений, которая осталась не скомпенсированной на предыдущем диспетчерском интервале времени.
3. Она позволяет учитывать ограничения, которые накладываются как на управляющие переменные, так и на компоненты вектора состояния. Такое свойство является полезным для поддержания работы ДГУ в рамках оптимального диапазона.
4. Одним из способов уменьшения величины отклонений в рамках коммерческого часа является снижение величины диспетчерского интервала,

СРАВНЕНИЕ СУММАРНЫХ ЗАТРАТ ПОТРЕБИТЕЛЯ НА ОТКЛОНЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ОТ ПЛАНОВОГО  
ПРИ РАЗНОМ КОЛИЧЕСТВЕ ИНТЕРВАЛОВ В ГОРИЗОНТЕ ПРОГНОЗА

Суммарные затраты потребителя на отклонения фактического потребления от планового при разном количестве интервалов в горизонте прогноза	Без УВ на генератор	Прогнозы при наличии УВ на генератор		
		на 1 интервал	на 2 интервала	на 3 интервала
$W_{\text{факт}}$ за сутки, кВт·ч	58533,0	58177,2	58126,2	58091,4
$W_{\text{план}}$ за сутки, кВт·ч	58000,0	58000,0	58000,0	58000,0
Сумма отклонений за сутки, кВт·ч	533,0	177,2	126,2	91,4
Плата за суточные отклонения, руб	106,6	35,4	25,2	18,3
Плата за почасовые отклонения, руб	525,4	190,3	145,2	139,9
Суммарные затраты за сутки, руб	632,0	225,7	170,5	158,2
Средняя загрузка генератора, %	55,0	57,5	57,8	58,0
<b>Экономия при наличии УВ, руб</b>		<b>406,3</b>	<b>461,5</b>	<b>473,8</b>
<b>Экономия при наличии УВ, %</b>		<b>64,3</b>	<b>73,0</b>	<b>75,0</b>

что приведет к уменьшению средней загрузки ДГУ. Другим способом уменьшения отклонений может стать изменение прогнозного полинома.

В случае применения модели опережающего управления можно ожидать, что дополнительные затраты потребителя, покупающего ЭЭ по пятой ценовой категории, составят около 58 тыс. руб в год вместо 230 тыс. руб в год.

Таким образом, в рассматриваемых условиях ожидаемый экономический эффект от использования предложенной методики составляет 172 тыс. руб в год.

В ходе выполнения работы установлено, что применение модели опережающего управления позволяет оперативно контролировать распределенной генерацией для повышения эффективности функционирования потребителей в рамках выбранной ценовой категории электроснабжения.

### Список литературы

- [1] О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии. Основные положения и правила функционирования розничных рынков электрической энергии: утв. постановлением Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442.
- [2] Maciejowski J.M., Predictive Control: With Constraints. New York: Prentice Hall, 2002. 342 p.
- [3] Трофимова В.Ш., Липатников А.В. Разработка методики планирования почасового потребления электрической энергии крупным металлургическим предприятием (на примере ОАО «ММК») // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3(47). С. 57–62.
- [4] Веремей Е.И. Введение в задачи управления на основе предсказаний // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: матер. Всерос. науч. конф. М., 2004. С. 98–115.
- [5] Bemporad A., Morari M., Ricker N. L. Model predictive control toolbox 2. The Mathworks, 2005. 246 p.
- [6] Завалишин В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения // Вестник СГТУ. 2010. № 1. С. 128–136.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДСКИХ СТОКОВ

Жданович А.А.<sup>1</sup>, Тимошенко Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, <sup>2</sup>ОАО «Сибирские газовые сети»  
Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>zhdanovich1985@mail.ru, <sup>2</sup>ten.nsk@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Распределенная генерация получила серьезное развитие в последнее десятилетие. И если раньше в РФ область ее применения ограничивалась отдаленными, изолированными районами, то сегодня ввиду роста тарифов на электроэнергию и осложнения экологической обстановки распределенная энергетика развивается и в мегаполисах. На данный момент Правительством РФ принят ряд постановлений, способствующих развитию генерации энергии из нетрадиционных и возобновляемых источников, к которым также относятся сточные воды предприятий. В статье исследуется вопрос о возможности использования различных промышленных стоков г. Новосибирска для установки в них малых ГЭС.

**Материалы и методы:** визуальный осмотр местности, данные департамента природных ресурсов и окружающей среды Новосибирской области об объемах промышленных стоков, теория использования водной энергии.

**Результаты:** Было рассмотрено четыре объекта, проведен первичный гидрологический анализ и расчет энергетических показателей. Рассмотренные стоки имеют технический потенциал от 20 до 200 кВт.

**Выводы:** Практическая значимость исследования состоит в том, что оно дает прекрасную возможность накопления опыта проектирования малых ГЭС на промышленных стоках, формирования определенных рекомендаций по дальнейшему строительству подобных объектов с учетом особенностей источника воды.

**Ключевые слова:** гидроэнергетика, распределенная генерация, промышленные стоки воды.

# INVESTIGATIONS ON POWERENERGY POTENCIAL OF MUNICIPAL INDUSTRIAL WASTEWATERS

A. Zhdanovich<sup>1</sup>, E. Timoshenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, <sup>2</sup>Siberian Gas Networks JSC  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup>zhdanovich1985@mail.ru, <sup>2</sup>ten.nsk@yandex.ru

## Abstract

**Background:** In the last decade, distributed generation has been given a considerable development. Recently, its application area has been limited by remote isolated regions. But now, due to the growth of electricity tariffs and degradation of ecological situation, distributed generation is developing even in megalopolises. At the present time, the Government of the RF has adopted a number of Regulations supporting the establishment and development of the direction of power generation from nontraditional and renewable energy sources, including wastewaters of industrial plants. The paper presents investigations on the possibility of using different industrial wastewaters in Novosibirsk for installation of small hydroelectric plants.

**Materials and Methods:** visual inspection of location, data of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of Novosibirsk Oblast on the volume of industrial wastewaters, theory of the use of water power.

**Results:** Four objects were investigated with the initial hydrologic analysis and calculations of energy characteristics. All of them have the technical potential exceeding 25 kW.

**Conclusions:** Investigation gives an excellent opportunity for accumulation of experience for design and maintenance of small hydro plants, composition of definite recommendations on further construction of similar objects.

**Key words:** hydro power, distributed generation, industrial wastewater.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Гидростанции являются одним из наиболее эффективных источников электрической энергии, что объясняется стабильно высоким КПД, а также близостью первичного

ресурса к месту производства электроэнергии. Кроме того, для выработки электричества на ГЭС используется возобновляемый источник энергии. Перечисленные свойства позволяют говорить о возможности получения дешевой электроэнергии.

На сегодняшний день получила новое развитие малая гидроэнергетика. Малые ГЭС (МГЭС) могут располагаться практически в любых водотоках, не требуют затопления земель и колоссальных вложений, и вырабатывают электроэнергию на стабильно высоком КПД как автономно, так и в составе общей энергосистемы [1]. Эти и другие преимущества делают малые ГЭС самыми эффективными объектами, работающими на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ).

С другой стороны, в условиях постоянного роста тарифа на электроэнергию, особенно для промышленности, становится актуальным вопрос об организации собственной генерации. Социальную основу для таких проектов обеспечивает развивающаяся концепция распределенной генерации энергии (РГЭ).

Инвестиционная привлекательность таких проектов определяется рядом факторов, среди которых поддержка государством таких проектов, упрощение процесса подключения станций к сети и назначение «зеленого» тарифа. Так за последние несколько лет Правительством РФ принят ряд Постановлений, обеспечивающих юридическую и финансовую поддержку малой генерации на ВИЭ (Постановления от 23 января 2015 г. № 47, 23 сентября 2016 г. № 961, от 28 февраля 2017 г. № 240, Распоряжение от 8 января 2009 г. № 1-р).

С 2000-х годов малая гидроэнергетика развивается в двух направлениях: восстановление старых, заброшенных станций на малых реках во всех регионах страны и строительство новых частных станций на различных промышленных водотоках для обеспечения собственных нужд и работы в сеть. Согласно [2] сточные воды также причисляются к ВИЭ. Опыт реализации таких объектов в России незначителен, поэтому, несмотря на небольшую мощность, такие разработки не имеют типового подхода.

Согласно данным [3] за 2017 год объем воды более 700 млн. м<sup>3</sup>/год сбрасывается в поверхностные воды г. Новосибирска, что позволяет говорить о перспективах возможности использования части расхода на получение электрической энергии.

Целью работы является исследование и анализ нескольких технологических и промышленных стоков города Новосибирска с точки зрения их технического энергетического потенциала.

## II. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ВОДОТОКА

Для ясного понимания терминологии в малой гидроэнергетике приведем несколько классификаций МГЭС по основным техническим характеристикам.

В настоящее время для российской малой гидроэнергетики существуют следующие стандарты по мощности:

1. МикроГЭС – от 0,1 до 100 кВт;
2. МиниГЭС – от 100 до 1000 кВт;
3. Малые ГЭС – от 1000 до 25000 кВт.

По величине используемого напора:

1. Высоконапорные – более 60 м;
2. Средненапорные – от 25 до 60 м;
3. Низконапорные – от 3 до 25 м.

## A. Возможные места установки МГЭС

Важнейшим преимуществом МГЭС является тот факт, что установить их можно практически на любом водоеме, где есть перепад высот. Современные установки позволяют вырабатывать электроэнергию даже с минимальной величиной расхода при наличии напора воды от 2-3 метров. Рассмотрим перечень возможных мест установки МГЭС:

1. Естественные водоемы – малые реки и горные ручьи: установка МГЭС позволяет задействовать значительные энергоресурсы малой гидроэнергетики; основные ресурсы малой гидроэнергетики в России сосредоточены на Северном Кавказе, на Дальнем Востоке, на Северо-Западе.
2. Универсальные или ирригационные плотины, судоходные каналы: установка МГЭС позволяет использовать водосброс для генерации.
3. Водосбросы из водохранилищ, шлюзов.
4. Станции водоочистки и водоподготовки: установка МГЭС позволяет проводить генерацию на внутренних контурах станций. При этом вода не теряет своих свойств и может использоваться для коммунального водоснабжения.
5. Линии подачи промышленной воды: установка МГЭС позволяет получать электроэнергию, работая на трубопроводах подачи/циркуляции технической воды на промышленных предприятиях.
6. Технологические водосбросы с промышленных предприятий, ТЭЦ, АЭС и пр.

## B. Гидроэнергетический потенциал стока

Для оценки перспективности водотока производится расчет его потенциала. При изучении гидроэнергетических ресурсов выделяют валовый или теоретический потенциал, технический и экономический.

Валовый гидроэнергетический потенциал – самое общее значение мощности и энергии на рассматриваемом участке без учета технических особенностей оборудования станций, КПД, потерь, экономической целесообразности.

Технический гидроэнергетический потенциал – это та часть валового гидроэнергетического потенциала стока, которая технически может быть использована.

Технический потенциал является величиной переменной, растущей по мере развития технических возможностей использования гидроресурсов. Однако в гидроэнергетике существенные изменения способов производства электроэнергии на ГЭС наблюдаются крайне редко, поэтому оценки технического потенциала достаточно устойчивы во времени.

Размер технического потенциала зависит от величин потерь, часть которых неизбежна и более или менее постоянна, другая (основная) часть зависит от гидрологических, топографических и других условий, которые формируют сток. Верхний предел использования валового потенциала не может превышать 86 %.

В основе гидроэнергетического расчета лежит уравнение Бернулли, которое применительно к расчету энергетического потенциала ГЭС в самом общем случае имеет вид:

$$N = 9,81QH, \quad (1)$$



где  $N$  – потенциал стока, кВт;  $H$  – гидростатический напор водяного столба, м;  $Q$  – расход воды в рассматриваемом створе, м<sup>3</sup>/с.

Для расчета технического потенциала необходимо учитывать КПД станции. Тогда расчетное выражение (1) примет следующий вид:

$$N = 9,81QH\eta, \quad (2)$$

где  $\eta$  – КПД станции, о. е.

Далее проанализируем технический энергетический потенциал нескольких промышленных стоков г. Новосибирска.

### III. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ В Г. НОВОСИБИРСКЕ

Технологические стоки – дешевый и простой ресурс для получения электроэнергии с помощью МГЭС в городах. Объекты водоснабжения, системы подачи воды, станции очистки сточных вод являются потребителями большого количества электроэнергии. Применение МГЭС в системах подачи воды и канализации сточных вод может существенно уменьшить затраты на электроэнергию предприятий, имеющих на своей территории такие стоки. В некоторых случаях установка МГЭС позволяет обеспечить полную энергонезависимость и даже продавать избыток в сеть.

Рассмотрим некоторые промышленные водосбросы Новосибирска.

#### А. Сточные воды систем охлаждения ТЭЦ

ТЭЦ-2 г. Новосибирска имеет водосброс подогретой воды; подобный водосброс позволяет нам использовать его круглый год независимо от сезона, погодных условий, так как замерзания не происходит (рис. 1). По данным Управления природными ресурсами НСО [4] объем сброшенных в водные объекты нормативно чистых сточных вод ТЭЦ-2 за 2016 г. составляет 115,9 млн м<sup>3</sup>.

Среднегодовой расход рассчитывается следующим образом:

$$Q = V/T, \quad (3)$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – годовой объем воды, м<sup>3</sup>;  $T$  – количество секунд в году:

$$Q = \frac{115,9 \cdot 10^6}{8760 \cdot 60 \cdot 60} = 3,68 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким образом, среднегодовой расход сточных вод в ТЭЦ-2 составляет  $Q = 3,68 \text{ м}^3/\text{с}$ . Примем напор  $H = 3$  м как теоретический минимальный перепад высот между почвой и поверхностью водоема.

КПД принимаем 0,75, традиционный для пропеллерных турбин, которые устанавливаются в микроГЭС [5]. Тогда технический потенциал стока по (2) составит:

$$N = 9,81 \cdot 3,68 \cdot 3 \cdot 0,75 = 81,24 \text{ кВт}.$$

Вырабатываемая такой станцией мощность может идти на собственные нужды ТЭЦ. Далее ведется расчет технического потенциала, поскольку очевидно, что именно эта величина позволяет судить о перспективности такого объекта, как МГЭС, на том или ином стоке.



Рис. 1 – Сброс ТЭЦ-2 (г. Новосибирск)

ТЭЦ-3 находится рядом с ТЭЦ-2 и имеет схожую окружающую местность. Расчет ведется аналогично. Результаты сведены в табл. I.

#### В. Сточные воды насосно-фильтровальных станций (НФС)

НФС №3 МУП «Горводоканал» (рис. 2) имеет два водосброса в реку Иня на расстоянии метра друг от друга, напор достигает до 45 м. Это связано с использованием естественных условий, особенностями ландшафта.

Произведем оценку расхода. Ниже приведена табл. I годовых расходов сточных вод НФС №3 за 2015 год [6]. Сложность оценки заключается в том, что некоторые из составляющих расходов непостоянны во времени, появляются с различной периодичностью.

Таблица I – СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ГОДОВОГО РАСХОДА ВОДЫ С НФС №3

Наименование нужд расходов	Годовой расход, м <sup>3</sup> /год
Промывка фильтров	1236559
Гидравлическое удаление осадка с отстойников	253620
Расход воды от пробоотборников	340589
Промывка камер реакции и отстойников	40961
Промывка резервуаров чистой воды	28270

Произведем расчет усредненного значения расхода по (3):

$$Q = \frac{1236559 + 253620 + 340589 + 40961 + 28270}{8760 \cdot 3600} = 0,602 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда среднее значение величины технического потенциала по (2):

$$N = 9,81 \cdot 0,75 \cdot 45 \cdot 0,602 = 199,3 \text{ кВт}.$$



Рис. 2 – Сточные воды НФС № 3 в р. Иня

По результату расчета видим значительное увеличение потенциала по сравнению с ТЭЦ. Это доказывает сильное влияние величины напора на значение выработки. «Зеленая» энергия, выдаваемая такой ГЭС, может пойти на обеспечение собственных нужд НФС, частных домов или горнолыжного комплекса «Иня».

В ходе работы был рассмотрен еще один технологический водосброс системы очистки воды: сброс НФС № 5 МУП «Горводоканал» г. Новосибирска, выпуск № 7 с системы водоочистки в р. Иня. Расчет приведен в [7].

### С. Анализ результатов

Итак, были исследованы четыре промышленных водосброса на предмет величины гидроэнергетического потенциала. Результаты сведены в табл. II, из которой видно, что все перечисленные стоки могут быть источниками для получения электроэнергии с помощью малых ГЭС.

Таблица II – Сравнительная таблица энергетических показателей сточных вод г. Новосибирска

Объект	Расход, м <sup>3</sup> /с	Напор, м	Мощность, кВт
ТЭЦ-2	3,68	3	81,2
ТЭЦ-3	4,22	3	93,1
НФС №3	0,5	45	199,3
НФС №5	0,569	5,8	24,3

Следует отметить, что основные энергетические показатели – расход и напор – были рассчитаны приблизительно, при проектировании МГЭС потребуются более детальный расчет. Кроме того, разработка конструкции станции требует отдельного рассмотрения, представляется сложной и интересной задачей. С одной стороны, гидроагрегаты (ГА) для МГЭС типовые, производятся в РФ и могут быть изготовлены в короткие сроки. С другой, разработка конструкции, где будет располагаться ГА, в том числе учет защиты от краткосрочного паводка, защиты от низких температур, от несанкционированного доступа требует индивидуального подхода. Также представляет интерес разработка автоматики и подключения станции на параллельную работу с сетью (при выдаче избытков мощности

в энергосистему). Кроме того, требует внимательного рассмотрения экономического аспекта. Такие задачи ставятся для дальнейшего исследования в данной тематике.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование энергии небольших водотоков с помощью малых ГЭС является одним из наиболее эффективных направлений развития распределенной генерации на возобновляемых источниках энергии в нашей стране. В качестве первичного ресурса для ГЭС в мегаполисах могут использоваться промышленные водостоки, такие как вода с очистных сооружений, с систем охлаждения предприятий, в том числе ТЭЦ, МГЭС, установленные на таких стоках, могут быть использованы на собственные нужды предприятий или обеспечивать электричеством частные сектора, дачные поселки, фермерские хозяйства и др.

Практическая значимость исследования состоит в том, что оно дает прекрасную возможность накопления опыта проектирования и обслуживания малых ГЭС, формирования определенных рекомендаций по дальнейшему строительству подобных объектов с учетом особенностей источника воды.

### Список литературы

- [1] Возобновляемые источники энергии: учебник/ Удалов С.Н. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2010. - 444с.
- [2] Об электроэнергетике: федер. закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ (ред. от 6 ноября 2013 г.).
- [3] О схеме централизованной ливневой системы водоотведения города Новосибирска на 2017–2027 гг.: постановление мэрии г. Новосибирска от 27 сентября 2017 г. № 4401.
- [4] Управление природных ресурсов и особо охраняемых территорий по НСО. URL: <http://dproos.nso.ru> (дата обращения: 18.04.16).
- [5] Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанции: курс лекций. Томск, 2009 63 с.
- [6] Сведения о водопользователе МУП «Горводоканал» г. Новосибирска // Департамент природных ресурсов и окружающей среды Новосибирской области, 2015.
- [7] Жданович А.А. Разработка микроГЭС для водосброса НФС-5 МУП «Горводоканал» // Новые нетрадиционные возобновляемые источники энергии: тез. докл. Всерос. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2013. С. 24–25.

# АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВЭС НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Жиленков А.А.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

zhilenkovartem@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** По мере истощения нефтегазовых и угольных ресурсов повышается конкурентоспособность ВИЭ. Доля инвестиций в ВЭС стремительно растёт с каждым годом. Их главным преимуществом является отсутствие выбросов углекислого газа в атмосферу в процессе работы. Однако выработка энергии на ВЭС зависит от непостоянного фактора – силы ветра, и потому регулировать её невозможно. Введение в энергосистему значительных мощностей может привести к дестабилизации. Поэтому система должна обладать большим резервом мощности. Кроме того, возможности электрической сети порой не позволяют включать в неё большие мощности, иначе потребовалась бы её реструктуризация. Таким образом, необходимо проанализировать возможность применения крупных ВЭС в реальной электроэнергетической системе.

**Материалы и методы:** Выбор и анализ реального узла электроэнергетической системы, расчёт.

**Результаты:** Выбран участок ЭЭС Республики Татарстан и представлен в виде изолированной энергосистемы изначально с одним источником бесконечной мощности. Обосновано использование ВЭС для данного конкретного узла ЭЭС и определена примерная суммарная мощность ветроустановок. Найдены ещё некоторые участки возможной эффективной работы ВЭС в электроэнергетической системе. Сформулирован вектор для дальнейших исследований в затронутом вопросе.

**Выводы:** Выявлено, что включение в существующую электроэнергетическую систему большой доли ВЭС нецелесообразно. Определено, что установка ВЭС небольшой мощности может положительно влиять на работу сети: значительно уменьшаются активные и реактивные потери. Соответственно, снижаются потери электроэнергии, что приводит к минимизации издержек на обслуживание линий электропередач. Предложены места расположения новых ВЭС в Республике Татарстан.

**Ключевые слова:** ветроэлектростанция, электроэнергетическая система, потери активной и реактивной мощности, потери электроэнергии, линия электропередачи, электрическая подстанция.

# ANALYSIS OF WPP APPLICATION ON THE EXAMPLE OF POWER SYSTEM OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

A. Zhilenkov

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russian Federation

zhilenkovartem@mail.ru

## Annotation

**Background:** As oil and gas and coal resources are exhausted, RES competitiveness increases. The share of investments in WEC is growing rapidly every year. Their main advantage is the absence of carbon dioxide emissions into the atmosphere during operation. However, power generation at the wind farm depends on a non – permanent factor-wind power, and therefore it is impossible to regulate it. The introduction of significant capacities in the power system can lead to destabilization. Therefore, the system must have a large power reserve. In addition, the capabilities of the electric network sometimes do not allow to include large capacities, which requires its restructuring. Thus, it is necessary to analyze the possibility of using large wind turbines in a real electric power system.

**Materials and methods:** Selection and analysis of a particular node of the electric power system, calculation.

**Results:** A section of the power plant of the Republic of Tatarstan was Chosen and presented as an isolated power system with one source of infinite power. The use of wind turbines for this particular node of the EEC is substantiated and the approximate total capacity of wind turbines is determined. Some more areas of possible efficient operation of the wind farm in the electric power system have been found. The vector for further researches in the raised question is formulated.

**Conclusions:** It was Found that the inclusion of a large share of wind power in the existing electric power system is impractical. It is determined that the installation of WPS of a certain low power can positively affect the network operation: the active and reactive losses in the network are significantly reduced. Accordingly, the loss of electricity is reduced, which reduces the cost of maintenance of power lines. The proposed location of the new wind farm in the Republic of Tatarstan.

**Key words:** wind power plant, electric power system, losses of active and reactive power, loss of electricity, transmission line, electrical substation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

По данным АО «СО ЭЭС» известно, что есть несколько проектов строительства ветроэлектростанций в Республике Татарстан. Например, ООО «Фортум энергия» и ООО «Русский ветер» совместно с «Guris» обозначили свои намерения построить ВЭС мощностью по 100 МВт. В связи с этим были определены приоритетные перспективные районы размещения ветропарков с учётом имеющегося ветропотенциала – это место слияния рек Волга и Кама, а конкретно: Верхний Услон, Рыбная Слобода, Камское Устье, Алексеевское, Тегюши и Болгары. Однако, если обратить внимание на сетевую инфраструктуру, можно заметить, что местные сети состоят из линий 35 и 110 кВ, пропускная способность которых в среднем составляет 3 и 30 МВт, соответственно. Этот факт говорит о том, что размещение в этих районах мощных ВЭС повлечёт за собой дорогостоящую реконструкцию сетевой инфраструктуры. Более того, выработанную энергию необходимо будет передавать на большие расстояния, так как потребление электроэнергии в этом районе очень мало. К примеру, загрузка подстанции 110 кВ «Рыбная Слобода» в зимний максимум составляет всего лишь 4,4 МВт. Отсюда можно сделать вывод, что неизбежны большие потери в сетях.

## II. МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Исследование проведено на примере узла ЭЭС Татарстана, заключённого между подстанциями «Кутлу Букаш» 220/110/35/10 кВ и «Большая Елга» 35/10 кВ (рис. 1). Помимо уже названных система включает в себя подстанции (ПС): Рыбная Слобода, Камская (обе 110/35/10), Кугарчино и Шумково (обе 35/10). Выбор такой энергосистемы обусловлен тем, что район расположения подстанций Рыбная Слобода и Камская обладает наибольшим ветроэнергетическим потенциалом на территории ПЭС. ПС «Кутлу Букаш» принята за источник питания данной изолированной системы, так как является крупным узлом энергосистемы и имеет питание по трём линиям 220 кВ. На ПС «Большая Елга» система делится секционным выключателем. Поэтому она принята за границу исследуемой ЭЭС.

Упрощения принятые при составлении схемы замещения (рис. 2):

1. ПС «Кугарчино» полностью получает питание со стороны ПС «Кутлу Букаш». Тем самым при составлении схемы замещения можно исключить линию 35 кВ «Рыбная Слобода – Кугарчино».
2. На ПС «Шумково» отключен выключатель со стороны ПС «Камская». Поэтому следует исключить линию 35 кВ от отпайки на ПС «Б. Елга» до «Шумково».
3. Потери в трансформаторах и в линиях 35 кВ очень малы. В связи с этим принимаем, что общая нагрузка на ПС «Камская» равна сумме собственной нагрузки на стороне 10 кВ и нагрузки ПС «Б. Елга», а на ПС «Рыбная Слобода» – собственной на стороне 10 кВ и нагрузки на ПС «Шумково».
4. ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» состоит из двух частей с разными длинами и марками проводов. Поэтому она показана как две ЛЭП со своими параметрами.

При решении были использованы реальные параметры. В целях соблюдения конфиденциальности некоторые из них были несколько изменены. На схеме электрических соединений исследуемой ЭЭС приведены показания по нагрузке на подстанциях в зимний максимум. На схеме замещения указаны данные по длине линий и название марок проводов, применяемых на них.

Для расчёта потерь в сетях были использованы справочные удельные значения сопротивлений и проводимостей для изучаемых сечений проводов при данном напряжении (табл. I) [1]. В сетях 35 кВ не учтены проводимости ввиду их незначительной величины.

Для оценки ситуации в ЭЭС применен упрощённый метод расчёта режима ЛЭП [2] по следующим формулам:

1. Потери мощности находят, используя значения мощности и напряжения в конце линии и полное сопротивление ЛЭП по формуле:

$$\Delta S_{1-2} = Z \frac{S_{K1-2}^2}{U_K^2}, \quad (1)$$

где  $S_{K1-2} = S_{\text{НАГ}} - JQ_C^K$  – мощность передачи в конце линии;  $U_K$  – напряжение на шинах в конце линии;  $Z$  – её полное сопротивление.

2. Зарядную мощность определяют по формуле:

$$Q_c = \frac{1}{2} U_K^2 j b_0 l, \quad (2)$$

где  $b_0$  – ёмкостная проводимость линии;  $l$  – её длина.

При оценке потерь в линиях 35 кВ ёмкостная проводимость не учитывалась ввиду её незначительного влияния.

3. Чтобы определить зарядную мощность в начале линии, вычисляют напряжение по формуле:

$$U_H = U_K + \Delta U_{1-2}, \quad (3)$$

где  $\Delta U_{1-2}$  – падение напряжения, определяемое по формуле:

$$XU_{1-2} = Z \frac{S_{K1-2}}{U_K}. \quad (4)$$

4. Потери энергии находят методом времени максимальных потерь [3]. Выражение для нахождения нагрузочных потерь:

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время максимальных потерь – это время, за которое в элементе сети, функционирующем с максимальной нагрузкой, выделяется те же нагрузочные потери энергии, что и при работе по реальному графику нагрузки за год.  $\tau$  находится из выражения:

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10000} \right) \cdot 8760, \quad (6)$$

где  $T_{\text{max}}$  – время использования максимума нагрузки. Для малой и средней категории городов это время составляет 5400 ч/год.

$\Delta P$  находится аналогично формулам (1)–(4).

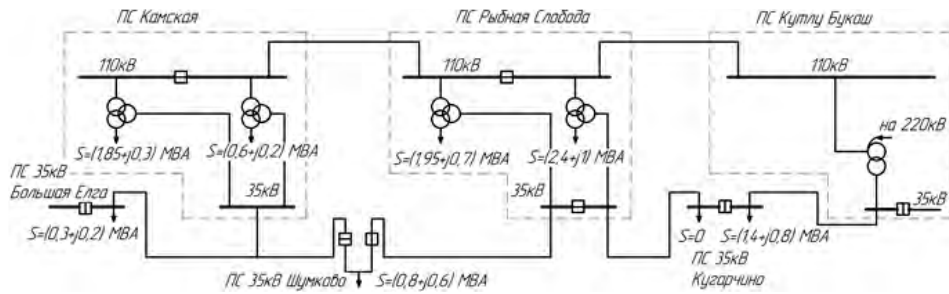


Рис. 1 – Схема электрических соединений исследуемой ЭЭС

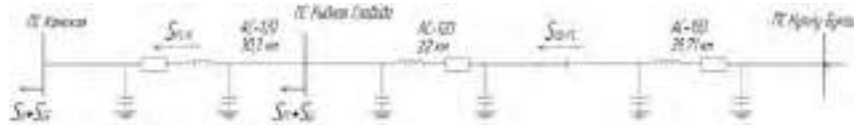


Рис. 2 – Схема замещения исследуемой ЭЭС

Таблица I – ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

$U_{ном}, \text{кВ}$	Название линии	Длина, км		Сечение, мм <sup>2</sup>		$r_0, \text{Ом/км}$		$x_0, \text{Ом/км}$		$b_0 \cdot 10^{-6}, \text{См/км}$	
110	Рыбная Слобода – Камская	30,3		120		0,246		0,427		2,658	
	Кутлу Букаш – Рыбная Слобода	22	39,7	120	150	0,25	0,19	0,427	0,42	2,658	2,707
35	Рыбная Слобода – Шумково	17,5		95		0,311		0,411		–	
	Камская – Большая Елга	9,7	10,5	70	120	0,41	0,25	0,42	0,403		

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения потерь мощности и электроэнергии в сетях и выбора места установки ВЭС был проведён вычислительный эксперимент. Его результат сведены в табл. II, где показаны потери полной, активной и реактивной мощностей, а также потери электроэнергии.

Для проведения исследования выбирают ветроустановки RW-DD 112-2500 LIZA, которые компания ООО «Русский ветер» предлагает для установки [4]. Расчётная мощность синхронного генератора с постоянными магнитами данной ветроустановки составляет 2500 кВт, номинальная мощность – 2650 кВт, номинальная частота равна 50 Гц. Если местные условия позволяют работать ВЭУ в номинальном режиме, то функционирования четырёх установок хватает для покрытия нагрузки в день зимнего максимума всех указанных для данной ЭЭС подстанций, в том числе ПС «Кугарчино». Излишки мощности предполагается отдавать в систему через ПС «Кутлу Букаш», а в продолжительную безветренную паузу дефицит системой будет покрываться. Для сглаживания графика выработки необходимо применение аккумуляторных батарей.

Рассмотрены два варианта подключения к ветроэлектростанции в исследуемой энергосистеме к ПС «Камская» и ПС «Рыбная Слобода».

Расположение ветроустановок у других подстанций не рассматривалось из-за недостаточности ветропотенциала в местах их нахождения.

Таблица II – ПОТЕРИ В ИССЛЕДУЕМЫХ ЛЭП

Место установки	ПС «Камская»	ПС «Рыбная» Слобода	Без ВЭС
$\Delta S, \text{MVA}$	0,12	0,02	0,16
$\Delta Q, \text{MVar}$	0,11	0,02	0,15
$\Delta P, \text{MWt}$	0,06	0,01	0,07
$\Delta W, \text{MВт}\cdot\text{ч/год}$	349,64	59,89	429,48

Как можно заметить исходя из данных таблицы, наибольший эффект достигается при размещении ВЭС у ПС «Рыбная Слобода». Потери электроэнергии при этом уменьшаются на 370 МВт·ч/год. В Татарстане тариф до 30.06.2018 для населения, проживающего в сельских населённых пунктах, составляет 2,49 руб/кВт·ч [5]. Если рассчитать издержки в электрических сетях с использованием данного коэффициента, то разница по сравнению с эксплуатацией ЭЭС без ВЭС  $\Delta I$  составит до 720 тыс. руб./год.

### III. ВЫВОДЫ

Таким образом, строительство ВЭС может положительно повлиять на уменьшение потерь в электрической сети. Распределение генерации позволяет не реконструировать сети при увеличении мощности системы. Кроме того, при использовании генерирующего оборудования мощностью до 25 МВт имеется возможность не выходить на ОРЭМ, что облегчит их внедрение.

В дальнейшем следует рассмотреть системы, где применение ветроустановок будет более эффективным (рис. 3). Например, ПС «Камское Устье» секционными выключателями делит систему на две части и получает питание с двух сторон. При установке ветроустановок поблизости можно

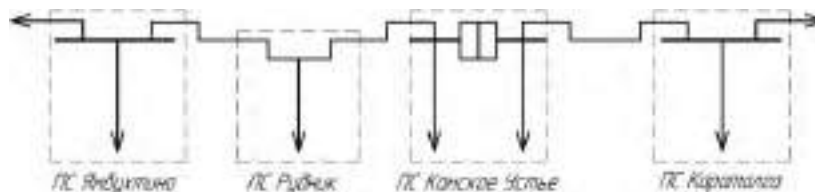


Рис. 3 – ЭЭС с напряжением 110 кВ, включающая в себя ответвительную подстанцию и подстанцию, делящую систему

снизить потери в обеих отходящих линиях. Более того, появляется возможность установки более мощной ВЭС. Однако значительное увеличение мощности потребует применения механизмов сглаживания неоднородности их выработки. Также установка генерации на ответвительных подстанциях, таких как ПС «Рудник», позволит повысить надёжность электроснабжения их потребителей, так как появляется второй источник питания. Необходимо в последующем произвести выбор наиболее подходящих ветрогенераторов и расчёт динамической и статической устойчивости системы.

### Список литературы

- [1] Ключкова Н.Н., Обухова А.В. Расчёт электропитающих сетей: учеб. пособие. Самара: СГТУ, 2013.
- [2] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [3] Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: Энас, 2009.
- [4] URL: <http://russianwind.su>.
- [5] URL: <http://tatenergoby.ru>.

# НЕЧЁТКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ МАЛЫХ ГЭС РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

Зайцев В.В., Толстикова Л.В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (Саяно-Шушенский филиал СФУ)

Саяногорск, р. п. Черёмушки, Россия

zaitsev@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Существующая классификация малых гидроэлектростанций (МГЭС) по признаку установленной мощности не позволяет объективно распределить маломощные ГЭС по трём чётким классам ввиду неопределённых нормативных различий между ними.

**Материалы и методы:** Для создания классификаций применялась теория нечётких множеств.

**Результаты:** Разработаны классификации на основе нечётких множеств малых ГЭС Республики Хакасия по параметрам мощности и напора.

**Выводы:** Применение на практике полученных классификаций при подведении под них законодательной базы (зависимости величины ставки водного налога от степени принадлежности к классам), а также определение зоны работы на графике нагрузки позволят каждой МГЭС в индивидуальном порядке функционировать наиболее эффективно.

**Ключевые слова:** малые ГЭС, нечёткая логика, классификация.

## FUZZY CLASSIFICATION BY PARAMETERS OF SMALL HYDROELECTRIC POWER STATIONS OF THE REPUBLIC OF KHAKASSIA

V. Zaitsev, L. Tolstikhina

Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch office

Sayanogorsk, Cheremushki

zaitsev@yandex.ru

## Abstract

The existing classification of small HPPs on the basis of installed capacity does not allow objectively distributing low-power HPPs in three distinct classes, in view of the vague regulatory differences between them. Creation of classifications based on fuzzy sets will help solve this problem.

**Materials and methods:** A fuzzy-set theory has been used to create the classifications.

**Results:** The classifications, based on fuzzy-sets, taking into consideration power and head specifications, has been developed for small hydropower plants of the Republic of Khakassia.

**Conclusions:** The suggested classifications, which may be used while creating a legislative base (the dependence of water tax rate on SHPP class), as well as the definition of work area on the load graph, will allow each SHPP to operate most efficiently.

**Key words:** small hydro, fuzzy logic, classification.

Современная классификация малых ГЭС (далее – МГЭС) подразделяет их на 3 класса в зависимости от установленной мощности: «Малые ГЭС», «Мини-ГЭС» и «Микро-ГЭС». Однако такая классификация носит ограниченный характер, и отнести к определённому классу ГЭС, имеющую множество параметров, судя только по установленной мощности можно очень условно. Данная классификация является общепринятой, хотя в разных странах границы этих классов имеют различное значение. Например российские приведены в табл. I [1, с. 10].

Очевидно, что при таком подходе к разделению классов любая ГЭС с установленной мощностью до 30 МВт будет принадлежать только одному из них. Истинность этой принадлежности будет равна 1, в тоже время истинность принадлежности этой ГЭС к другим двум классам будет равна 0, т. е. им она принадлежать не будет.

Также существует классификация малых ГЭС по параметру напора [1, с. 11]. Она, аналогично классификации по установленной мощности, разделяет МГЭС на 3 класса, однако границы этих классов различны в разных источниках.

Таблица I – Классификация МГЭС России по установленной мощности

Класс	Малая ГЭС	Мини-ГЭС	Микро-ГЭС
$N_{\text{усть}}$ , МВт	до 30	до 1	до 0,1

Таблица II – Классификация МГЭС России по напору

Класс	Низконапорный	Средненапорный	Высоконапорный
$H$ , м	до 20	от 20 до 100	свыше 100

Уточнить эти классификации для определённых условий Республики Хакасия возможно путём представления их лингвистических переменных с пересекающимися классами терм-множеств.

Целесообразность применения классификации в ближайшем будущем обусловлена приоритетным комплексным проектом «Развитие промышленного потенциала Республики Хакасия до 2030 года», согласно которому в Хакасии планируется развитие энергоёмкого производства добывающей и перерабатывающей промышленности [2], а также строительство линии электропередач для экспорта электроэнергии [3]. Реализация этих проектов может привести к появлению энергодефицита в регионе. Восточная Сибирь, в том числе и Хакасия, обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом. Создание МГЭС решит проблему энергоснабжения удалённых потребителей.

В Хакасии существует только одна микро-ГЭС мощностью 0,008 МВт [4], поэтому анализ проводится для неё и проектов малых ГЭС [5–7].

Таблица II – ПРОЕКТИРУЕМЫЕ МГЭС ХАКАСИИ

Название МГЭС	N, МВт	H, м	Название МГЭС	N, МВт	H, м
Ербинская ГЭС-1	21,80	14,75	Онакская ГЭС-2	15,40	12,10
Ербинская ГЭС-2	27,90	20,32	Онакская ГЭС-3	13,80	13,20
Ербинская ГЭС-3	22,60	13,17	Тейская ГЭС-1	12,90	8,70
Ербинская ГЭС-4	15,90	8,38	Тейская ГЭС-2	20,50	14,90
Июская ГЭС-1	7,50	6,60	Тейская ГЭС-3	17,40	13,30
Июская ГЭС-2	14,30	11,20	Тейская ГЭС-4	22,20	13,80
Июская ГЭС-3	12,90	10,00	Тейская ГЭС-5	22,80	15,40
Июская ГЭС-4	15,50	11,80	Уйская ГЭС	0,10	5,50
Онакская ГЭС-1	17,60	11,70	Сойоткинская МГЭС	0,01	3,5

На гистограмме (рис. 1) отражено распределение по мощности 18 возможных МГЭС [6] и одной существующей микро-ГЭС.

Эти 19 ГЭС имеют напоры от 3,5 до 150 м. Распределение по напорам также представлено в виде гистограммы (рис. 2).

Нечеткая логика (Fuzzy Logic) – это обобщение традиционной аристотелевой логики на случай, когда истинность рассматривается как лингвистическая переменная, принимающая значения типа: «очень истинно», «более-менее истинно», «не очень ложно» и тому подобное. Указанные лингвистические значения представляются нечеткими множествами. Сущность этого подхода заключается в следующем:

- используются так называемые «лингвистические» переменные вместо числовых переменных либо в дополнение к ним;
- отношения между переменными описываются с помощью нечетких высказываний;
- сложные отношения описываются нечеткими алгоритмами.

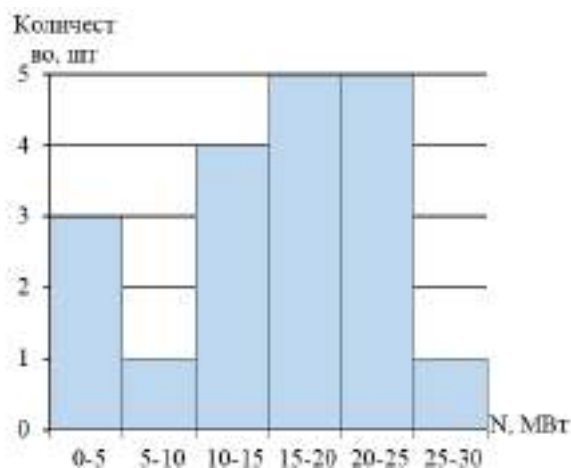


Рис. 1 – Гистограмма распределения малых ГЭС Хакасии по мощности

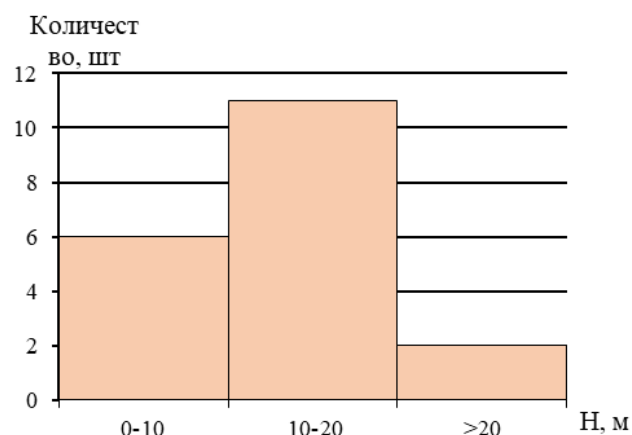


Рис. 2 – Гистограмма распределения малых ГЭС Хакасии по напорам

Любая нечёткая лингвистическая переменная задаётся с помощью следующих параметров:  $N$  – название переменной,  $X$  – универсальное множество (область рассуждения),  $A$  – нечёткое множество (терм-множество) в составе универсального множества  $X$  [8]. Введём переменную  $N = \text{«ГЭС малой мощности»}$ , зададим область рассуждений  $X = [0; 50]$  МВт, и объявим нечёткие переменные  $A$  – «Малая ГЭС», «Мини-ГЭС», «Микро-ГЭС». Выбираем трапецидальную функцию принадлежности лингвистических термов, так как на определённых промежутках универсального множества они будут относиться только одному терм-множеству. Функции распределения по признаку мощности имеют следующий вид:

$$\mu(x_{\text{микро}}) = \begin{cases} 1; 0 \leq x \leq 0,1, \\ 1 - \frac{x-0,1}{0,5-0,1}; 0,1 \leq x \leq 0,5, \\ 0; x \notin (0;0,5). \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(x_{\text{мини}}) = \begin{cases} 1 - \frac{0,8-x}{0,8-0,25}; 0,25 \leq x \leq 0,8, \\ 1; 0,8 \leq x \leq 3, \\ 1 - \frac{x-3}{5-3}; 3 \leq x \leq 5, \\ 0; x \notin (0,25;5). \end{cases} \quad (2)$$



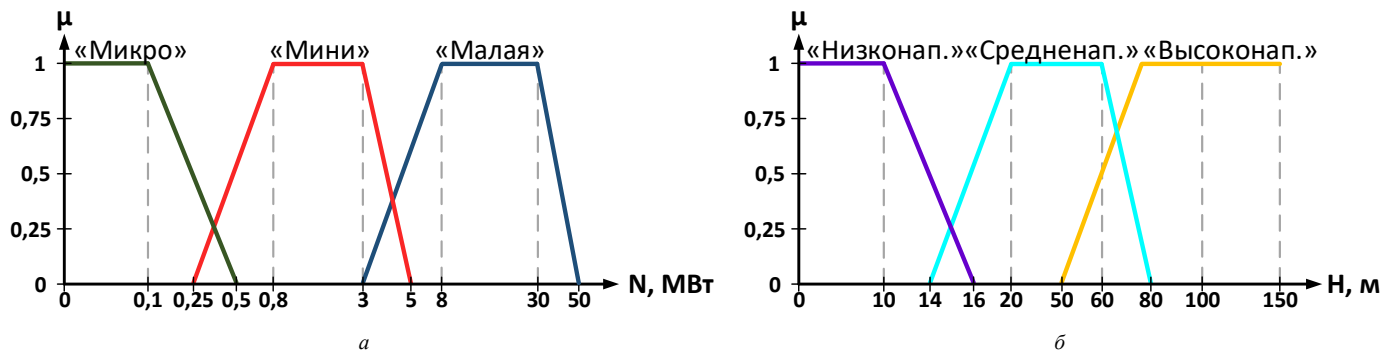


Рис. 3 – Графическое представление нечёткой классификации маломощных ГЭС Хакасии по параметрам мощности (а) и напора (б)

$$\mu(x_{\text{малая}}) = \begin{cases} 1 - \frac{8-x}{8-3}; & 3 \leq x \leq 8, \\ 1; & 8 \leq x \leq 30, \\ 1 - \frac{x-30}{50-30}; & 30 \leq x \leq 50, \\ 0; & x \notin (3; 50). \end{cases} \quad (3)$$

В графическом представлении эти функции принадлежности (1)–(3) будут иметь вид, показанный на рис. 3, а.

Из полученной классификации видно, что существуют такие промежутки мощности, на которых ГЭС относится к определенному классу с некоторой долей принадлежности, т. е. не полностью, а также такие промежутки мощности, на которых ГЭС примыкает с некоторой долей принадлежности сразу к двум классам.

Подобно классификации по признаку мощности, создаются функции принадлежности для признака напора. Переменная остаётся той же –  $N = \text{«ГЭС малой мощности»}$ , область рассуждения –  $Y = [0, 150]$ , нечёткие переменные (лингвистические термы)  $A = \text{«Низконапорная»}$ , «Средненапорная», «Высоконапорная». Функции распределения также трапециевидальны:

$$\mu(y_{\text{низконапор}}) = \begin{cases} 1; & 0 \leq y \leq 10, \\ 1 - \frac{y-10}{16-10}; & 10 \leq y \leq 16, \\ 0; & y \notin (0; 16). \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu(y_{\text{средненапор}}) = \begin{cases} 1 - \frac{20-y}{20-14}; & 14 \leq y \leq 20, \\ 1; & 20 \leq y \leq 60, \\ 1 - \frac{y-60}{80-60}; & 60 \leq y \leq 80, \\ 0; & y \notin (16; 80). \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu(y_{\text{малая}}) = \begin{cases} 1 - \frac{100-y}{100-50}; & 50 \leq y \leq 100, \\ 1; & 100 \leq y \leq 150. \end{cases} \quad (6)$$

В графическом представлении функции принадлежности (4)–(6) будут иметь вид, показанный на рис. 3, б.

В отличие от других распространенных кривых распределения, таких как треугольная и гауссова функции, трапециевидальная кривая обладает такими промежутками области рассуждения, на которых нечёткое понятие относится только к одной нечёткой переменной с принадлежностью, равной единице. Очевидно, что для электростанций трапециевидальная кривая наиболее применима ввиду того, что их классы разделения по мощности, как и распределения по напору, достаточно обширны и внутри них в определенных границах ГЭС можно отнести только к одному классу с полной принадлежностью. Однако для различных физико-географических областей мира и энергосистем нельзя получить универсальную нечёткую классификацию маломощных ГЭС, что связано с отличиями в природных условиях областей и режимах работы станций.

Применительно к условиям Республики Хакасия, границы нечётких переменных расширены относительно чётких границ с учётом мощности планируемых МГЭС, а также возможности работы как изолированно от энергосистемы, так и внутри неё. Для классификации по параметру напора уточнены границы классов. Однако точность этого позволяет желать лучшего ввиду того, что практически все проектируемые МГЭС принадлежат одному классу, и границы других двух классов приняты приблизительно. Данная неточность может быть устранена в будущем при проектировании последующих МГЭС в Республике Хакасия с большими напорами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны классификации малых ГЭС Республики Хакасия по параметрам мощности и напора. На основе нечётких множеств можно более объективно определить класс и область работы планируемой малой ГЭС. Полученные классификации не являются абсолютными и статичными, при проектировании новых МГЭС в регионе границы классов могут подвергаться изменениям. В перспективе (при большом количестве маломощных гидроэлектростанций) возможны изменения типа функции принадлежности. На данном этапе принят наиболее простой тип функции принадлежности – трапециевидальный. Этот тип функции распределения в условиях небольшого количества объектов, принадлежность к переменным которых нужно определить, является наиболее подходящим ввиду простоты

геометрической фигуры, представляющей функцию. Применимость этих классификаций на практике возможна при подведении под них законодательной базы, например зависимость величины ставки водного налога от степени принадлежности к классам, а также зоны работы на графике нагрузки. Эти меры позволят каждой МГЭС в индивидуальном порядке работать наиболее эффективно экономически. Подобные классификации возможно создать для большего числа регионов, имеющих маломощные гидроэлектростанции, учитывая их физико-географические особенности и мощность генерации региона в целом. При этом, чем больше в регионе будет МГЭС, тем объективнее классификация будет отражать принадлежность каждой конкретной станции к классам. Применение нечеткой логики для решения классификационных задач в отечественной гидроэнергетике является нововведением, позаимствованным из областей создания искусственных нейросетей, нечетких систем управления, классических систем управления.

## Список литературы

- [1] Гидроэлектростанции малой мощности: учеб. пособие / Под ред. В.В. Елистратова. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2005. 432 с.
- [2] Об утверждении Концепции развития промышленности Республики Хакасия на 2017–2030 годы: постановление Президиума Правительства Республики Хакасия от 15 ноября 2017 г. № 164-п.
- [3] URL: <https://www.irk.ru/news/20170420/powerline/>
- [4] Пингвин: Газета сектора «Информация и реклама». Саяногорск, 2017, № 2.
- [5] Никишин К.А., Толстихина Е.А., Сема Е.Г., Толстихина Л.В. Использование гидроэнергетических ресурсов южных районов Сибири для строительства малых ГЭС // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: матер. VII Междунар. молод. науч.-техн. конф., Казань, 2016. Т. 3. 379 с.
- [6] Кяри М.В., Никишин К.А., Толстихина Е.А., Щербаков Е.В. Технико-экономическое обоснование строительства малых ГЭС в Республике Хакасия // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: матер. VIII Междунар. молод. науч.-техн. конф: в 3 т. Самара, 2017. 342 с.
- [7] Скасиров Г.С. Проектирование микроГЭС на р. Сойотке. СШФ КГТУ, 2007. 118 с.
- [8] URL: [http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1\\_7.php](http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1_7.php).

# РАСЧЁТ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНО-СЕТЕВОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПРЕДПРИЯТИЯ

Зенина О.А., Сошинов А.Г., Галушчак В.С., Тихонин С.Н.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»  
Камышин, Россия  
zenina-99@list.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Развитие электротранспорта с накоплением электроэнергии в бортовых аккумуляторных системах предусматривает создание инфраструктуры электрических зарядных станций (ЭЗС). Заряд аккумуляторов бортовых систем электромобилей должен осуществляться постоянным током на напряжении до 100 вольт. Прогресс в развитии аккумуляторов направлен на уменьшение времени зарядки с нескольких часов для литий-ионных аккумуляторов до нескольких минут для полимер-графеновых. В связи с этим зарядная станция должна обладать способностью отдавать энергию при значительных токах, не создавая нарушений в электрической сети, питающей других потребителей. В то же время с точки зрения энергосбережения необходимо использовать возобновляемые источники энергии для такого вида транспорта. Необходимо разработать методику определения мощности ЭЗС исходя из имеющегося парка электротранспорта предприятия с учётом законодательных требований по энергосбережению.

**Материалы и методы:** Использовались метод статистического анализа и численные методы расчёта.

**Результаты:** Определены пиковая мощность электростанции, необходимый объём отпуска электрической энергии и мощность солнечной электрогенерирующей установки исходя из состава имеющихся транспортных средств предприятия.

**Выводы:** Предложена методика определения мощности электростанции исходя из имеющегося парка транспортных средств предприятия, показана возможность вытеснения топливной составляющей в затратах организации использованием покупной электроэнергии и возобновляемых энергоресурсов.

**Ключевые слова:** электротранспорт, бортовой аккумулятор, электростанция, электрическая сеть, солнечная установка.

## CALCULATION OF POWER OF THE SOLAR AND NETWORK CHARGING STATION OF ELECTROMOBILE TRANSPORT OF THE ENTERPRISE

O. Zenina, A. Soshinov, V. Galushchak, S. Tihonin

The Kamyshin institute of technology (branch) of "The Volgograd state technical university"  
Kamyshin, Russian Federation  
zenina-99@list.ru

## Abstract

**Background:** Development of the electric transport with accumulation of the electric power in onboard heat-sink systems provides creation of infrastructure of the power charging plants (PCP). The charge of accumulators of onboard systems of electric vehicles has to be carried out by a direct current at the voltage up to hundred volts. Progress in development of accumulators is directed on reduction of time of charging from several o'clock for lities – ionic accumulators up to several minutes for polymer – graphene. In this regard the charging station has to have ability to give energy at considerable currents, without creating violations in the electrical network feeding other consumers. At the same time from the point of view of energy saving it is necessary to use renewables for such type of transport. It is necessary to develop a technique of determination of power of EZS proceeding from the available park of the electric transport of the enterprise taking into account legislative requirements for energy saving.

**Materials and methods:** The method of the statistical analysis and numerical methods of calculation were used.

**Results:** Peak power of the electrocharging station, necessary volume of a holiday of electric energy and power of the solar electrogenerating installation proceeding from structure of the available vehicles of the enterprise are determined.

**Conclusions:** The technique of determination of power of the electrocharging station proceeding from the available park of vehicles of the enterprise is offered, the possibility of replacement of a fuel component in expenses of the enterprise is shown by use of the purchased electric power and renewable energy resources.

**Key words:** electric transport, onboard accumulator, electrocharging station, electrical network, solar installation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В конце 2017 года известный американский миллиардер и изобретатель Илон Маск продемонстрировал мировой общественности электрический грузовый автомобиль TESLA Semi – фуру грузоподъемностью 36 т с дальностью хода 800 км при одной зарядке бортового аккумулятора [1]. Зарядка аккумуляторов предусматривается от стационарных солнечных энергетических установок. Как утверждает изготовитель, электрическая фура дешевле и легче аналогичного грузовика с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). В этом электромобиле применены литий-ионные аккумуляторы, что требует для их полной зарядки до 8 ч времени простоя. Это снижает потребительские качества грузовика. В то же время достигнут существенный прогресс в сокращении времени заряда аккумуляторов в полимер-графеновых аккумуляторах испанского производства. Согласно сообщению изготовителя, полимер-графеновый аккумулятор заряжается до полной ёмкости в течение 8–10 минут, что обеспечивает дальность хода электромобиля до 1000 км [2]. Таким образом, прогресс в электромобильном транспорте делает актуальной задачу по созданию энергоэффективных ЭЭС для электрических автомобилей, тракторов, комбайнов и других машин и механизмов.

## II. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭЭС

Одна из возможных схем энергоэффективной солнечной ЭЭС предприятия представлена на рисунке.

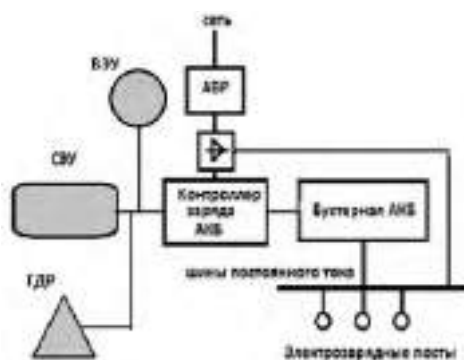


Схема ЭЭС предприятия

Схема включает в себя четыре источника питания: промышленную электрическую сеть переменного тока неограниченной мощности, а также солнечную энергетическую установку (СЭУ), ветровую энергетическую установку (ВЭУ) и «Лежачего полицейского» (Генерирующую дорожную рампу (ГДР)) постоянного тока расчётной мощности. От первого источника питание через блок АВР подается на выпрямительно-зарядное устройство, где переменный ток преобразуется в постоянный требуемого напряжения, выпрямленным током заряжается бустерный аккумулятор, являющийся накопителем энергии в период между зарядками электромобилей. Во время зарядки электромобиля бустерный аккумулятор выдаёт большие токи, не допуская перегруза питающей электросети. При наличии солнечного излучения и ветра, достаточно сильного для работы ВЭУ, АВР отключает сеть, и заряд бустерного аккумулятора осуществляется через контроллер заряда батареи от СЭУ, ВЭУ и ГДР. В том случае, когда бустерный аккумулятор разряжен, а СЭУ и ВЭУ не в состоянии выработать достаточно энергии, заряд электромобилей осуществляется напрямую от промышленной сети.

## III. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАСЧЁТ МОЩНОСТИ ЭЭС

Исходными данными для расчёта мощности ЭЭС являются состав автомобильного и тракторного парка предприятия, основными показателями которого являются: тип транспортного средства, мощность его двигателя, удельный расход топлива на киловатт в час выработанной энергии и количество часов работы машины в году. Можно присвоить соответствующие обозначения перечисленным показателям:

- $N_{Г}$ ,  $N_{ГП}$ ,  $N_{Т}$  – количество грузовых и грузопассажирских автомобилей, тракторов предприятия, шт.;
- $P_{Г}$ ,  $P_{ГП}$ ,  $P_{Т}$  – мощности двигателей грузового и грузопассажирского автомобилей, трактора, кВт;
- $G_{Г}$ ,  $G_{ГП}$ ,  $G_{Т}$  – удельные расходы топлива двигателями грузового и грузопассажирского автомобилей, трактора;
- $T_{Г}$ ,  $T_{ГП}$ ,  $T_{Т}$  – годовое число работы грузового и грузопассажирского автомобилей, трактора, ч.

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями грузовых автомобилей предприятия  $\mathcal{E}_{Г}$ , кВт·ч, определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{Г} = N_{Г} P_{Г} T_{Г}. \quad (1)$$

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями грузопассажирских автомобилей предприятия  $\mathcal{E}_{ГП}$ , кВт·ч, определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{ГП} = N_{ГП} P_{ГП} T_{ГП}. \quad (2)$$

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями тракторов предприятия,  $\mathcal{E}_{Т}$ , кВт·ч, определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{Т} = N_{Т} P_{Т} T_{Т}. \quad (3)$$

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями внутреннего сгорания предприятия,  $\mathcal{E}_{ДП}$ , кВт·ч, определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{ДП} = \mathcal{E}_{Г} + \mathcal{E}_{ГП} + \mathcal{E}_{Т}. \quad (4)$$

Очевидно, ЭЭС должна обеспечить такой отпуск электроэнергии с учётом потерь в циклах заряд-разряд систем бортовых аккумуляторов электромобилей и бустерного аккумулятора. По многочисленным экспериментальным данным и опыту эксплуатации тяговых аккумуляторов потери этих циклов с достаточной для практического использования точностью можно принять равными 40 %.

Тогда общий объём энергии заряда  $\mathcal{E}_{З}$  составит:

$$\mathcal{E}_{З} = 1,4 \mathcal{E}_{ДП}. \quad (5)$$

В целях максимального энергоресурсосбережения обеспечивается заданное производство электроэнергии с помощью солнечной электрогенерирующей установки, принимается общее число часов солнечного сияния  $\tau = 2200$  ч, что является усреднённым показателем для большинства регионов России.

Тогда расчетная мощность СЭУ  $P_{сэу}$ , кВт, определяется выражением:

$$P_{сэу} = \mathcal{E}_3 / \tau, \quad (6)$$

где  $\mathcal{E}_3$  – энергия заряда аккумуляторов всех машин предприятия, кВт·ч;  $\tau$  – число часов солнечного сияния, ч.

#### IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения основных параметров ЭЭС конкретного предприятия задаются следующими исходными данными:

1. Грузовые автомобили предприятия КАМАЗ – 1 шт., мощность двигателя – 176 кВт, удельный расход топлива – 180 г/кВт·ч, 1200 мото·ч/год.
2. Грузопассажирские автомобили предприятия «ГАЗЕЛЬ» – 2 шт., мощность двигателя – 107 кВт, удельный расход топлива – 320 г/кВт·ч, 1450 мото·ч/год.
3. Трактор предприятия МТЗ-1221 – 1 шт., мощность двигателя – 96 кВт, удельный расход топлива – 220 г/кВт·ч, 800 мото·ч/год.
4. Тариф на покупную электроэнергию  $T_3 = 7$  руб./кВт·ч.
5. Цена на органическое топливо (бензин, дизтопливо)  $C_r = 50$  руб./кг.
6. Удельная стоимость строительства отечественной солнечной установки  $C_{уд} = 150\,000$  руб. [3].

Используя выражение (4), определим общий объём энергии, вырабатываемой ДВС автомобилей и тракторов предприятия:

$$\mathcal{E}_{дп} = 1 \cdot 176 \cdot 1200 + 2 \cdot 107 \cdot 1450 + 1 \cdot 96 \cdot 800 = 598300 \text{ кВт·ч.}$$

Общий объём необходимой электроэнергии для заряда аккумуляторов электромобилей и электротракторов предприятия определим, используя выражение (5):

$$\mathcal{E}_3 = 1,4 \cdot 598\,300 = 837\,620 \text{ кВт·ч.}$$

Пиковая мощность ЭЭС, которую она должна развивать в режиме одновременной зарядки аккумуляторов всех транспортных средств  $P_{ээс}$ , составит:

$$P_{ээс} = 176 + 2 \cdot 109 + 96 = 486 \text{ (кВт).}$$

В то же время затраты предприятия на покупку дизтоплива и бензина для ДВС  $Z_{топ}$  составляют:

$$Z_{топ} = 50 \cdot (1 \cdot 176 \cdot 1200 \cdot 0,18 + 2 \cdot 107 \cdot 1450 \cdot 0,32 + 1 \cdot 96 \cdot 800 \cdot 0,22) = 7\,709\,050 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты предприятия на текущий и капитальный ремонт ДВС, топливной аппаратуры и трансмиссии составят:

$$Z_{рем} = 1 \cdot 200\,000 + 2 \cdot 150\,000 + 1 \cdot 100\,000 = 600\,000 \text{ руб.}$$

Полные годовые затраты предприятия на содержание автотракторного парка с ДВС составят:

$$Z_{ап} = 7\,709\,050 + 600\,000 = 8\,309\,050 \text{ руб.}$$

При выполнении солнечной электрогенерирующей установкой на весь требуемый годовой объём электроэнергии согласно выражению (6) её мощность составит:

$$P_{сэу} = \frac{837\,620}{2200} = 458 \text{ кВт.}$$

Тогда годовые затраты предприятия  $Z_{сэу}$  при сроке окупаемости 8 лет и удельных ежемесячных затратах на эксплуатацию СЭУ 170 000 руб./МВт [4] составят:

$$Z_{сэу} = 458 \cdot 150\,000 \cdot 0,125 + 170\,000 \cdot 0,458 \cdot 12 = 9\,521\,820.$$

Годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_ф$  от перевода автомобилей и тракторов предприятия на электрическую тягу от солнечной электрогенерирующей установки взамен ДВС составляет:

$$\mathcal{E}_ф = 8\,309\,050 - 9\,521\,820 = -1\,212\,770 \text{ руб.}$$

Если вся электроэнергия на заряд аккумуляторов электротранспорта будет покупаться у энергоснабжающей организации по тарифу 7 руб./кВт·ч, то затраты предприятия на покупную электроэнергию  $Z_3$  составят:

$$Z_3 = 837\,620 \cdot 7 = 5\,863\,340 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_ф$  от перевода автомобилей и тракторов предприятия на электрическую тягу взамен ДВС с зарядкой от промышленной электрической сети составит:

$$\mathcal{E}_ф = 8\,309\,050 - 5\,863\,340 = 2\,445\,710 \text{ руб.}$$

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённого исследования установлено, что одним из перспективных направлений развития транспорта на пневматическом ходу является отказ от использования ДВС и переход на электрическую тягу. Предложена методика укрупнённого расчёта необходимого объёма электрической энергии для полной замены органического топлива на предприятии. Выявлено, что при сложившихся удельных затратах на строительство солнечных электрогенерирующих установок на киловатт требуемой мощности со сроком окупаемости 8 лет экономический эффект отрицательный. Показано, что при цене на органическое топливо 50 руб./кг и тарифах на покупную электроэнергию 7 руб./кВт·ч положительный экономический эффект может достигать 29 % годовых затрат предприятия на топливную составляющую и техническое обслуживание машин с ДВС.

#### Список литературы

- [1] Презентация Tesla Semi и Roadster 2.0. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=I0X8y4q7jfQ>.
- [2] Создана супербатарея для электромобиля. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iL9Ly6qlrE>.
- [3] Лукойл запустил солнечную электростанцию в Волгограде. URL: <http://www.lukoil.ru/PressCenter/Pressreleases/Pressrelease?rid=196304>.
- [4] О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности (вместе с «Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии»): постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449 (ред. от 27 сентября 2018 г.). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».

# ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА УЧАСТНИКА ОПТОВОГО РЫНКА ВСЛЕДСТВИЕ ОТКАЗОВ ОПОРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ КОМПЛЕКТНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Ивановский Д.А.  
АО «СО ЕЭС»  
Москва, Россия  
ivanovskiy-da@cdu.so

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Аварийные отказы комплектных экранированных генераторных токопроводов, как правило, приводят к останову блока электростанции. Основной причиной отказов является повреждение опорной изоляции фаз токопровода. Существующие способы поиска поврежденной изоляции, применяемые в комплексе противоаварийных работ, достаточно трудоемки и требуют значительных временных затрат, а использование аппаратуры, предназначенной для поиска повреждений в воздушных и кабельных линиях, неэффективно вследствие особенностей конструкции и дефектов. При этом отказ токопровода влечет за собой достаточно значительные экономические издержки, которые несет участник оптового рынка электроэнергии и мощности.

**Материалы и методы:** В ходе работы проведены теоретические исследования в области нормативно-правовой документации, определяющей штрафные коэффициенты для объектов генерации вследствие их аварийных остановов. Выполнен расчет экономического ущерба вследствие отказа токопровода для блоков различной мощности.

**Результаты:** На основании проведенных расчетов определена величина экономических издержек для участника оптового рынка электроэнергии и мощности, функционирующего в разных ценовых зонах.

**Выводы:** На основании полученной в результате расчетов величины экономического ущерба дано предложение о целесообразности проведения мероприятий по совершенствованию существующих методов выявления поврежденных опорных изоляторов.

**Ключевые слова:** диагностика опорной изоляции токопроводов, диагностика токопроводов, мониторинг опорной изоляции токопроводов, поиск повреждения опорной изоляции токопроводов, оценка экономического ущерба.

## THE WHOLESALE MARKET ECONOMIC DISADVANTAGE ASSESSMENT DUE TO SUPPORTING ISOLATOR FAILURE OF CURRENT LEADS OF GENERATORS

D. Ivanovsky  
Joint-stock Company "System Operator of the United Power System"  
Moscow, Russian Federation  
ivanovskiy-da@cdu.so

## Abstract

**Background:** Generators' enclosed current leads failures may lead to stop power plant generating unit. The main reason of failures is break of current lead supporting isolator. Current methods of damage scanning using in accident-prevention complex are very time-consuming. Facility application for damage scanning in OHL and cable lines inefficient due to speciality of design and damage. The current lead failure leads to economic disadvantages to wholesale market participant.

**Materials and methods:** The theoretical research of regulatory documents was done about penalty factor for generating units due to emergency stops. The economic disadvantage calculation was done due to current lead failures for generating units with different rated capacity.

**Results:** In virtue of calculations the economic disadvantage value was determined for wholesale market participant in different bidding zones.

**Conclusions:** In virtue of economic disadvantage value the provision of necessity of current supporting isolator failures scanning methods development was done.

**Key words:** current lead supporting isolator scanning, current leads scanning, current lead supporting isolator monitoring, economic disadvantage assessment.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации показывает, что срок надежной работы опорного фарфорового изолятора не превышает 15–20 лет, после чего требуется его замена, так как дальнейшее снижение механической и электрической прочности фарфора приводит к повреждению изолятора [1].

Изменение свойств опорной изоляции в процессе эксплуатации оборудования и ее разрушение являются результатом комплексного воздействия электрического поля, температуры, увлажнения, вибрации, химически агрессивных продуктов. При этом интенсивность воздействия каждого фактора может быть различной и в зависимости от этого могут изменяться в худшую сторону свойства изоляции [2].

Основными видами повреждений фарфоровой изоляции комплектных генераторных токопроводов являются перекрытия изоляторов вследствие их загрязнения, их пробой из-за нарушения изоляционной части, перекрытия вследствие заводских механических дефектов опорных изоляторов (таблица).

СВЕДЕНИЯ ОБ ОТКАЗАХ ОПОРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ТОКОПРОВОДОВ

Электростанция	Тип изолятора	Число перекрытых изоляторов
Рязанская ГРЭС	ОФР-20-750	1
Рязанская ГРЭС	ОФР-20-750	2
Заинская ГРЭС	ОФР-20	2
Нижновэнерго	ОФР-20-500	1
Ставропольская ГРЭС	ОФР-20-750	1
Ивановская ТЭС	ИОР-10-7	2
	ИОР-10-7	7

Также в последнее время в опорной изоляции токопроводов все большую долю начинают занимать полимерные изоляторы. Среди основных повреждений у данного типа изоляции стоит отметить следующие:

- 1) образование трека на поверхности защитной оболочки и, как следствие, его эрозия;
- 2) образование дендритных каналов в стеклопластиковом стержне и треков на границе раздела «стержень – оболочка», сопровождающееся внутренней эрозией защитной оболочки изолятора вплоть до появления сквозных отверстий;
- 3) «хрупкий излом», возникающий в результате разрушения волокна под действием кислот, которые образуются при частичных разрядах в изоляторе во влажной среде.

В настоящее время для выявления поврежденной изоляции токопроводов объемом и нормами испытаний оборудования предусмотрены следующие их виды [3]:

- измерение сопротивления изоляции;
- испытание изоляции токопровода повышенным напряжением промышленной частоты.

Вышеуказанные методы испытаний зачастую не дают полной картины о состоянии опорной изоляции генераторных токопроводов и, как следствие, не обладают достаточной степенью эффективности.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНИЖАЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВСЛЕДСТВИЕ ОТКАЗА ТОКОПРОВОДА

Отключение блока электростанции, работающей на оптовом рынке, ведет к экономическим издержкам вследствие недоотпуска электроэнергии и мощности.

Объем недопоставки мощности рассчитывается с помощью ряда понижающих коэффициентов, установленных «Правилами оптового рынка электрической энергии и мощности», утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 1172 (далее – Правила) [4]:

- 1,9 – при несоблюдении и неуведомлении участником оптового рынка Системного оператора (далее – СО) об изменении состава генерирующего оборудования за 4 или более часов до времени фактической поставки мощности, а также если изменение состава генерирующего оборудования может привести к возникновению (угрозе возникновения) аварийных электроэнергетических режимов Единой энергетической системы (далее – ЕЭС) России;
- 1,25 – при изменении максимального или минимального значений мощности генерирующего оборудования по сравнению с величиной, указанной в уведомлении на сутки вперед, если участник оптового рынка сообщил СО о данном изменении не позднее, чем за 4 часа до момента фактической поставки мощности. При этом указанное изменение не должно приводить к возникновению либо угрозе возникновения аварийных электроэнергетических режимов ЕЭС России;
- 1,075 – при снижении максимальной мощности генерирующего оборудования, указанной в уведомлении о составе и параметрах генерирующего оборудования, поданном в СО до начала конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед в ценовых зонах оптового рынка;
- 0,3 – при снижении максимальной мощности генерирующего оборудования, указанной в уведомлении о его составе и параметрах, поданном в СО до начала периода, когда осуществляется выбор состава включенного генерирующего оборудования и находящегося в резерве в связи с проведением его ремонта.

## III. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ВСЛЕДСТВИЕ НЕДОПОСТАВКИ МОЩНОСТИ

В качестве начальных условий для определения недопоставки электроэнергии и мощности рассмотрим пример отказа токопровода блока 300 МВт с его дальнейшим отключением. При этом блок работал без снижения мощности с начала месяца, а отказ произошел в начале операционных суток (рис. 1). Из опыта эксплуатации известно, что для отыскания отказавшего изолятора генераторного токопровода требуется от 3 до 5 суток.

Среднемесячный объем недопоставки мощности равен произведению коэффициента снижения  $\Delta n$  и длительности его действия  $t_{\Delta n}$ , определенного Правилами:

$$k = \frac{\Delta n \cdot t_{\Delta n}}{720}, \quad (1)$$

где 720 – количество часов в месяце.

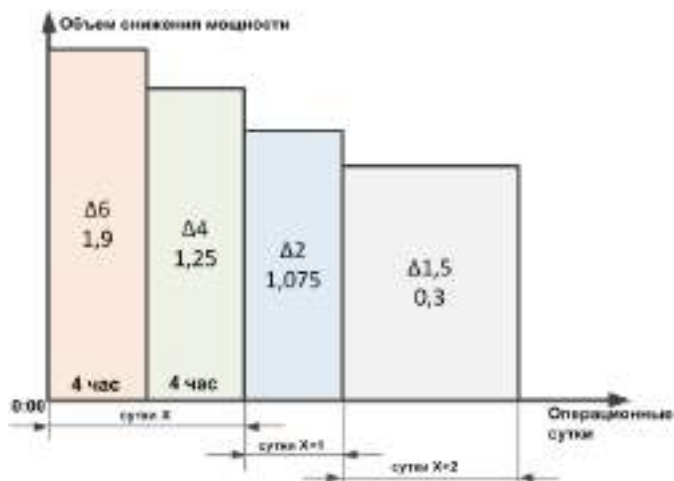


Рис. 1 – Определение недопоставки мощности

Суммарный объем недопоставки мощности  $k_{\text{сумм}}$  за время, необходимое для отыскания поврежденного изолятора, составляет:

$$k_{\text{сумм}} = \frac{\Delta 6 \cdot t_{\Delta 6} \cdot \Delta 4 \cdot t_{\Delta 4} \cdot \Delta 2 \cdot t_{\Delta 2} \cdot \Delta 1,5 \cdot t_{\Delta 1,5}}{720} = \frac{1,9 \cdot 4 + 1,25 \cdot 4 + 1,075 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4}{720} = 0,087. \quad (2)$$

Соответственно, объем недопоставки для блока 300 МВт составит:

$$N = 300 \cdot K \cdot k_{\text{сумм}} = 300 \cdot 0,5025 \cdot 0,087 = 13,115 \text{ МВт}, \quad (3)$$

где  $K$  – совокупный коэффициент использования установленной мощности электростанций, функционирующих в ценовых зонах оптового рынка [5].

Соответственно для блоков 240 и 120 МВт объем недопоставки равен 10,49 и 5,25 МВт.

Экономический ущерб участника оптового рынка составит:

1. Для блока 300 МВт электростанции первой ценовой зоны по стоимости конкурентного отбора мощности 111 тыс. руб./МВт:

$$N = 13,115 \cdot 111 = 1\,455,765 \text{ тыс. руб.}$$

2. Для блока 300 МВт электростанции второй ценовой зоны по стоимости конкурентного отбора мощности 186 тыс. руб./МВт:

$$N = 13,115 \cdot 186 = 2\,439,39 \text{ тыс. руб.}$$

При этом для вновь введенных блоков электростанций, построенных в рамках договора о предоставлении мощности, экономический ущерб может увеличиться в несколько раз.

#### IV. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ВСЛЕДСТВИЕ НЕДООТПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Экономический ущерб вследствие недоотпуска электроэнергии для блока 300 МВт определяется как произведение количества часов простоя блока  $T_{\text{блока}}$ , его

мощности  $P_{\text{блока}}$  и средней цены электроэнергии рынка на сутки вперед  $Z$ , составляющей на 1 июня 2018 г. 1,147 руб./МВт·ч [6]:

$$M = P_{\text{блока}} \cdot K \cdot T_{\text{блока}} \cdot Z = 300 \cdot 0,5025 \cdot 72 \cdot 1,147 = 12\,449,538 \text{ тыс. руб.}$$

#### V. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТОКОПРОВОДОВ

Существующие методы обнаружения поврежденной изоляции токопроводов целесообразно разделить на разрушающие и неразрушающие.

К разрушающим методам можно отнести импульсный метод обнаружения поврежденной изоляции. Принцип метода заключается в подаче разряда на поврежденную фазу токопровода через разрядник конденсатора до его полного разрушения (рис. 2, а). Положительной стороной данного метода является сокращение времени на поиск поврежденного изолятора, точное выявление места дефекта. К отрицательной стороне относится ограниченность применения метода (токопровод с секционированными экранами, легкий доступ к токопроводу и т. п.), а также невозможность выявить поврежденный изолятор в процессе эксплуатации блока.

К неразрушающим методам относятся следующие:

1. Испытание изоляции токопровода повышенным напряжением частоты 50 Гц при пуске и капитальных ремонтах.
2. Измерение сопротивления изоляции токопровода.
3. Индукционное обследование токопровода.
4. Акустическое обследование токопровода.
5. Обследование токопровода на наличие частичных разрядов.
6. Тепловизионное обследование токопровода.

Суть методов, связанных с испытанием изоляции токопровода повышенным напряжением промышленной частоты и измерением ее сопротивления, заключается в многократном подъеме переменного напряжения до 30 кВ с приложением его в течение 10–15 мин и последующим «ощупыванием» изоляторов на нагрев (рис. 2, б), а при проведении замера сопротивления изоляции значение должно быть не менее 0,1 МОм.

Вышеуказанные методы достаточно длительны, обладают высокой погрешностью, невозможностью проведения испытаний при эксплуатации блока, требуют значительных трудозатрат.

Более оптимальным выглядит применение индукционного и акустического методов, суть которых заключается в фиксации звуковых колебаний над местом повреждения. При этом основным недостатком методов также является невозможность их применения в процессе эксплуатации блока.

К методам, обеспечивающим контроль изоляции в процессе эксплуатации, относятся обследование токопровода на наличие частичных разрядов и тепловизионное обследование (рис. 3).



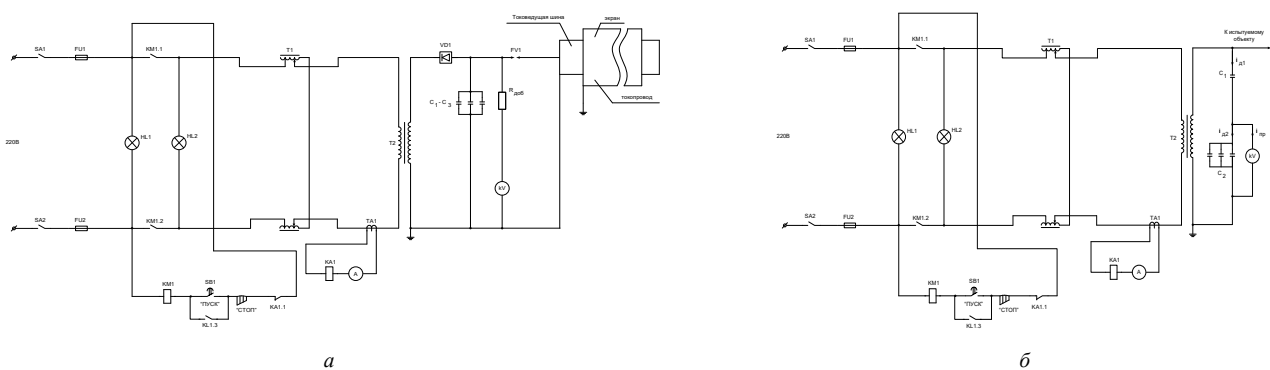


Рис. 2 – Принципиальные электрические схемы: а – отыскания дефектных изоляторов импульсным методом; б – установки для испытания изоляции токопроводов повышенным напряжением промышленной частоты



Рис. 3 – Локальный перегрев опорного изолятора токопровода

С помощью указанных методов имеется возможность с достаточной точностью определить как место повреждения изолятора, так и наличие развивающегося дефекта (например, частичные разряды), что позволит заранее предусмотреть вывод блока в ремонт и избежать экономических издержек вследствие аварийного отключения.

Существующий рынок услуг в области проведения энергетических обследований и электрических замеров предлагает широкий спектр различных компаний. Стоимость проведения варьируется от 2 500 руб. за замер до 2 500 тыс. руб. с полным комплексом измерительных работ и техническими рекомендациями.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения стоит отметить, что суммарный экономический ущерб участника оптового рынка, работающего в первой ценовой зоне, при минимальной оценке составит 13 905,303 тыс. руб. и он будет возрастать с увеличением мощности блока, времени отыскания поврежденного изолятора, а также, если на электростанцию накладывались дополнительные понижающие коэффициенты, по иным причинам. При этом методы испытаний опорной

изоляции, определенные их объемами и нормами, длительны, трудоемки, требуют значительных трудозатрат, а также, в силу ряда особенностей, не способны выявить развитие дефекта в процессе эксплуатации блока.

В то же время существует достаточное количество методов и технологий, обладающих высокой эффективностью, низкой стоимостью и позволяющих оперативно проводить контроль изоляции в процессе эксплуатации и выявлять поврежденные изоляторы токопроводов.

Учитывая вышесказанное, возникает необходимость внесения изменений в «Объем и нормы испытаний электрооборудования» в части новых методов и средств оценки состояния опорной изоляции комплектных экранированных генераторных токопроводов.

## Список литературы

- [1] Ивановский Д.А. Проблема диагностирования опорных изоляторов генераторных токопроводов // Кибернетика энергетических систем: матер. Всерос. науч. молодеж. конф. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск, 2011. 80 с.
- [2] Ивановский Д.А. Возникновение частичных разрядов в опорных изоляторах генераторных токопроводов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск, 2013. Т. 1. 610 с.
- [3] РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования: утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» от 8 мая 1997 г.
- [4] Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172.
- [5] Отчет об объемах поставленной на оптовый рынок мощности в 2017 году. М., 2018.
- [6] URL: [www.br.so-cdu.ru](http://www.br.so-cdu.ru).

# УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В ЕЭС РОССИИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Ишкова Е.М.  
АО «СО ЕЭС»  
Москва, Россия  
elena\_ishkova@inbox.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Управление спросом на электроэнергию в современной электроэнергетике стало надежным и востребованным механизмом обеспечения баланса производства и потребления. Внедрение этого механизма, как правило, начинается с потребителей оптового рынка. В России такой механизм, получивший название ценозависимого снижения потребления, функционирует с 2017 г. При этом ресурс управления спросом оптовых потребителей ограничен в силу относительно небольшого количества таких потребителей, которые, являясь профессиональными участниками оптового рынка, используют все доступные инструменты оптимизации затрат на электроэнергию даже в отсутствие механизмов явного управления спросом. Кроме того, значительный потенциал управления спросом сосредоточен у потребителей розничного рынка. Однако ресурс управления спросом отдельного розничного потребителя слишком мал, чтобы удовлетворять требованиям, предъявляемым на оптовом рынке, а издержки на взаимодействие с инфраструктурой оптового рынка слишком высоки. Поэтому вовлечение в управление спросом средних и малых потребителей, включая потребителей розничного рынка требует применения специальных методов и инструментов управления спросом, которые рассматриваются в настоящей работе.

**Материалы и методы:** Анализ мировой практики управления спросом на электроэнергию, анализ функционирования ценозависимого потребления (ЦЗСП) на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) в России.

**Результаты:** Предложены варианты развития управления спросом в ЕЭС России, а также вовлечения в управление спросом новых групп потребителей, включая бытовых.

**Выводы:** Управление спросом широко распространено в мировой практике и начало распространяться в ЕЭС России, где имеется значительный потенциал развития этого механизма. Эффективность применения ЦЗСП на оптовом рынке может быть повышена путем вовлечения большего числа потребителей за счет усиления финансовых стимулов. Для вовлечения в управление спросом розничного рынка необходимо создавать специализированные организации-агрегаторы, обеспечивающие участие в управлении спросом розничных потребителей и выступающие посредниками между ними и структурой оптового рынка. Значительный потенциал участия в управлении спросом имеют бытовые потребители, привлечение которых требует использования особых инструментов, таких как поведенческое управление спросом.

**Ключевые слова:** управление спросом на электроэнергию.

## DEMAND RESPONSE IN RUSSIA. CURRENT SITUATION AND DEPLOYMENT OPPORTUNITIES

E. Ishkova  
“SO-UPS”, JSC  
Moscow, Russia  
elena\_ishkova@inbox.ru

## Abstract

**Background:** Demand response in the modern power systems has become a reliable and relevant tool to ensure the balance of production and consumption. As a rule, the deployment of this mechanism starts with customers in wholesale market. Implementation of demand response in the wholesale electricity market in Russia started in 2017. Yet, the resource of wholesale consumers is limited due to a relatively small number of such consumers, who, being professional participants of the wholesale electricity market, use all available tools to optimize energy costs even in the absence of explicit demand response. At the same time, a significant potential of demand response is concentrated in the retail market. However, a resource of the individual retail consumer is too small to meet the requirement of the wholesale market. Moreover, the costs of communication with wholesale market infrastructure are too high. Therefore, the demand response engagement of small and medium consumers requires using special methods and tools, which are reviewed in this work.

**Materials and Methods:** Review of the world practice in demand response, analysis of demand response in Russian wholesale market.

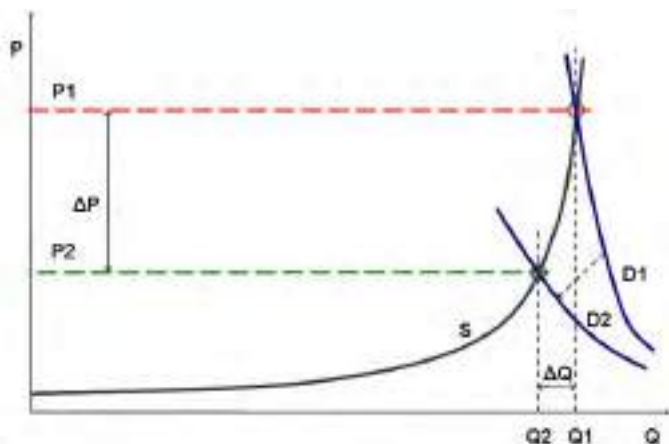
**Results:** Introduced deployment possibilities in Russian demand response. Moreover, proposed engagement of new groups of customers, including residential sector.

**Conclusions:** Demand response is widespread in the world and has started to spread in Russia with significant development potential. Engaging customers using the enhanced financial incentives can increase the efficiency of the demand response in Russian wholesale electricity market. Also this can be achieved by creating specialized aggregators for engaging the demand response in the retail market. In addition, considerable demand response potential in the residential sector can be untapped using special tools such as behavioral demand response.

**Key words:** demand response.

## I. ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие управление спросом стало полноценным инструментом обеспечения баланса спроса и предложения в энергосистемах. Управление спросом на электроэнергию – это изменение потребления электроэнергии конечными потребителями относительно их нормального профиля нагрузки в ответ на изменение цен на электроэнергию во времени или в ответ на стимулирующие выплаты, предусмотренные чтобы снизить потребление в периоды высоких цен на электроэнергию на оптовом рынке или когда системная надежность под угрозой. Управление спросом может снижать цены на электроэнергию на оптовом рынке, что, в свою очередь, приводит к снижению цен на розничном рынке. Объяснение эффекта от участия потребителей в управлении спросом представлено на рисунке. Кроме того, целями управления спросом являются предотвращение избыточного капиталоемкого строительства пиковых электростанций и электрических сетей, противоаварийное управление энергосистемой и интеграция возобновляемых источников энергии. [1].



Влияние управления спросом на цену на электроэнергию

Согласно [2] регулировочные возможности потребителей, участвующих в управлении спросом, вырастут с примерно 39 ГВт в 2016 г. до 144 ГВт в 2025 г. по всему миру. Потенциал управления спросом для ЕЭС (в ценовых зонах) может составить 6–10 ГВт для первой ценовой зоны и 2–3 ГВт для второй ценовой зоны, суммарно до 13 ГВт [3]. При этом, каждый дополнительный гигаватт по договору на поставку мощности (ДПМ) и аналогичным механизмам возврата инвестиций обходится российским потребителям более чем в 10 млрд руб. ежегодно, или 0,5 % от конечной цены [4].

Существует два основных подхода вовлечения потребителей к управлению спросом: явное и неявное. Явное

управление спросом реализуется путем управления нагрузкой потребителя посредством команд (голосовых, текстовых) на снижение нагрузки оборудования либо автоматизированного или автоматического управления нагрузкой потребителя из диспетчерского центра. Неявное управление спросом предполагает использование потребителями различных видов дифференцированных по времени тарифов на электроэнергию и/или услуги по ее передаче, которые отражают стоимость электроэнергии и/или ее передачи в различные периоды времени. Например, тариф, изменяющийся в режиме реального времени (RTP – real time pricing), зависит от стоимости электроэнергии в момент потребления и обычно определяется для каждого часа суток. Тариф с критическим пиком потребления (CPP – critical peak pricing) предполагает, что в случае ожидания оператором рынка электроэнергии высоких цен или сложных условий функционирования энергосистемы объявляется критический пик потребления со значительным увеличением цены в этот период и др. Такие тарифы предоставляют пользователям постоянные ценовые сигналы для стимулирования снижения потребления в периоды высоких цен на электроэнергию. Важно, что явное и неявное управление спросом не заменяют друг друга. В то время как явное управление спросом обеспечивает возможность потребителя влиять на баланс производства и потребления на оптовом рынке, неявное управление спросом потенциально обеспечивает больший охват потребителей.

## II. УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ОРЭМ

В электроэнергетике России уже существуют отдельные элементы управления спросом. Исторически некоторые потребители подключались под действие систем противоаварийной автоматики. На розничном рынке реализовано неявное управление спросом, которое представляет дифференцированные по зонам суток тарифы. А начиная с 2017 г. в России функционирует механизм явного управления спросом потребителей оптового рынка, получивший название ценозависимого снижения потребления. Потребители оптового рынка получили возможность получать оплату за добровольное участие в программе, предусматривающей снижение нагрузки по сигналу от инфраструктуры оптового рынка. Потребитель продает свои обязательства по разгрузке на конкурентном отборе мощности (КОМ) и получает снижение оплаты мощности в объеме цены КОМ независимо от количества разгрузок. Снижение потребления учитывается в спросе на мощность в КОМ. Объем снижения потребления не может быть менее 5 МВт, количество разгрузок не может превышать 10 раз в месяц. Разгрузки происходят в период высоких цен на рынке электроэнергии. Эффект от разгрузки определяется с помощью расчета цен на электроэнергию

на рынке на сутки вперед (PCB): с разгрузкой и без разгрузки. При наличии экономического эффекта в виде снижения цены PCB не менее чем на 1 % потребитель получает торговый график с учетом разгрузки на величину, заявленную в КОМ. График с учетом разгрузки потребитель получает накануне до 19 часов. В случае отсутствия в течение месяца дней, когда выполняются условия для разгрузки потребителей, предусмотрено проведение тестирования для подтверждения способности потребителя снижать нагрузку.

В 2017 г. в ЦЗСП приняли участие 4 потребителя оптового рынка. Максимальное количество разгрузок в месяц не превышало двух. В результате расчета PCB с разгрузкой и без разгрузки максимальное снижение цены составило 5,37 % во второй ценовой зоне, а максимальное снижение объема – 64 МВт. Несмотря на существенное снижение цены рынка, совокупный экономический эффект в первый год функционирования механизма оказался незначительным за счет небольшого количества участников и малого числа разгрузок.

Проблему малого количества потребителей можно решить, повысив финансовый стимул [4], а также привлекая потребителей розничного рынка, в том числе бытового сектора.

### III. УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА РОЗНИЧНОМ РЫНКЕ

Внедрение механизма управления спросом, как правило, начинается с потребителей оптового рынка. Но этот ресурс ограничен в силу относительно небольшого количества таких потребителей, которые являясь профессиональными участниками оптового рынка, максимально оптимизировали свои затраты за счет всех доступных механизмов, даже до появления явного управления спросом. По оценкам Международного энергетического агентства значительная часть потенциала управления спросом сосредоточена у потребителей розничного рынка – средних и малых потребителей, а также в бытовом секторе.

В качестве примера розничного потребителя, имеющего технологическую возможность участия в управлении спросом, можно рассмотреть ледовый дворец в г. Ленинск-Кузнецком, участвовавший в проведении натурного эксперимента по разгрузке электрооборудования в ноябре 2017 г. Перераспределив работу холодильной машины, участник смог обеспечить снижение электропотребления в назначенные АО «СО ЕЭС» часы без ущерба для технологического процесса и без изменения суточного объема электропотребления.

Ресурс управления спросом отдельного розничного потребителя слишком мал, чтобы удовлетворять требованиям, предъявляемым на оптовом рынке, а издержки на взаимодействие с инфраструктурой оптового рынка слишком высоки. Механизмы трансляции экономического эффекта от снижения нагрузки на оптовом рынке розничному потребителю также отсутствуют. Поэтому использование этого потенциала требует специальных нормативных, организационных и технических решений. В мировой практике решением, обеспечивающим участие в управлении спросом розничных потребителей, стало создание специализированных организаций – агрегаторов нагрузки. Агрегаторы нагрузки – это участники оптового рынка электроэнергии, которые управляют изменением нагрузки оборудования группы потребителей, чтобы продавать совокупность регулировочных способностей этих потребителей

как единый объект в качестве товара/услуги на оптовом рынке и/или на рынке системных услуг. Создание агрегаторов нагрузки на оптовом рынке электроэнергии и мощности в России предлагается проводить в два этапа. На первом этапе проводятся пилотные проекты, предполагающие оплату деятельности агрегаторов в качестве вида услуг по обеспечению системной надежности. На втором этапе предполагается непосредственное участие агрегаторов нагрузки в работе оптового рынка. Пилотные проекты предполагается проводить в течение 2019–2020 гг.

### IV. ПОВЕДЕНЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ

Исторически сложилось, что коммерческие и промышленные потребители более вовлечены в процесс управления спросом, чем бытовые. Программы управления спросом и энергоэффективности в коммерческом и промышленном секторах почти всегда имеют более высокую эффективность по отношению к затратам, чем в бытовом. Кроме того, в условиях относительно невысоких затрат на электроэнергию многие потребители не готовы снижать привычный уровень комфортного отопления или освещения [5]. Поэтому бытовых потребителей сложно вовлекать в управление спросом. Тем не менее, в мировой практике существуют способы повысить участие бытовых потребителей в управлении спросом, включая корректировку существующих программ, применение новых технологий, обеспечивающих доступность динамического ценообразования, а также новые модели управления спросом.

Развитие методов анализа «больших данных», поведенческих наук, систем интеллектуального учета электроэнергии, коммуникационных технологий и социальных медиа предоставляет новые возможности для формирования методов экономически эффективного вовлечения бытовых потребителей в управление спросом, получивших название поведенческого управления спросом (англ. *behavioral demand response*) [5].

Поведенческое управление спросом обеспечивает вовлечение потребителей путем организации с ними персонализированной коммуникации, в том числе в режиме, близком к режиму реального времени, с формированием стимулов, основанных на поведенческой психологии. Тем самым происходит обеспечение получения пользователем постоянной обратной связи, обеспечивающей возможность динамичной корректировки его поведения. Интерес, который побуждает потребителя участвовать в поведенческом управлении спросом и менять своё поведение, может усиливаться с помощью геймификации – использования в неигровых процессах подходов, характерных для компьютерных игр.

Поведенческое управление спросом использует данные интеллектуальных счетчиков для формирования и своевременного предоставления персонализированной информации каждому потребителю по выбранному им каналу связи и мотивирует их снизить потребление в периоды пиковой нагрузки, например в жаркие дни, когда высока нагрузка систем кондиционирования.

Ключевые черты поведенческого управления спросом:

- формирование поведенческих стимулов за счет коммуникации с потребителем путем создания персонализированной обратной связи на базе информации систем интеллектуального учета

электроэнергии с использованием анализа «больших данных»;

- финансовый стимул в явном виде, как правило, отсутствует;
- как правило, не предполагается установки каких-либо устройств и приборов у потребителя (за исключением интеллектуальных счетчиков);
- массовость программ поведенческого управления спросом, которые организуются по принципу opt-out (подписка по умолчанию).

Типичная программа поведенческого управления выглядит следующим образом. Энергетическая компания совместно с разработчиком технического решения направляет потребителям приветственное письмо о начале действия программы, содержащее ее описание и предупреждение о дальнейшей рассылке сообщений. После этого за сутки до ожидаемого пика потребления отправляется уведомление о предстоящей разгрузке, которое содержит также информацию о том, каким образом потребитель может снизить свое потребление во время события. Непосредственно перед его наступлением направляется уведомление о старте. В это время потребителю необходимо максимально снизить свое потребление. Последний этап рассылки включает в себя отчет по результатам события, включающий в себя сравнение с показателями соседей.

Проведенные пилотные проекты продемонстрировали заметное (в среднем около 3 %) снижение нагрузки участвующих потребителей при высоком уровне вовлеченности (70–90 % потребителей, подписанных на участие в программах, принимали участие в снижении нагрузки). Кроме того, в большинстве пиковых событий по разгрузке количество участвовавших потребителей достигало 70–90 %. Проведенные опросы участвующих потребителей продемонстрировали также высокую степень их удовлетворенности участием в программах. Однако на текущий момент отсутствует опыт длительного применения таких программ, что затрудняет долгосрочное прогнозирование устойчивости вовлеченности потребителей [6, 7].

Основным преимуществом механизма поведенческого управления спросом является отсутствие технических устройств на стороне потребителя (кроме интеллектуальных счетчиков), что значительно снижает финансовые вложения и упрощает процесс внедрения механизма. Кроме того,

такой механизм повышает эффективность существующих программ управления спросом и энергоэффективности. Также отсутствие финансового стимула позволяет быстро без изменения нормативной базы внедрять механизм среди бытового потребителя.

## V. ВЫВОДЫ

Управление спросом широко распространено в мировой практике и начало распространяться в ЕЭС России, где имеется значительный потенциал развития этого механизма. Эффективность применения ЦСЗП на оптовом рынке может быть повышена путем вовлечения большего числа потребителей за счет усиления финансовых стимулов, а также уточнением критериев «срабатывания» разгрузки. Важным направлением повышения объемов управляемой нагрузки является вовлечение в управление спросом потребителей розничного рынка. Для этого необходимо создавать специализированные организации-агрегаторы, обеспечивающие участие в управлении спросом розничных потребителей и выступающие посредниками между ними и структурой оптового рынка. Значительный потенциал участия в управлении спросом имеют бытовые потребители, привлечение которых требует использования особых инструментов. Одним из таких инструментов является поведенческое управление спросом.

## Список литературы

- [1] Re-powering markets. Market design and regulation during the transition to low-carbon power systems (англ.) Международное энергетическое агентство (March 2016). URL: <https://www.iea.org/publications/free-publications/publication/REPOWERINGMARKETS.PDF>.
- [2] URL: <https://www.navigantresearch.com/newsroom/global-demand-response-capacity-is-expected-to-grow-to-144-gw-in-2025>.
- [3] Хохлов А. и др. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf).
- [4] Посыпанко Н. Особенности национального demand response // Энергорынок. 2017. № 6(151). С. 10–13.
- [5] Brett Feldman, Matthew Tanner, Cliff Rose. Peak demand reduction strategy // Navigant Consulting-Advanced energy economy. URL: [http://info.aee.net/hubfs/PDF/aee-peak-demand-reduction-strategy.pdf?\\_id=1446657847375](http://info.aee.net/hubfs/PDF/aee-peak-demand-reduction-strategy.pdf?_id=1446657847375).
- [6] Lucas Bressan, M.S., Ryan Hledik, M.S., Ahmad Faruqi, Ph.D. Demand Response Market Research 2016 to 2035: Portland General Electric // The Brattle group. URL: [http://files.brattle.com/files/5887\\_aemc\\_report.pdf](http://files.brattle.com/files/5887_aemc_report.pdf).
- [7] URL: <https://blogs.oracle.com/utilities/behavioral-demand-response-result>.

# АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ РЕКЛОУЗЕРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Карпов А.И.<sup>1</sup>, Акимов Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
<sup>2</sup>Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы»  
Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup>aikarpov.spbpu@gmail.com, <sup>2</sup>akimov@ntcees.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Эффективным и современным способом повышения надежности потребителей распределительных сетей является секционирование линий реклоузерами. Для оценки эффекта от установки реклоузеров и оценки уровня надежности используются различные интегральные индексы, такие как SAIFI, SAIDI, ASIFI, ARIE и др. При этом в различных нормативных документах упоминаются разные показатели, отсутствует единый методологический подход к оценке надежности. В данной работе проведена оптимизация расстановки реклоузеров по критериям наиболее часто встречающихся на практике показателей надежности, произведено сравнение результатов.

**Материалы и методы:** Используется алгоритм расчёта индексов надежности SAIFI, ASIFI, рассчитываются индексы, характеризующие эффективность инвестиций на реконструкцию сетей. Оптимизация производится с применением генетического алгоритма.

**Выводы:** Использование индексов надежности электроснабжения, учитывающих количество потребителей, является целесообразным, несмотря на то что они не учитывают мощности нагрузок. При реконструкции сетей с применением автоматических пунктов секционирования анализ вариантов расстановки с использованием показателей, характеризующих эффективность инвестиций, не является наглядным. В каждом случае решение определяется различными целевыми критериями, такими как требуемые заказчиком уровни того или иного индекса надежности или экономическая окупаемость.

**Ключевые слова:** реклоузер, распределительные электрические сети, надёжность электроснабжения потребителей, интегральные показатели надёжности, оптимизация, генетический алгоритм.

## ANALYSIS OF ELECTRICAL SUPPLY RELIABILITY INDICES USED FOR THE RECLOSERS INSTALLATION EFFICIENCY EVALUATION

A. Karpov<sup>1</sup>, D. Akimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
<sup>2</sup>JSC “Scientific and Technical Center of Unified Power System”  
Saint-Petersburg, Russian Federation  
<sup>1</sup>aikarpov.spbpu@gmail.com, <sup>2</sup>akimov@ntcees.ru

## Abstract

**Background:** The sectioning of lines by reclosers is efficient and modern way to increase the distribution networks consumers' reliability. To assess the effect of installing reclosers and the level of reliability, various integral indices are used, such as SAIFI, SAIDI, ASIFI, ARIE and others. At the same time, various normative acts mention different indicators, there is no single methodological approach to assessing reliability. In this paper, the arrangement of reclosers for the criteria most frequently met in practice for reliability indicators was optimized, the results were compared.

**Materials and methods:** The algorithm for calculating SAIFI and ASIFI reliability indexes is used; indices that characterize the efficiency of investments for the reconstruction of networks are calculated. Optimization is performed using a genetic algorithm.

**Conclusions:** The use of power supply reliability indexes that take into account the number of consumers is appropriate, despite the fact that they do not take into account the load capacities. When reconstructing networks using automatic partitioning points, the analysis of deployment options using indicators that characterize the effectiveness of investment is not clear. In each case, the solution is determined by different target criteria, such as the required levels of a certain reliability index or economic payback.

**Key words:** recloser, distribution systems, power supply reliability, optimization, genetic algorithm.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации в рамках Национальной технологической инициативы «Энерджинет» был разработан план мероприятий («дорожная карта») [1], в соответствии с которым предполагается изменение законодательства в области нормирования надёжности электроснабжения. Это потребует от сетевых компаний, владеющих распределительными сетями 6–35 кВ, выполнения соответствующих требований. Также высказываются предложения о стимулировании предприятий к повышению надёжности экономически, например регулированием тарифов, введением штрафов или поощрений. Следовательно, для сетевых организаций задача повышения надёжности электроснабжения является актуальной.

Эффективным способом повышения надёжности электроснабжения в распределительных сетях 6–35 кВ является секционирование воздушных линий (ВЛ) коммутационными аппаратами [2]. Для решения данной задачи могут использоваться специализированные аппараты – автоматические пункты секционирования (АПС).

Соответственно, при реконструкции линий с установкой АПС необходимо решить задачу определения оптимального количества внедряемых аппаратов, а также выявить, по какому принципу оценивается оптимальность выбранных технических решений. Следовательно, необходим анализ существующих индексов надёжности электроснабжения и показателей эффективности инвестиций на реконструкцию сетей.

## II. ИНДЕКСЫ НАДЕЖНОСТИ SAIFI И ASIFI

Наиболее универсальным АПС в воздушных линиях распределительных сетей среднего напряжения является реклоузер.

На рис. 1 представлена реализация принципов секционирования и децентрализованного управления аварийным режимом работы сети. При коротком замыкании, когда в конце процесса переключений выключенными остаются только реклоузеры, локализирующие место аварии, будет осуществлен автоматический ввод резерва.

Для оценки уровня надёжности электроснабжения как в России, так и за рубежом используются индексы, описанные в соответствующем стандарте IEEE [3]. В России используются некоторые из имеющихся в нём показателей, они прописаны в методических указаниях по расчету уровня надёжности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг от Министерства энергетики РФ [4], также в стандарте организации ПАО «Россети» [5]. Реконструкция линий электропередачи в распределительных сетях с установкой АПС заметно улучшает значения данных индексов надёжности.

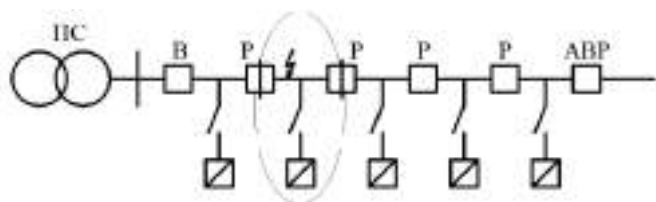


Рис. 1 – Децентрализованное управление аварийным режимом работы сети: Р – реклоузеры; АПС – реклоузер в качестве автоматического ввода резервного питания

Одним из наиболее используемых интегральных индексов надёжности электроснабжения является SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – средняя частота прекращения передачи электроэнергии потребителям в каждом расчетном периоде в пределах долгосрочного периода, рассчитываемая по формуле:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^I N_i}{N_t},$$

где  $N_i$  – количество потребителей, чьи устройства присоединены к объектам электросетевого хозяйства, в отношении которых произошёл  $i$ -й перерыв электроснабжения, шт.;  $N_t$  – максимальное за расчетный период число потребителей, шт.;  $I$  – количество перерывов электроснабжения потребителей в расчетном периоде, шт.

Существует 3 вида показателей:

- 1) экономические (RNRE, ARAE, ARIE, RDCO);
- 2) показатели, выражающиеся через число отключаемых потребителей (SAIFI, SAIDI, CAIDI, CTAIDI, ASAI, ASUI, CAIFI);
- 3) показатели, выражающиеся через мощность отключаемых потребителей (ASIFI, ASIDI, ENS, EENS).

Показатели из одной группы связаны между собой через константы, и потому результаты расстановок реклоузеров и оценки для них идентичны. Рассмотрим для первой группы ARIE, для второй SAIFI, для третьей ASIFI.

Учёт мощности потребителей (при поиске оптимальных мест установки АПС) может дать больший экономический эффект от снижения стоимости недоотпущенной электрической энергии.

Индекс надёжности ASIFI (Average System Interruption Frequency Index) отражает среднюю частоту перерывов электроснабжения системы и рассчитывается по формуле:

$$ASIFI = \frac{\sum_{i=1}^I L_i}{L_t},$$

где  $L_i$  – мощность потребителей электрической энергии, в отношении которых произошло  $i$ -е прекращение ее передачи в рамках технологического нарушения, кВА;  $L_t$  – суммарная мощность потребителей электрической энергии, кВА.

Рассмотрим схему электрической сети, расположенной в Калининградской области, филиал АО «Янтарьэнерго», Большаковский РЭС (рис. 2). Используя генетический алгоритм, найдём места оптимальной установки реклоузеров в схеме [6], соответствующие наименьшим значениям индексов надёжности SAIFI и ASIFI.

Повреждаемость ветвей принята пропорциональной длине линий. Значение индексов надёжности электроснабжения потребителей до установки реклоузеров: SAIFI = 2, ASIFI = 2. Составим таблицу, в которой укажем зависимость значений показателей от количества устанавливаемых АПС, а также номера ветвей, найденных алгоритмом оптимизации (табл. 1). Расстановка, полученная для случая с четырьмя реклоузерами, отображена на рис. 2.

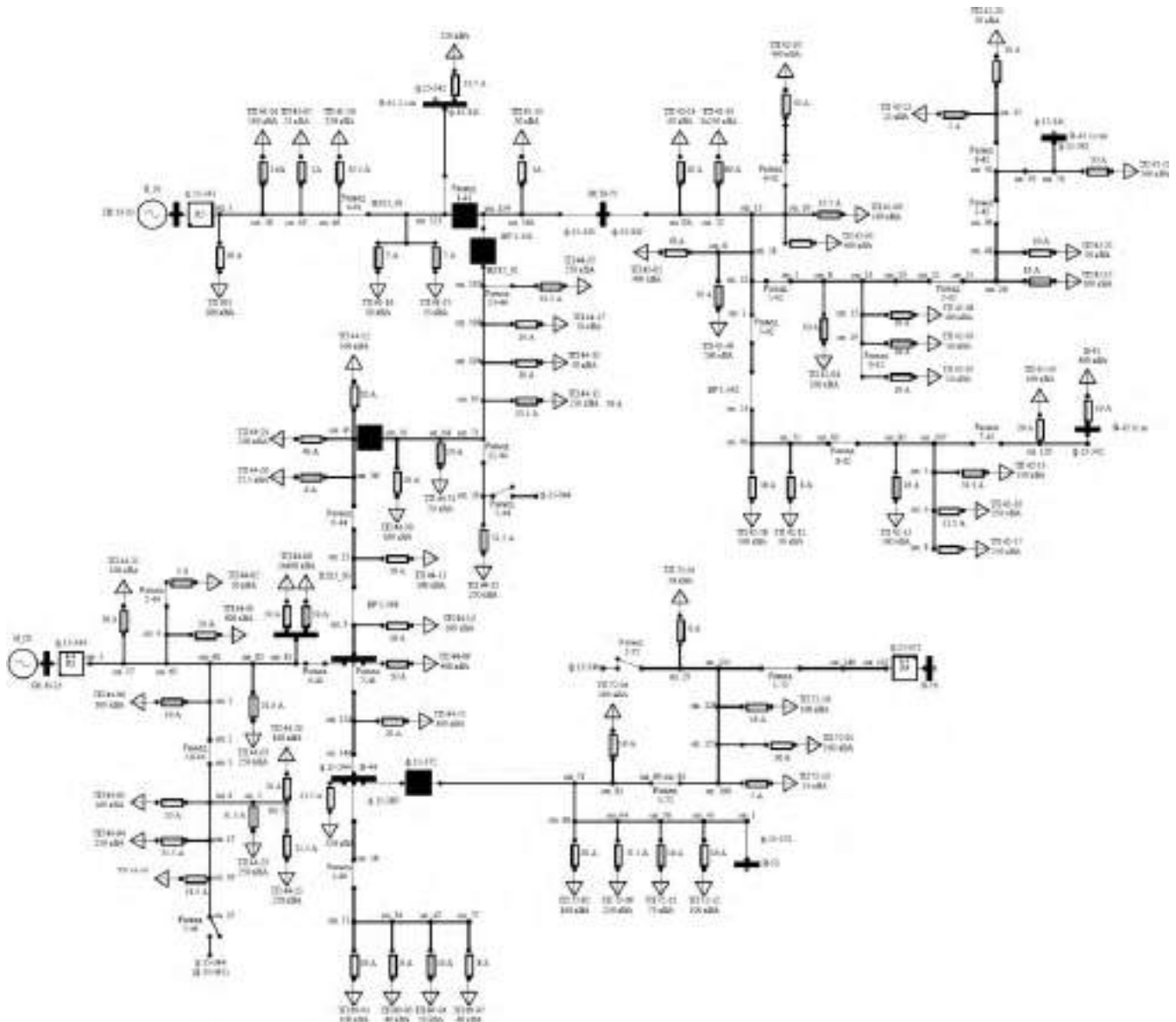


Рис. 2 – Схема исследуемой электроэнергетической системы, где черным цветом выделены оптимальные места установки четырех АПИС

По результатам работы алгоритма были получены одинаковые наборы ветвей при поиске с учётом оптимального значения как ASIFI, так и SAIFI.

Таблица I – ЗАВИСИМОСТЬ SAIFI И ASIFI ОТ КОЛИЧЕСТВА УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В СХЕМУ РЕКЛУЗЕРОВ

$N_{рек}$	SAIFI	ASIFI	№ ветвей	
			оптимум SAIFI	оптимум ASIFI
0	2,00	2,00	–	–
1	1,00	1,00	26	26
2	0,71	0,70	18, 44	18, 44
3	0,55	0,56	14, 18, 44	14, 18, 44
4	0,46	0,46	14, 18, 30, 57	14, 18, 30, 57
5	0,37	0,34	14, 18, 43, 57, 141	14, 18, 43, 57, 141

Для отражения разницы в расстановках по критериям SAIFI и ASIFI рассмотрена схема с увеличенной нагрузкой в узлах, примыкающих к ветвям от 121 до 161. Очевидно, что повышенное значение нагрузок в узлах

схемы учитывается при расчете индекса ASIFI и не учитывается по SAIFI. Результаты расчёта отображены в табл. II. Нужно уточнить, что номера опор в реальной сети отличаются от номеров узлов и ветвей расчётной модели.

ТАБЛИЦА II – РЕЖИМ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЧАСТИ НАГРУЗОК

Режим	$N_{рек}$	ASIFI	№ ветвей
До увеличения мощности	4	0,46	14, 18, 30, 57
После увеличения мощности	4	0,43	14, 18, 44, 141

При увеличении мощности части нагрузок значение индекса SAIFI не поменялось. Однако расстановка, полученная при поиске оптимальной величины показателя ASIFI, изменилась, что выразилось в отличии номеров ветвей для двух из четырёх реклузеров.

### III. ИНДЕКС НАДЕЖНОСТИ ARIE

Стандарт организации ПАО «Россети» [5] предписывает ориентироваться на «экономические» индексы надежности, например ARIE, а также дает рекомендации по установке



не более 3–4 реклоузеров на кольцевой фидер и не более 1–2 реклоузеров на радиальный. Очевидно, что для схемы с более сложной топологией данная рекомендация не ведет к оптимальным решениям, а также не позволяет однозначно определить наилучшее число устанавливаемых реклоузеров. Был построен график зависимости индекса ARIE от числа реклоузеров в расчетной схеме (рис. 3). Стоимость установки одного реклоузера условно принимается в 1 млн руб.

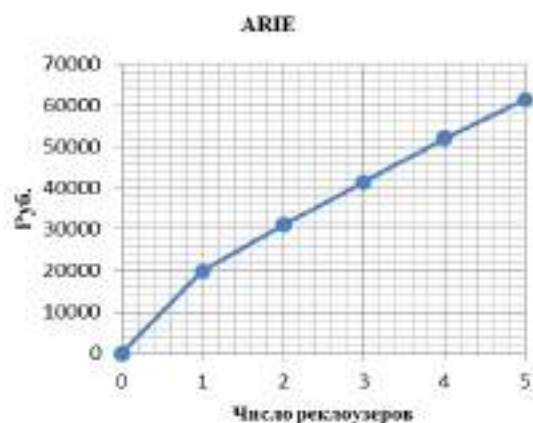


Рис 3 – Зависимость ARIE от числа установленных реклоузеров

Таким образом, поиск варианта реконструкции с наименьшим значением ARIE не может считаться приоритетным, так как чем меньше реклоузеров, тем ниже значение показателя. Использование индекса ARIE не дает окончательного ответа об оптимальном числе реклоузеров.

#### IV. Выводы

В работе была произведена оценка различных индексов надежности электроснабжения потребителей распределительных сетей. Учет показателей, использующих мощность потребителей, а не только их количество, даёт больший экономический эффект при реконструкции сетей.

Однако на примере реальной схемы получены результаты расстановок по индексам SAIFI и ASIFI, которые показывают, что применение показателей по критериям мощности и числа потребителей для подавляющего большинства дают одинаковое решение. Разницу между результатами расстановок стоит принимать во внимание только при наличии отдельных крупных потребителей.

Использование индексов надежности при поиске оптимального количества устанавливаемых АПС при реконструкции сетей требует некоторого субъективизма от заказчика. В каждом случае решение определяется различными целевыми критериями, такими как требуемые заказчиком уровни того или иного индекса надежности или экономическая окупаемость.

Таким образом, требуется дальнейшая методическая проработка вопроса нормирования индексов надежности электроснабжения.

#### Список литературы

- [1] План мероприятий «Энерджинет» Национальной технологической инициативы. URL: [http://fasie.ru/upload/docs/DK\\_energynet.pdf](http://fasie.ru/upload/docs/DK_energynet.pdf).
- [2] Воротницкий В., Бузин С. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6(10) кВ // Новости электротехники. 2005. № 3. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/11.php>.
- [3] 1366-2012 – IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices – Redline. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6329910/>
- [4] Об утверждении методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций: приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. № 1256.
- [5] СТО 34.01-2.2-033-2017. Линейное коммутационное оборудование 6–35 кВ – секционирующие пункты (реклоузеры) // Секционирующие пункты (реклоузеры). Т. 1, 2. URL: [http://www.rosseti.ru/investment/standart/corp\\_atandart/doc/СТО\\_34.01-2.2-033-2017\\_Tom\\_1.2.pdf](http://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_atandart/doc/СТО_34.01-2.2-033-2017_Tom_1.2.pdf).
- [6] Акимов Д.А., Грунина О.И., Карпов А.И., Шкитина Н.О. Повышение надежности электроснабжения потребителей распределительных сетей на основе оптимизации расстановки реклоузеров // Известия НТЦ ЕЭС. 2017. № 1. С. 102–113.

# ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И ЗАГРУЗКИ ВКЛЮЧЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ВЫРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ТЕПЛА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Колотыгина Е.К., Фролова Я.А.  
Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия  
ura20097@rambler.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В последнее время все большее внимание в России уделяется использованию распределённой генерации. При создании энергосистем с распределённой генерацией на основе газопоршневых или газотурбинных агрегатов, как правило, применяют технологию когенерации (комбинированную выработку электроэнергии и тепла). В данной статье исследовано влияние теплового потребления на загрузку генерирующего оборудования.

**Материалы и методы:** В качестве примера рассмотрен объект распределённой генерации с когенерационными газопоршневыми агрегатами. При расчётах использовалось математическое моделирование в программном обеспечении Microsoft Excel.

**Результаты:** Произведен расчет коэффициента применения топлива для имеющихся суточных графиков электрической и тепловой нагрузки при работе когенерационной установки в автономном режиме. Выявлены факторы, влияющие на коэффициент эффективного использования топлива: загрузка когенерационного оборудования по активной мощности и количество работающего оборудования. С учётом полученных результатов проведён расчёт коэффициента использования топлива при работе когенерационной установки параллельно с сетью, причём в итоге оптимизации удалось поднять значение коэффициента на 0,1–0,9 %.

**Выводы:** Подключение к энергосистеме позволяет варьировать генерируемую активную мощность, тем самым изменяя выработку тепловой энергии за счет когенерации, и снижать топливные затраты станции. При правильной оптимизации и работе параллельно с сетью можно добиться улучшения различных показателей, в том числе и более эффективного использования топлива на станции, что, в свою очередь, сократит издержки и выбросы в атмосферу.

**Ключевые слова:** когенерация, топливо, коэффициент эффективного использования топлива, тепловая нагрузка, электрическая энергия, тепловая энергия, распределённая генерация, оптимизация, режимы работы.

## OPTIMIZATION OF THE OPERATING EQUIPMENT'S COMPOSITION AND LOADING IN THE COMBINED HEAT AND POWER GENERATION IN SMALL POWER SYSTEMS

E. Kolotygina, Ja. Frolova  
Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation  
ura20097@rambler.ru

## Abstract

**Background:** In recent years there is an increasing attention to distributed generation in Russia. Distributed generation power systems often use cogeneration (combined heat and power generation) technology. In this paper, the influence of heat consumption at generating equipment loading in cogeneration system is investigated

**Materials and methods:** As an example of cogeneration system, the distributed generation object using gas piston units is taken. Math modeling and Microsoft Excel has been used for calculations .

**Results:** The coefficient of fuel utilization for daily power and heat load schedules has been calculated in case of cogeneration unit's island mode. Factors influencing on the coefficient of fuel utilization have been defined: the power loading of cogeneration equipment and the number of operating generators. In view of the foregoing, calculations for the daily schedules have been adjusted in case of connection the cogeneration plant to the system. As a result of optimization, it is managed to raise the coefficient of fuel utilization by 0,1–0,9 %.

**Conclusions:** Connection to the system allows to vary the generated active power thereby changing the generation of heat energy through cogeneration and to reduce the fuel costs of the station. With the correct optimization and connection to the system, it is possible to improve various indicators, including more efficient use of fuel at the station, which in turn will reduce costs and emissions into the earth's environment.

**Key words:** cogeneration, coefficient of fuel utilization, fuel, heat energy, power energy, distributed generation, optimization, gas piston units.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При создании энергосистем с распределенной генерацией на основе газопоршневых или газотурбинных агрегатов, как правило, используют технологию когенерации. Когенерация представляет собой комбинированную выработку электроэнергии и тепла. Она позволяет максимально применять энергию первичного топлива: при когенерации тепловая энергия не сбрасывается в атмосферу, а направляется на обогрев общественных и жилых зданий. Общий КПД энергетической станции в режиме когенерации составляет 80–95 %. Преимущества когенерационных установок не подвергаются сомнениям: увеличение КПД, высокая надежность работы, уменьшение затрат на передачу электроэнергии, электроснабжения потребителей в труднодоступных районах, возможность функционирования на биотопливе, снижение вредных выбросов в атмосферу, а также бесшумность и экологичность оборудования. Однако имеются проблемы при подключении распределенных генераторов к единой сети, что значительно затрудняет распространение когенерационных установок [1].

При управлении режимами систем с распределенной генерацией решается множество задач: поддержание частоты и напряжения на заданном уровне, сохранение баланса активной и реактивной мощностей. Также необходимо учитывать существующие ограничения, связанные с производством электроэнергии и поддержанием баланса активной мощности [2].

Кроме того, нагрузка генераторов должна производиться наилучшим образом. Можно придерживаться различных критериев оптимизации состава генерирующего оборудования: минимумы расхода топлива, пусков и остановов в течение суток, издержек, максимум прибыли. Различные авторы по-разному решают задачу оптимального состава и загрузки генерирующего оборудования системы с распределенной генерацией. В большинстве работ российских авторов выбор состава оборудования рассматривается еще на этапе проектирования станции [3–5]. Концепция распределенной генерации у зарубежных авторов выглядит немного иначе, включает в себя большую долю возобновляемых источников электроэнергии, что влечёт определённые последствия и свои особенности при планировании режима и выборе состава оборудования [6–8].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Когенерационная установка может работать как в автономном режиме (без подключения к энергосистеме), так и параллельно с сетью. В автономном режиме главной задачей станции является обеспечение баланса активной мощности и выдача соответствующего объёма электроэнергии потребителю, попутно вырабатывается определенное количество тепла. Недостающий объём тепловой энергии производится с применением котельного оборудования станции. При такой работе наблюдается достаточно высокий КПД 80–95 % и более эффективное использование топлива по сравнению с традиционными станциями. При параллельной работе станции с энергосистемой вопросы поддержания баланса не являются первоочередными, поскольку имеется резервирование со стороны системы. Исходя из этого, целесообразно в режиме параллельной работы станции в качестве критерия оптимального управления применять повышение ее технической эффективности. Подключение к энергосистеме

позволит варьировать генерируемую активную мощность, тем самым изменяя выработку тепловой энергии за счет когенерации и снизить топливные затраты станции. Таким образом, управляя режимом работы станции, возможно повысить коэффициент использования топлива и экологичность производства, уменьшив выбросы в атмосферу. При учёте этого фактора также будут минимизироваться издержки, так как большую долю затрат составляют топливные расходы [9].

В данной статье представлено исследование влияния фактора выработки тепла на загрузку генерирующего оборудования по активной мощности и выявлены варианты оптимизации состава и загрузки включенного оборудования в когенерационной системе.

В качестве примера рассмотрен объект распределенной генерации с когенерационными газопоршневыми агрегатами. Данная станция содержит пять газопоршневых установок электрической мощностью в 2 МВт, попутно вырабатывающих 2,15 МВт тепла по когенерационному циклу. Также на станции имеется три разных типа котлоагрегатов, предназначенных только для выработки тепловой энергии (11,2, 2,5 и 19,2 МВт).

Целевая функция при этом – максимизация коэффициента использования топлива (КИТ). Необходимо определить количество функционирующих агрегатов, их загрузку и оценить величину КИТ для разных вариантов работы станции: изолированно и параллельно с сетью.

## III. ТЕОРИЯ

Суточный график бытовой электрической нагрузки (ГН) представлен на рис. 1.

На рис. 2 представлен типовой график теплового бытового потребления в зимний период для сибирского региона. Постоянная составляющая графика обусловлена отопительной нагрузкой, а неравномерность – горячим водоснабжением.

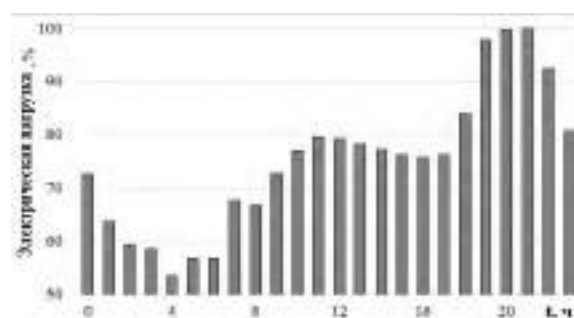


Рис. 1 – Суточный график бытовой электрической нагрузки

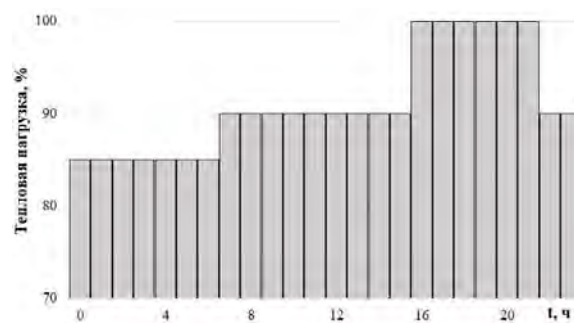


Рис. 2 – Типовой суточный график бытовой тепловой нагрузки

Поскольку часть тепловой энергии производится в когенерационном цикле ( $H_{\text{котл}} + H_{\text{коген}}$ ), то эффективность использования топлива на основании выражения [10] в системах с когенерационными установками примет вид:

$$\text{КИТ} = \frac{H + P}{(B(P) + B(H_{\text{котл}} - H_{\text{коген}})) Q_{\text{мин}}^P}, \quad (1)$$

где  $H$  – выработанная тепловая энергия, кВт·ч;  $P$  – выработанная электрическая энергия, кВт·ч;  $B(P)$  – суммарные затраты топлива газопоршневой установкой при производстве  $P$  электроэнергии и попутном  $H_{\text{коген}}$  тепла;  $H_{\text{котл}} - H_{\text{коген}}$  – объем тепловой энергии, который необходимо дополнительно произвести на котловом оборудовании электростанции, при этом затратить  $B(H_{\text{котл}} - H_{\text{коген}})$  топлива;  $Q_{\text{мин}}^P$  – удельная низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для режимов нагрузок (рис. 1 и 2) произведен расчет КИТ (1) при изолированной работе станции. В данной ситуации варьировать величину выдаваемой активной мощности  $P$  не предоставляется возможным. Этот режим работы будет считаться базовым для сравнения дальнейших результатов.

Как видно из результатов (рис. 3), при автономной работе когенерационной станции, КИТ варьируется в интервале от 92,2 до 93,6 %, в то время как для станций с отдельной выработкой электричества и тепла он имеет значение 75–78 % [11].

Далее приведены результаты расчетов при подключении станции на параллельную работу. В этом случае появляется возможность вырабатывать больше электрической энергии, чем необходимо потребителю, тем самым увеличивая когенерационную выработку тепла и уменьшая дополнительный расход топлива в котлах. А избыток электрической энергии можно выдавать в энергосистему даже по нулевой цене.

На рис. 4 представлена зависимость КИТ от мощности всей станции. В данном опыте для каждого значения нагрузки системы подобрано количество генераторов, при котором наблюдается оптимальная величина КИТ. Тепловая нагрузка принята постоянной.

Из полученного графика видно, что при увеличении нагрузки по активной мощности станции повышается и КИТ. Но с ростом количества функционирующих агрегатов, КИТ становится меньше, т. е. скачки вниз на графике связаны с подключением ещё одного генератора в работу и перераспределением нагрузки на все агрегаты. С каждым подключением нового генератора агрегаты начинают работать на меньший процент от своей номинальной нагрузки, что резко уменьшает эффективность использования топлива.

С учетом всего вышесказанного произведена корректировка расчетов для имеющихся суточных графиков, результаты представлены на рис. 5.

В данном расчете с целью оптимизации коэффициента использования топлива выбрано различное количество генераторов для каждого часа – в зависимости от графика

работают то 3, то 4 генератора, но на 100 % от своей номинальной мощности. Стоит отметить, что для имеющегося графика нагрузки ни в один из часов не возникает необходимости загрузить все 5 генераторов. Это объясняется тем, что нагрузка ни разу за сутки не превысила 8 МВт.

В итоге оптимизации удалось поднять КИТ на 0,1–0,9 %. Повышение эффективности объясняется тем, что при увеличении нагрузки газотурбинных агрегатов по активной мощности возрастает и количество выработанного тепла. Тем самым уменьшается расход топлива на котлоагрегатах, которые должны вырабатывать недостающее тепло для обеспечения им потребителей.

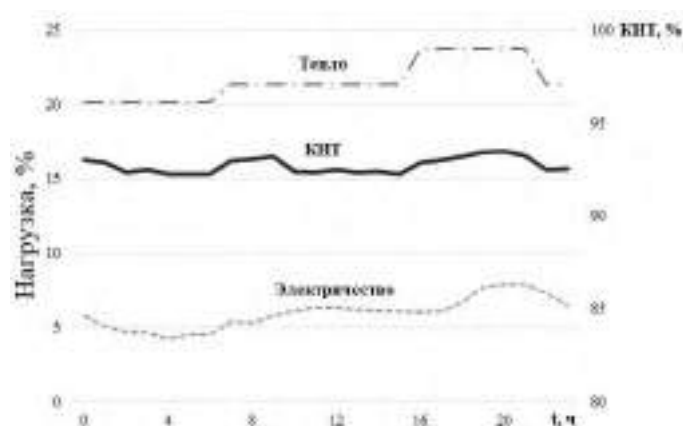


Рис. 3 – Суточный график электрической нагрузки для данной станции

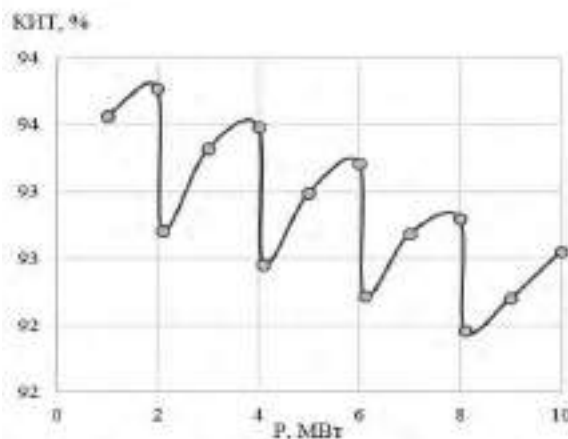


Рис. 4 – Зависимость КИТ от мощности всей станции.

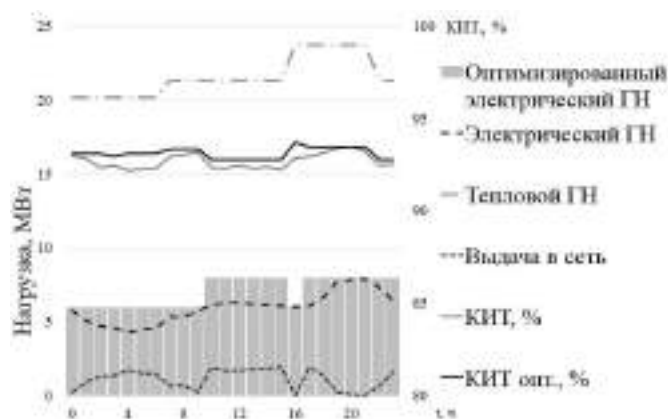


Рис. 5 – Суточные графики тепловой и электрической нагрузки станции, КИТ, перерасчитанный КИТ и оптимальная мощность станции для обеспечения эффективного использования топлива

## V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано влияние фактора потребления тепла на загрузку генерирующего оборудования когенерационной станции. В ходе исследования выявлено, что КИТ прямо пропорционально зависит от загрузки когенерационного оборудования по активной мощности и обратно пропорционально – от количества работающего оборудования.

Таким образом, повысить эффективность использования топлива когенерационной станции можно за счёт параллельной работы с сетью. При наличии связи с сетью появляется возможность оптимизировать состав генерирующего оборудования и его загрузку с целью увеличения топливной эффективности. На загрузку генерирующего оборудования в когенерационной системе напрямую влияет фактор использования тепла потребителями. При правильной оптимизации и работе параллельно с сетью можно добиться улучшения различных показателей, в том числе и более эффективного использования топлива на станции, что в свою очередь сократит издержки и выбросы в атмосферу.

Наибольшее значение КИТ в данном исследовании – 93,7 %, а наибольший эффект от оптимизации составил 1 %. Подобное влияние на малых промежутках времени не принесет большой экономии топлива. При этом в режиме параллельной работы и выдаче «удобной», с точки зрения максимизации КИТ, мощности в энергосистему возникают интересные эффекты. При прохождении минимума графика нагрузки станция малой мощности выдает в сеть больше мощности, в часы максимума выдача незначительна. С точки зрения режимов энергосистемы подобное поведение станции малой мощности увеличивает неравномерность графика нагрузки энергосистемы. Эффект от повышения КИТ необходимо дополнительно исследовать с точки зрения влияния на режим.

Также стоит отметить, что подобная оптимизация может достигнуть большего эффекта при использовании агрегатов другого типа – например, газотурбинной установки, где в когенерационном цикле есть возможность произвести в 2 раза больше тепла, чем электричества. Кроме того, в дальнейшем будут исследованы и летние режимы, в которых соотношение потребления электричества и тепла кардинально отличается от зимних.

## Список литературы

- [1] Ганжа В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов. Теория и практика энергосбережения. М.: Совет Радио, 1980. 288 с.
- [2] Фролова Я.А., Русина А.Е., Армеев Д.В. Оптимизация режимов энергосистем с распределенной генерацией в режиме on-line // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 11. С. 34–41.
- [3] Клер А.М., Жарков П.В., Сушко С.Н. Особенности оптимизации состава оборудования и режимов работы локальных систем энергоснабжения // Вестник ИРГТУ. 2015. № 10(105). С. 188–194.
- [4] Рыбкина Е.А., Галиев Т.И., Галиев И.Ф. Выбор оптимального варианта проектирования и эксплуатации объекта распределённой генерации: технический и экономический аспекты // Энергетика Татарстана. 2015. № 1. С. 60–64.
- [5] Чечушков Д.А., Паниковская Т.Ю., Бунькова Е.А. Метод оптимального размещения источников распределенной генерации для повышения надежности электроснабжения. // Промышленная энергетика. 2014. № 9. С. 17–21.
- [6] Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids DG3. Report on the technical, social, economic, and environmental benefits provided by Microgrids on power system operation Annex 3 – Microgrid Scheduling via Genetic Algorithm and Heuristic Search C. Schwaegerl, L. Tao; November 30<sup>th</sup> 2009.
- [7] Akorede M.F., Hizam H., Aris I., AB Kadir M.Z.A. A Review Of Strategies For Optimal Placement Of Distributed Generation In Power Distribution Systems // Research Journal of Applied Sciences. 2010. № 5 (2). P. 137–145.
- [8] Kasaei M.J. Optimal Placement Of Distributed Generation And Capacitor In Distribution Networks By Ant Colony Algorithm // Technical and Physical Problems of Engineering. 2014. Is. 20, Vol. 6. № 3. P. 52–56.
- [9] Гудков С.А., Лебедева Е.А. Когенерация, использование когенерационных установок. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 21 с.
- [10] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЕИ, 1999. 472 с.
- [11] Зворыкин А.А. История техники. М.: Соцэкгиз, 1962. 772 с.

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Кононов Н.С., Шульгин А.О., Гольдштейн М.Е.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Челябинск, Россия

kononov.ns@ya.ru, shulgin.ao@ya.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Максимальная передаваемая по линии электропередачи мощность ограничена допустимой токовой нагрузкой, определяющей нагрев линии. В связи с существенным увеличением стоимости строительства новых высоковольтных линий электропередачи возрастает роль повышения пропускной способности существующих линий. Становится экономически выгодным увеличивать передаваемую по линии мощность вплоть до ограничения по нагреву за счет применения различных устройств, в том числе элементов силовой электроники [3]. К таким можно отнести и устройства продольной компенсации на базе преобразователя напряжения (УПК ПН), которые позволяют перераспределять потоки мощности по параллельным сечениям электрической сети, в частности предотвращая загрузку одних из них током выше допустимого, загружая другие.

**Объект исследования и методы:** Оценка возможности, а также эффективности применения устройств продольной компенсации на базе преобразователя напряжения, проводилась с использованием математической модели энергосистемы и УПК ПН в программном комплексе RastrWin3. Математическая модель энергосистемы сформирована на основании IEEE 14-узловой тестовой схемы.

**Результаты:** Выполнен анализ послеаварийных и рабочих режимов IEEE 14-узловой тестовой схемы сети, содержащей УПК ПН. Определены параметры УПК ПН. Установленные УПК-ПН позволили снизить потери активной и реактивной мощности в длительных режимах энергосистемы, а также перераспределить потоки мощности, снизив нагрузку перегруженной линии в послеаварийном режиме.

**Выводы:** Уменьшение токовой загрузки линий в послеаварийном режиме исследуемой сети возможно при мощности УПК ПН не менее 300 кВар, что подразумевает стационарную установку данного устройства и выполнение его присоединения при помощи жесткой ошиновки. Для снижения потерь в рабочих режимах сети может быть достаточно и малогабаритных УПК.

**Ключевые слова:** гибкие системы электропередачи переменного тока, устройство продольной компенсации, преобразователь напряжения, перераспределение потоков мощности, малогабаритные устройства продольной компенсации.

## SERIES COMPENSATORS APPLICATION FEATURES BASED ON VOLTAGE SWITCH CONVERTER FOR POWER GRID MODE CONTROL

N. Kononov, A. Shulgin, M. Goldshteyn

South Ural State University

Chelyabinsk, Russia

kononov.ns@ya.ru, shulgin.ao@ya.ru

## Abstract

**Background:** Transmitted power through the power transmission line is limited by the permissible continuous load, which determines line heating. Due to significant cost increase of the new high-voltage transmission lines building, there is a growing role of increasing the current lines capacity. So the most cost-effective solution is increase the power transmitted through the power lines up to the thermal limit due to the use of various devices, which includes elements of power electronics [3]. Such devices might be series compensators based on voltage switch converter (VSC), that allow power flows distribution across parallel lines. In particular, it can prevent the current lines loading as a result of other lines loading.

**Materials and Methods:** Series compensators possibility and effective use was carried out using the power grid mathematical model in RastrWin3 software. The power grid mathematical model is formed by applying IEEE 14-Bus Test System.

**Results:** This article briefly reviews IEEE 14-Bus Test System post-emergency and operating modes. Parameters of the series compensators based on VSC are determined. Installed series compensators based on VSC allowed to capacity losses decrease in long-time modes and power flows distribution, which results in load decrease of the overloaded power transmission line.

**Conclusions:** Current lines loading decrease in power grid post-emergency mode is possible by series compensators based on VSC with at least 300 kVAR power, which means stationary installation and its connection with a rigid bus. Distributed series compensators can be enough for power losses decrease in power grid operating modes.

**Key words:** flexible AC transmission systems (FACTS), series compensator, voltage switch converter (VSC), power flows distribution, distributed series compensators.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для управления режимами энергосистем уже широко применяются элементы силовой электроники [1–5]. Устройства продольной компенсации на базе преобразователя напряжения (УПК ПН) – устройства силовой электроники, обеспечивающие управляемое воздействие на реактивную составляющую эквивалентного сопротивления линий электропередачи.

Основными эффектами от применения УПК ПН являются поддержание минимальных потерь и уровней напряжений в сети, а также перераспределение потоков мощности в параллельных сечениях [5]. Управление состоянием УПК осуществляется в режиме реального времени. Определим особенности применения УПК ПН в электрических сетях, анализируя режимы IEEE 14-узловой тестовой схемы (рис. 1) электрической сети [6].

## II. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАЙОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

### A. Описание схемы

Узлы схемы – это сборные шины 110 и 220 кВ электрических станций и подстанций, соединенных линиями электропередачи, представленными на схеме ветвями. Тестовая схема включает 2 генерирующих и 12 нагрузочных узлов. В узлах 3, 6 и 8 установлены регулируемые источники реактивной мощности, в узле 9 – батарея статических конденсаторов. Для ЛЭП приняты аналоги отечественных линий с типовыми удельными сопротивлениями. Нагрузки в узлах схемы приняты такими, что в некоторых из послеаварийных режимов ток ряда ЛЭП превышает допустимое значение.

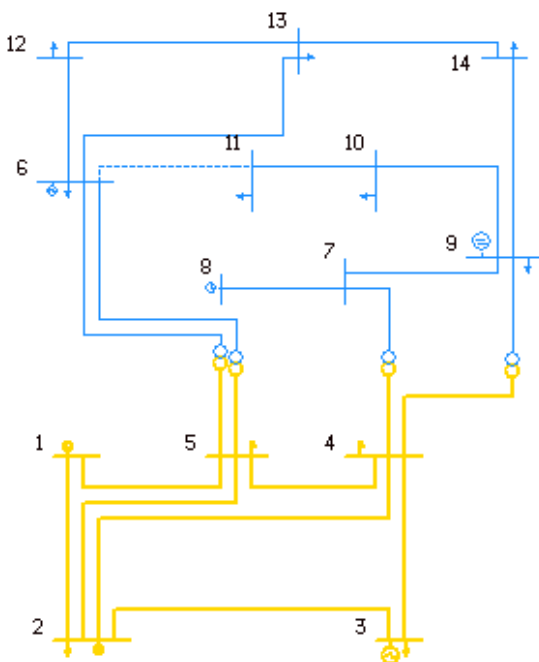


Рис. 1 – IEEE 14-узловая тестовая схема исследуемой электрической сети

Параметры схемы замещения исследуемой сети для ветвей представлены в табл. I, для узлов – в табл. II.

Таблица I

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$r, \text{ Ом}$	$x, \text{ Ом}$	$b, \text{ мкСм}$	$k_T$	$I_{загр}, \%$
1	2	10,25	31,30	99,8	–	56,7
1	5	28,58	117,99	93,0	–	39,9
2	3	24,86	104,73	82,8	–	28,8
2	4	30,74	93,27	64,3	–	25,8
2	5	30,13	91,98	65,4	–	24,1
3	4	35,45	90,47	24,2	–	7,3
4	5	7,06	22,28	–	–	21,5
4	7	–	105,81	–	0,511	39,4
4	9	–	276,26	–	0,516	23,0
5	6	–	115,80	–	0,536	44,1
5	6	–	115,80	–	0,536	44,1
6	11	12,56	26,30	–	–	51,3
6	12	16,25	33,83	–	–	25,8
6	13	8,75	17,23	–	–	43,3
7	8	–	23,30	–	–	31,7
7	9	–	14,55	–	–	80,8
9	10	4,21	11,18	–	–	25,5
9	14	16,81	35,76	–	–	20,0
10	11	10,85	25,40	–	–	15,1
12	13	29,22	26,43	–	–	1,4
13	14	22,61	46,03	–	–	23,9

Таблица II

$N$	$U_{ном}, \text{ кВ}$	$P_H, \text{ МВт}$	$Q_H, \text{ МВар}$	$P_G, \text{ МВт}$	$Q_G, \text{ МВар}$
1	230	–	–	304,8	41,5
2	230	21,7	12,7	40,0	43,6
3	230	94,2	19,0	–	25,1
4	230	47,8	–3,9	–	–
5	230	7,6	1,6	–	–
6	115	11,2	7,5	–	12,7
7	115	–	–	–	–
8	115	–	–	–	17,6
9	115	44,2	24,9	–	–
10	115	18,4	7,4	–	–
11	115	18,4	7,4	–	–
12	115	16,0	4,2	–	–
13	115	20,2	8,7	–	–
14	115	22,4	7,5	–	–

### B. Анализ послеаварийных режимов

При помощи программного комплекса RastrWin3 смоделирована ситуация аварийного отключения линии 6–11. В этом случае в сети наиболее тяжелый послеаварийный режим – ток линии 7–9 достигает 109 % от допустимого (табл. III). В это же время загрузка параллельных ей линий 5–6, 4–9 и 4–7 составляет всего 35, 31 и 52 %, соответственно.

Возможно строительство новой или усиление существующей линии электропередачи 7–9. Однако эту задачу можно решить и по-другому, перераспределив поток мощности, перегружающий линию 7–9, за счет установки УПК ПН в ветвях 5–6, 4–9 и 4–7. При этом изменять параметры ветвей при включении УПК будем синхронно.

Таблица III

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$x, \text{ Ом}$	$I_{max}, \text{ А}$	$I_{загр}, \%$
4	7	105,81	137	51,6
4	9	276,26	82	30,9
5	6	115,80	94	35,4
7	9	14,55	288	108,8

Размещение четырёх УПК в недогруженных ветвях 5–6, 4–9 и 4–7 позволило загрузить эти ветви, снизив нагрузку с линии 7–9 с 109 до 96 % (табл. IV). Карта послеаварийного режима сети представлена на рис. 2. Снижение тока линии 7–9 стало возможным благодаря снижению эквивалентного реактивного сопротивления в ветвях 5–6 и 4–9 соответственно на 40 и 19 %, а также одновременного увеличения сопротивления ветви 4–7 на 13 %.

Таблица IV

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$x, \text{ Ом}$	$I_{max}, \text{ А}$	$I_{загр}, \%$
4	7	121,79	119	45,0
4	9	231,64	93	35,2
5	6	81,85	96	36,1
7	9	14,55	254	95,9

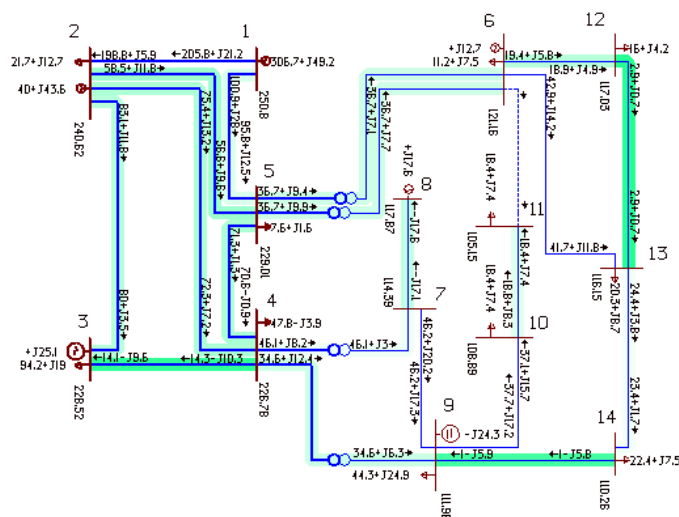


Рис. 2 – Карта послеаварийного режима сети

При рассматриваемом расположении УПК в исследуемой схеме и введении их в работу, нагрузка по току линий в послеаварийных режимах не превышает 100 %.

Применяя УПК ПН с параметрами, выбранными по наиболее тяжелому послеаварийному режиму сети, рассмотрим возможность снижения потерь в её нормальных режимах.

### III. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Рассмотрим влияние установленных УПК в ветвях 5–6, 4–9 и 4–7 на суммарные потери активной и реактивной мощности в сетях 110 и 220 кВ. Расчёт потерь активной и реактивной мощности также выполним в программном комплексе RastrWin3. Сравним значения потерь мощности в исследуемой схеме в нормальном режиме до и после установки УПК в ветвях 5–6, 4–9 и 4–7. При этом для оптимального распределения потоков мощности изменим величину компенсации в ветви 4–7, уменьшив её эквивалентное реактивное сопротивление на 26 %. Полученные расчётные данные суммарных потерь активной и реактивной мощности приведены в табл. V.

Таблица V

Потери мощности	$\Delta P, \text{ МВт}$	$\Delta Q, \text{ МВар}$
До компенсации	22,65	69,48
После компенсации	22,50 (–0,48 %)	64,31 (–7,13 %)

Таким образом, применяя рассмотренную конфигурацию УПК в нормальном режиме, удалось снизить суммарные потери активной мощности на 0,48 % и реактивной мощности на 7,13 % благодаря перераспределению потоков мощности и более равномерной загрузке линий по току.

Таблица VI

Ветвь	Нормальный режим до компенсации	Послеаварийный режим после компенсации	Нормальный режим после компенсации
4–7	105,8	121,8	89,8
4–9	276,2	231,6	231,6
5–6	115,8	81,5	81,5

Определив величины эквивалентных сопротивлений УПК, которые пришлось вводить в разных режимах сети, найдем мощность  $Q_{УПК}$  и величину максимального напряжения УПК ПН  $\Delta U_{УПК}$ :

$$Q_{УПК} = \Delta x \cdot I_{max}^2; \quad (1)$$

$$\Delta U_{УПК} = \Delta x \cdot I_{max}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – изменение реактивной составляющей эквивалентного сопротивления ЛЭП, Ом;  $I_{max}$  – максимальный ток ЛЭП, А.

Как следует из полученных результатов (табл. VII), уменьшение загрузки линии по току в послеаварийных режимах исследуемой сети возможно при мощности УПК ПН не менее 300 кВар. Это говорит о том, что данное устройство должно быть стационарным, а его присоединение должно быть выполнено при помощи жесткой ошиновки.

Таблица VII

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$\Delta x, \text{ Ом}$	$Q_{УПК}, \text{ кВар}$	$\Delta U_{УПК}, \text{ кВ}$
4	7	16,0	226,6	1,90
4	9	44,7	386,3	4,15
5	6	34,3	316,1	3,29

В то же время представляется возможным выполнить оптимизацию потерь мощности в нормальном режиме с применением малогабаритных устройств продольной компенсации, которые устанавливаются непосредственно на проводах ЛЭП, не приводя к нарушению их целостности. Эти устройства обладают меньшими по сравнению с рассчитанными в табл. VII величинами вводимых в линию реактивных сопротивлений [4] и меньшей мощностью и габаритами. В некоторых случаях для достижения необходимого эффекта от регулирования эквивалентного сопротивления ЛЭП потребуется последовательное соединение нескольких таких устройств.



#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования подтвердили, что применение устройств продольной компенсации на базе преобразователей напряжения позволяет, не прибегая к строительству новых линий электропередачи, уменьшить перегрузку ЛЭП в послеаварийных режимах, а также выполнить оптимизацию нормального режима работы электрической сети, что ведёт к увеличению энергетической эффективности работы сети в целом. При этом для управления нормальными режимами могут быть применены малогабаритные УПК ПН, а послеаварийными – стационарные.

#### Список литературы

- [1] Гольдштейн М.Е., Прокудин А.В. Элементы на базе силовой электроники для управления режимами электроэнергетической системы. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. 117 с.
- [2] Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электро-передачи переменного тока в энергосистемах. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. 311 с.
- [3] Кочкин В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП // Новое в российской электроэнергетике. 2010. № 8.
- [4] Панфилов Д.И. и др. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // Электротехника. 2017. № 7. С. 78–82.
- [5] Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательский дом «МЭИ», 2007. 488 с.
- [6] Power Systems Test Case Archive. URL: <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/> (accessed 09.04.18).

# РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ С ПОМОЩЬЮ РОТОРНО-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Коробец А.С., Степанов С.Ф.  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина»  
г. Саратов, Россия  
Andrey-wow.64@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В удалённых от централизованной энергосистемы районах имеются автономные генераторы электроэнергии, которые состоят из одного или нескольких источников распределенной генерации и распределенных потребителей. В условиях трудного подвоза горючих материалов для работы электростанции остро встает вопрос автономного генератора электроэнергии, функционирующего на различных вторичных горючих веществах, отходах от древесной и бумажной продукции. Это обстоятельство требует создания нового автономного генератора, работающего от низкопотенциальных источников тепла. Для этих целей может быть использована малая автономная электростанция, деятельность которой основана на органическом цикле Ренкина с низкокипящим теплоносителем.

**Материалы и методы:** При проведении исследования возможности создания малой автономной электростанции с внешним подводом тепла на низкокипящем теплоносителе основными элементами являются методы математического анализа и создания практической модели. При выполнении экспериментальной части методом исследования являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение MathLab.

**Результаты:** Получены расчётный КПД и расход автономной электростанции. Предложено в качестве расширительной машины использовать роторный двигатель Тверского со встроенным электрогенератором и конструкцию исполнения автономного генератора электроэнергии.

**Выводы:** Разработанный алгоритм может быть применен при создании малой автономной электростанции с внешним подводом тепла на низкокипящем теплоносителе. Реализация алгоритма совместно с внедрением в качестве расширительной машины роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором позволит обеспечить электроэнергией удалённых потребителей нашей страны.

**Ключевые слова:** малая автономная электростанция, внешний подвод тепла, низкокипящий теплоноситель, роторный двигатель Тверского, встроенный электрогенератор.

## DISTRIBUTED GENERATION OF ELECTRICITY ON A LOW-POTENTIAL HEAT EXCHANGER WITH A ROTARY-GENERATOR UNIT

A. Korobets, S. Stepanov  
“Saratov State Technical University named after Gagarin Y.A.”  
Saratov, Russia  
Andrey-wow.64@mail.ru

## Annotation

**Background:** In remote areas from the centralized power system, there are autonomous power generators, which consist of one or several sources of distributed generation and distributed consumers. In conditions of difficult transportation of combustible materials for the operation of a power plant, the issue of an autonomous generator of electricity operating on various secondary combustible substances, waste from wood and paper products, is acute. This circumstance requires the creation of a new autonomous generator operating from low-potential heat sources. For these purposes, a small autonomous power plant can be used, whose operation is based on the Rankine organic cycle with a low-boiling heat carrier.

**Materials and Methods:** When conducting research into the possibility of creating a small autonomous power plant with an external heat supply on a low-boiling coolant, the main elements are the methods of mathematical analysis and the creation of a practical model. When performing the experimental part, the method of investigation was mathematical modeling. As a modeling tool, MathLab software was used.

**Results:** The calculated efficiency and consumption of an autonomous power station are obtained. It is proposed to use as an expansion machine a Tversky rotary engine with an integrated electric generator and a design of an autonomous generator of electric power.

**Conclusions:** The developed algorithm can be used in the development of a small autonomous power plant with an external heat input on a low boiling point coolant. The implementation of the algorithm together with the introduction of an Tversky rotary engine with an integrated power generator as an expansion machine will provide electric power to remote consumers of our country.

**Key words:** small autonomous power station; External supply of heat; Low-boiling coolant; Tverskoy rotary engine; Built-in power generator.

Существует множество перспективных проектов по выработке электрической энергии по всему миру, которые привлекают к себе внимание, большая часть приходится на усовершенствование, оптимизацию и повышение эффективности уже имеющихся установок и агрегатов. Особую группу составляют электростанции с использованием энергии низкопотенциальных источников тепла. На данный момент не утилизируемое тепло, которое мы могли бы использовать для выработки электроэнергии, рассеивается в атмосфере.

Низкопотенциальное тепло образуется при протекании большинства технологических процессов, так как в атмосферу выделяется тепло, температурой немного выше температуры воздуха. Такими источниками являются как техногенные системы, созданные человеком, так и источники естественного происхождения.

Наиболее популярными низкопотенциальными источниками тепла являются: теплота продуктов сгорания различного рода топлива, теплота сгорания попутного газа, энергия биологического топлива, энергия сжигания производственных отходов, энергия Земли.

Проект автономной электростанции предлагает использовать полноценный генератор, применяемый в качестве резервного источника электроэнергии, не только как дополнительный, но и как самостоятельный источник энергии. Также предлагается использовать его для питания дачных кооперативов, в местах ликвидации аварий, в геологических экспедициях, в местах прокладки коммуникаций и на удаленных от электросетей промышленных объектах.

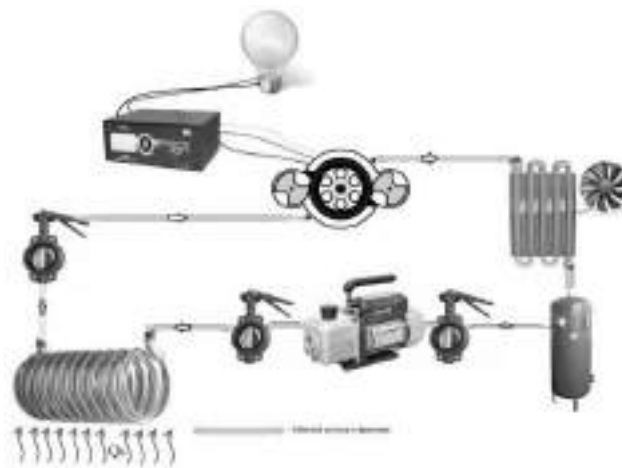
Проекты по тематике применения низкопотенциальных источников тепла являются актуальными и ведутся во всех развитых странах мира.

Принцип работы автономной электростанции основан на использовании в качестве рабочего тела низкокипящего теплоносителя фреона и термодинамического цикла Ренкина. Преимущества применения фреона в качестве рабочего тела обосновываются его низкой температурой кипения – 26,1 °С, а при температуре 80 °С получают давление в 30 атм, которое можно использовать для получения электрической энергии путем вращения роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором.

Система состоит из двух частей: теплового контура, преобразующего тепловую энергию в механическую, и электромеханической части, которая преобразует механическую энергию в электрическую требуемого для потребителя качества.

Насос под давлением подает рабочее тело в испаритель, где происходит его нагрев, после чего тело переходит из жидкого состояния в газообразное. Далее газ подается на специально разработанный турбино-генератор, где он расширяется, приводя его во вращение. Отработавший газ попадает в охладитель, где рабочее тело переходит в жидкое состояние и попадает на вход насоса.

В настоящее время подан патент на полезную модель, а также разработана конструкция малой мультитопливной автономной электростанции с внешним подводом тепла мощностью до 10 кВт (рисунок).



Структурная схема малой мультитопливной установки с внешним подводом тепла на основе роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором

Контур низкокипящего теплоносителя нагревается в испарителе от дымовых газов различных видов топлива или от низкопотенциальных источников тепла.

Ротор генератора выполнен из теплостойкого (нагревостойкого), эмалированного, покрытого двумя слоями высокопрочной эмали нормальной толщины провода марки ПЭТВ-2. Применение теплостойкого провода позволяет рабочему телу в газообразном состоянии иметь большую температуру, что приведет к повышению вырабатываемой электрической мощности и улучшению рабочих характеристик генератора.

Однако применение постоянных магнитов в генераторе не обеспечивает возможности регулирования уровня вырабатываемого напряжения, и при изменении скорости вращения роторного двигателя Тверского преобразуется не только частота вырабатываемого напряжения, но и его амплитуда. Из-за этого электрическая энергия, снимаемая с клемм генератора, не может быть напрямую использована в быту или промышленности.

Для обеспечения заданного качества электрической энергии во всех режимах работы в системе генерирования используется электронный преобразователь. Далее полученное постоянное напряжение преобразуется в инверторе в напряжение с заданной частотой, амплитудой и гармоническим составом.

Практический интерес представляют системы мощностью более 10 кВт. При их создании будут применены научные и инженерно-технические принципы, отработанные при изготовлении опытного образца малой мощности.

Использовать геотермальную и низкопотенциальную энергию максимально эффективно поможет вещество, которое при необходимых нам температурах будет создавать рабочие параметры для вращения турбины [1]. Вода нам не подходит, так как ее температура кипения при атмосферном давлении составляет +100 °С. Нашим требованиям удовлетворяет фреон, так как он при атмосферном давлении и температуре 20–80 °С будет обеспечивать вращение турбины с частотой 1500–3000 об/мин [2].

Низкокипящий хладагент – фреон R134a ( $t_{\text{кип}} = -26,1$  °С) не вызывает истощения озонового слоя атмосферы земли, являясь озонобезопасным хладагентом. Его стоит применять в экспериментальной установке в качестве низкокипящего теплоносителя, приводящего во вращение лопасти турбины [3], которая раскрутит ротор электрогенератора для выработки электроэнергии.

Удельная теплота сгорания веществ наглядно представляет разницу между количеством полученной теплоты при сгорании 1 кг дров с бензина и дизельного топлива, заметим, что разница составляет примерно в 2 раза. В нашем проекте сравнивались малая автономная электростанция с внешним подводом тепла на основе роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором с ближайшими конкурентами – дизельным и бензиновым генераторами мощностью 10 кВт. Давайте посчитаем, сколько нужно топлива для выработки 1 кВт энергии на дизельном, бензиновом генераторе и на нашей экспериментальной установке.

Расход разных дизель-генераторов при мощности 10 кВт будет варьироваться от 2,7 до 4,1 л/ч (в зависимости от фирмы производителя: Lister Petter, SDMO, AKSA, GENBOX, Yanmar и др.). Расход же бензиновых станций при такой же заданной мощности колеблется в пределах 2,5–5,6 л/ч (HUTER, AYERBE, WFM, PRAMAC и др.). Основной характеристикой генераторов является масса: дизельные весят 680–820 кг, бензиновые – 150–200 кг. Напряжение трехфазной сети обоих станций – 400 В.

Эффективный КПД дизеля составляет 25–42% [5], тогда как бензинового генератора – 18–24 % [6]. Для расчета были взяты средние значения расхода топлива (дизельного – 3,4 л/ч, бензинового – 4,05 л/ч) и эффективного КПД (дизельного – 33,5 %, бензинового – 21 %). Используя эти данные, можно вычислить количество теплоты, которое подводится к автономному электрогенератору по формуле:

$$Q = qm, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество подводимой теплоты;  $q$  – удельная теплота сгорания топлива;  $m$  – масса сгорающего топлива:

$$m = V\rho, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность топлива;  $V$  – объем. Плотность дизельного топлива составляет 860 кг/м<sup>3</sup>, бензинового – 740 кг/м<sup>3</sup>. Получаем:

$$Q_d = 42,7 \cdot 10^6 \cdot 860 \cdot 0,0034 = 124,85 \text{ МДж}\cdot\text{ч};$$

$$Q_b = 44 \cdot 10^6 \cdot 740 \cdot 0,00405 = 131,87 \text{ МДж}\cdot\text{ч}.$$

Итак, удельный расход на выходе должен быть равен тонне условного топлива, умноженного на киловатт (т.у.т./кВт·ч). Из формулы (1) следует, что количество энергии  $Q$  на 10 кВт/ч нужно разделить на 10 и 29,3 МДж, так как 1 т.у.т. = 29,3 МДж. Чтобы узнать итоговую величину в т.у.т./кВт·час, нужно обозначить удельный расход буквой  $\Omega$ :

$$\Omega = A/293; \quad (3)$$

$$\Omega_d = \frac{124,85}{293} = 0,43 \text{ т.у.т./кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\Omega_b = \frac{131,87}{293} = 0,45 \text{ т.у.т./кВт}\cdot\text{ч}.$$

На предлагаемую автономную электростанцию должно подаваться 29 % тепла с учетом суммарного КПД нашего генератора [7]. Нужно перевести полученную мощность в количество требуемой теплоты:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с} \rightarrow 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \text{ МДж}.$$

В результате 10,5 кВт должно приходиться с генератора. Для дальнейшего исследования нужно перевести киловатты в джоули: 10,5 кВт = 37,8 МДж.

Это означает, что получившуюся энергию 37,8 МДж нужно разделить на 0,29 (КПД установки) и вычислить энергию 130 МДж – это то количество, которое должно поступить в испаритель. Чтобы узнать массу требуемого топлива, необходимо подставить количество теплоты в формулу, которую описывали выше. Результаты занесены в табл. I.

Таблица I – Удельный расход сравниваемых автономных электростанций

Удельный расход электростанций		
дизельной	бензиновой	малой автономной
0,43	0,45	0,445

Из полученных данных можно сделать вывод, сколько понадобится различных видов топлива для выработки 1 кВт·ч на малой автономной электростанции с роторным двигателем Тверского со встроенным электрогенератором на низкокипящих теплоносителях (табл. II).

Таблица II – Необходимое количество топлива для выработки 1 кВт·ч на предлагаемой установке в зависимости от видов ресурсов

Вид топлива	Необходимое количество топлива на 1 кВт·ч
Бензин	0,4 л
Дизельное топливо	0,35 л
Дрова, древесина	0,82 кг
Отходы	0,767 кг

## Выводы

Малая мультитопливная электростанция на основе роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором обладает эффективным КПД и позволяет увеличить спектр используемых видов топлива от 1 до 4–5: бензин, дизельное топливо, древесина, отходы и низкопотенциальное тепло. Это позволяет расширить границы области применения автономной электростанции и решать поставленные перед данной установкой задачи и проблемы.

Как правило, отработанное тепло утилизируется с помощью термического (например, трансформаторного) масла, воды или гликоля. Установка на низкокипящем теплоносителе способна использовать входящее тепло в диапазоне температур от 50 до 150 °С. Если температура меньше 100 °С, то тепловой поток должен быть не менее 42,000 ВТУ/kWe. Уровень теплоотдачи увеличивается с ростом температуры.

Наше стандартное рабочее тело – органическая жидкость типа R134a (не вызывает истощение озонового слоя), которая работает в диапазоне от 50 до 150 °С. КПД такой системы составляет 12–14 %. Общий тепловой и электрический КПД – около 80 %.

### Список литературы

[1] Коробец А.С., Степанов С.Ф. Автономная электростанция с внешним подводом тепла на основе роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. X Всерос. науч.-практич. конф.: в 2 т. Волгоград, 2016. Т. 1. С. 86–87.

- [2] Коробец А.С. Малая автономная электростанция с внешним подводом тепла на основе роторного двигателя Тверского со встроенным электрогенератором // Интеллектуальные энергосистемы: тр. III Междунар. молодеж. форума: в 3 т. Томск, 2015. Т. 1. С. 280–282.
- [3] Ибрагимов У.Х., Камилова Н.А. Использование низкопотенциальной тепловой энергии в промышленности // Молодой ученый. 2015. № 4. С. 198–200.
- [4] Ольшанский А.И. Основы энергосбережения. Витебск: ВГТУ, 2007. 223 с.
- [5] Завалишин В.В. Экономика топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения дизеля // Тр. Сар. гос. техн. ун-та им. Ю.А. Гагарина. Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2010.
- [6] КПД бензиновых и дизельных генераторов. URL: [www.energoexpo.ru/polezno-znat/kpd-elektrogeneratorov](http://www.energoexpo.ru/polezno-znat/kpd-elektrogeneratorov).
- [7] Шадек Е.Г., Маршак Б.И., Крыкин И.Н., Блинов А.Н. Тригенерационный энергокомплекс на низкокипящих теплоносителях // Энергосбережение. 2015. № 5(100). С. 58–62.

# ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ПОВРЕЖДЕНИЯ В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

М.В. Крицкий<sup>1</sup>, Д.М. Баннов<sup>2</sup>, В.И. Полищук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистем Самарской и Ульяновской областей»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,  
Самара, Россия  
nurochka18@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Основным источником электроэнергии являются турбогенераторы на электрических станциях. На современных генерирующих предприятиях все больше повышаются требования к надежной и безаварийной работе электроэнергетического оборудования, участвующего в оптовом рынке электроэнергии и мощности. В связи с развитием интеллектуальных методов обработки информации все больше появляется работ, связанных с созданием защитно-диагностических систем генерирующего оборудования. Одной из важнейших задач при проведении любой научно-исследовательской работы является оценка ее экономической эффективности при использовании в промышленности. Целью данного исследования является создание методики оценки предотвращенного экономического ущерба от возможного использования разрабатываемой диагностической системы выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения турбогенератора.

**Материалы и методы:** Исследование оценки экономического ущерба от повреждения в обмотке возбуждения турбогенератора базировалось на разработанном авторами алгоритме с использованием методов, принятых в теории и практике экономических расчетов.

**Результаты:** При проведении исследования был создан алгоритм оценки экономической эффективности от применения разрабатываемой диагностической системы выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения турбогенератора (на основе анализа предотвращаемого системой экономического ущерба).

**Выводы:** Расчет предотвращаемого диагностической системой возможного экономического ущерба показал, что затраты на создание новых систем диагностики обмотки возбуждения турбогенератора в тысячи раз меньше, чем урон от эксплуатации генератора с данным видом повреждения.

**Ключевые слова:** диагностическая система, турбогенератор, витковые замыкания, экономический ущерб, рынок электроэнергии и мощности.

# ECONOMIC DAMAGE ASSESSMENT FROM FAULT IN EXCITATION WINDING OF THE TURBO-GENERATOR

M. Kritsky<sup>1</sup>, D. Bannov<sup>2</sup>, V. Polishchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>“System Operator of the United Power System”, Joint-stock Company

<sup>2</sup>Samara State Technical University  
Samara, Russian Federation  
nurochka18@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The main source of electric power are turbo-generator's in a power station. In modern electric station requirements are increasing to reliability and not failure works of power-generating plant which participates in wholesale market of electric energy and power. Due to development of intellectual methods of data processing there are works related to the development of protective and diagnostic systems of generating equipment. In carrying out any research one of the most important tasks is to assess its economic efficiency when used in industry. The purpose of this study is to develop a methodology for assessing the prevented economic damage from the possible use of the developed diagnostic system for detecting turn-to-turn short-circuit in excitation winding of the turbo-generator.

**Materials and Methods:** The study of economic damage assessment from damage in the excitation winding of the turbo-generator based on the developed algorithm by the authors using methods adopted in theory and practice of economic calculations.

**Results:** During the research was created assessment algorithm the economic efficiency of the developed diagnostic system for detecting turn-to-turn short-circuit in excitation winding of the turbo-generator on the basis of economic damage assessment.

**Conclusions:** The calculation based on the assessment of economic damage showed that the cost of creating new diagnostic systems for the excitation winding of the turbo-generator are thousands of times less than damage from the operation of the generator with this type of damage.

**Key words:** diagnostic system, turbo-generator, turn-to-turn short-circuit, economic damage.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Генерирующие компании осуществляют выработку и реализацию электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ). На ОРЭМ для всех участников рынка действуют жесткие правила, от соблюдения которых зависит доход предприятия [1].

Спецификой работы генерирующих компаний является стремление к выдаче энергии строго по графику выработки, и все внеплановые снижения выдаваемой мощности и аварийные остановки накладывают на компанию большие экономические издержки. В этих условиях огромное значение имеет наличие у генерирующей компании развитой

системы технической диагностики, позволяющей определять возможное появление дефектов основного оборудования. Экономическая целесообразность разработки и внедрения систем технической диагностики напрямую связана с предотвращаемым ей ущербом.

## II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработать методику оценки предотвращенного экономического ущерба от возможного использования создаваемой диагностической системы выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения турбогенератора (ТГ).

## III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определить величину экономического ущерба от повреждения в обмотке ротора турбогенератора в зависимости от времени обнаружения дефекта.

## IV. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Величину экономического ущерба можно с достаточной точностью определить исходя из следующих соображений.

Экономический ущерб от повреждения в обмотке ротора турбогенератора определяется как сумма затрат на проведение ремонтных работ по устранению повреждения  $Z_p$  и расходов от незапланированного простоя генерирующего оборудования  $Z_{\Pi}$ :

$$Y = Z_p + Z_{\Pi}.$$

Здесь  $Z_p = C_{\text{ост}} + C_{\text{оборуд}} + C_{\text{рем}}$ , где  $C_{\text{ост}}$  – стоимость операций на останов и пуск ТГ;  $C_{\text{оборуд}}$  – материалов, инструментов или нового оборудования (ротора) необходимых для ремонта;  $C_{\text{рем}}$  – стоимость ремонтных работ.

Затраты от незапланированного простоя генерирующего оборудования тесно связаны с механизмом ценообразования на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) и складываются из издержек от недоотпуска электроэнергии  $I_{\text{н.э}}$  и примененных штрафных санкций  $I_{\text{ш}}$  за нарушение поставки заявленной мощности [2–4]:

$$Z_{\Pi} = I_{\text{н.э}} + I_{\text{ш}}.$$

Здесь  $I_{\text{н.э}}$  рассчитываются по формуле:

$$I_{\text{н.э}} = W_{\text{нед.ЭЭ}} \cdot Ц,$$

где  $W_{\text{нед.ЭЭ}}$  – недопоставленная электроэнергия, МВт·ч;  $Ц$  – цена недопоставленной электроэнергии, руб.

Издержки от примененных штрафных санкций  $I_{\text{ш}}$  обусловлены штрафными коэффициентами, которые рассчитываются в соответствии с нормативными документами, регламентирующими рынок электроэнергии и мощности и для каждого сценария развития событий считаются индивидуально [1, 5].

Одним из наиболее распространенных дефектов, влекущим за собой колоссальные затраты, является витковое замыкание (ВЗ) в обмотке ротора генератора.

В качестве примера были рассмотрены три варианта времени обнаружения дефекта для конкретного типа турбогенератора (ТФ-45), а именно: обнаружение ВЗ в обмотке ротора диагностической системой на ранней стадии его развития (ремонт не занимает много времени); во время останова или планового ремонта ТГ (продолжительность ремонта составляет от 3-х до 10 суток); во время аварийного останова из-за несвоевременного обнаружения и работы длительное время с замыканием (ремонт от 7 до 10 месяцев) [2–4].

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УЩЕРБ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЯ В ОБМОТКЕ РОТОРА ТГ

№	Вынужденный простой, сутки	$I_{\text{н.э}}$ , млн руб.	Затраты, млн руб.		У, млн руб.
			$Z_p$	$Z_{\Pi}$	
1	3	3,5	1,45	4,4	9,35
2	10	11,7	3,4	8,9	24
3	300	352,3	33,3	135,9	521,5

Из таблицы видно, что существует прямая зависимость экономического ущерба от времени обнаружения и устранения последствий виткового замыкания в роторе.

## V. ВЫВОД

На основании приведенных расчетов наглядно доказано, что затраты на создание новых систем диагностики обмотки возбуждения турбогенератора, способных выявлять ее дефекты на ранней стадии развития, экономически оправданы.

## Список литературы

- [1] Договор о присоединении к торговой системе. URL: <https://www.npr-sr.ru/ru/regulation/joining/std/index.htm>.
- [2] СО 34.04.181-2003. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей.
- [3] Инструкция по организации ремонта энергетического оборудования электростанций и подстанций: утв. министром энергетики и электрофикации СССР 27 июля 1974 г.
- [4] Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. (Приказ Минэнерго РФ от 19.06.2003 №229 СО 34.20.501-2003).
- [5] Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности (Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Лысова А.С., Васьков А.Г.

ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт»

Москва, Россия

nyutaly@yandex.ru, int696@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** При проектировании солнечных электростанций одним из важнейших вопросов является оценка выработки электрической энергии. Этот показатель определяется прежде всего двумя факторами: уровнем инсоляции и КПД солнечных модулей. В процессе эксплуатации под действием внешней среды, прежде всего температуры окружающего воздуха, КПД солнечных модулей может значительно изменяться. Известно, что с увеличением температуры выше номинальной (25 °С) КПД солнечных модулей снижается. Однако для условий России ключевым воздействием являются низкие температуры. Существующие математические модели практически неприменимы к таким условиям.

**Материалы и методы:** Для проведения исследований о влиянии температуры на КПД солнечных модулей использовался статистический анализ данных мониторинга солнечного модуля, входящий в комплект типового лабораторного оборудования «Модель солнечной электростанции».

**Результаты:** Предложена математическая модель изменения КПД при температуре ниже 25 °С. Предложена математическая модель максимальной мощности при температуре ниже 25 °С и постоянном значении сопротивления солнечного модуля.

**Выводы:** В работе проанализированы существующие математические модели, описывающие влияние температуры на КПД солнечных модулей, показаны их особенности при учете низших температур. В результате статистического анализа данных получена температура ниже 25 °С.

**Ключевые слова:** солнечный модуль, эффективность, коэффициент полезного действия, температура, максимальная мощность, сопротивление.

# INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE INFLUENCE ON THE SOLAR MODULES EFFICIENCY

A. Lysova, A. Vaskov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Moscow, Russian Federation

nyutaly@yandex.ru, int696@mail.ru

## Abstract

**Background:** One of the most important issues in the designing of solar power plants is the estimation of the electrical energy generation. This index is determined primarily by two factors: the insolation level and the efficiency of solar modules. In the process of operation the efficiency of solar modules can vary significantly under the influence of changing environmental conditions. Firstly because of the air temperature. It is known that when the temperature rises above the nominal value (25 °C) the efficiency of solar modules decreases. However, the key impact for Russian conditions is the low temperature. Existing mathematical models are practically inapplicable to such conditions.

**Materials and Methods:** The study of the effect of temperature on the solar modules efficiency is carried out using statistical analysis of monitoring data for solar modules, which are working in the laboratory installation "Model of Solar Power Station".

**Results:** A mathematical model of the efficiency change at a temperature below 25 °C is proposed. A mathematical model of the maximum power (constant resistance) of solar modules at a temperature below 25 °C is proposed.

**Conclusions:** The paper analyzes existing mathematical models, which describes the effect of temperature on the solar modules efficiency. Their features are shown with allowance for the lowest temperatures. A temperature below 25 °C is obtained as a result of the statistical analysis of the data.

**Key words:** solar module, efficiency, efficiency factor, temperature, maximum power, resistance.



## I. НАЗНАЧЕНИЕ СТЕНДА

Для проведения исследований использовался комплект типового лабораторного оборудования «Нетрадиционная электроэнергетика – Модель фотоэлектрической солнечной электростанции» (далее – комплект), внешний вид которого представлен на рис. 1. Допускаемый диапазон температур для работы с данным комплектом от +10 до +40 °С, относительная влажность воздуха до 80 % при +25 °С.

## II. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии (ФЭП) – полное название солнечных батарей. Солнечные батареи – это экологичный и автономный источник электроэнергии, преобразующий в электроэнергию солнечный свет [1]. Помимо экологичности, перспективность этого способа заключается в независимости от центральных электросетей, что является немаловажным фактом как с финансовой точки зрения, так и для тех, кто живет вне доступа к ним [2].

В данной работе проводится анализ эффективности солнечного модуля в зависимости от его температуры.

Солнечный модуль является идеальной диодной моделью, эквивалентная схема которой представлена на рис. 2. Эта модель состоит из источника тока и диода, включенных параллельно. Данная схема описывает работу идеального солнечного модуля [4].

Уравнение, описывающее вольт-амперные характеристики солнечного модуля [4] имеет вид:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{U_{pv}}{a N_c U_{th}} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $I_{pv}$  – общий ток, А;  $I_{ph}$  – фототок, А;  $I_0$  – насыщенный переменный диодный ток, А;  $U_{pv}$  – выходное напряжение, В;  $a$  – эмпирический коэффициент;  $U_{th}$  – тепловое напряжение.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики солнечного модуля, описанные уравнением [4]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D. \quad (2)$$



Рис. 1 – Модель солнечной электростанции

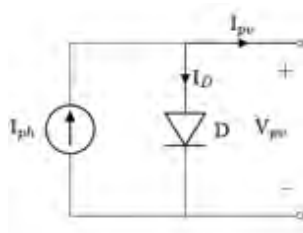


Рис. 2 – Эквивалентная схема модели ФЭП

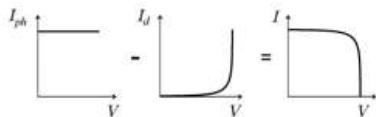


Рис. 3 – Вольт-амперные характеристики солнечного модуля

Параметры, характеризующие фотогальванический модуль [4]:

1. Ток короткого замыкания  $I_{cs}$  – максимальный ток солнечной батареи при напряжении  $U = 0$ . Для многих солнечных батарей это значение близко к фототоку и поэтому часто характеризуется как ток максимума.
2. Напряжение холостого хода  $U_{os}$ , которое зависит от температуры солнечного модуля. С повышением температуры напряжение уменьшается.
3. Коэффициент заполнения  $FF$ :

$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{os} \cdot I_{cs}}, \quad (3)$$

где  $U_{mpp}$  – напряжение в точке максимальной мощности, В;  $I_{mpp}$  – ток в точке максимальной мощности, А.

4. Эффективность  $\eta$ :

$$\eta = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{in}} = \frac{U_{os} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}}. \quad (4)$$

5. Номинальная температура солнечного модуля:

$$t = 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Вольт-амперная характеристика ФЭП – важнейший параметр солнечной батареи, функциональная зависимость между напряжением на электрической нагрузке и током, потребляемым этой нагрузкой, т. е. зависимость  $I = I(U)$  при постоянном световом потоке  $E$  и температуре  $T$ . Это основная энергетическая характеристика, позволяющая определять рабочую характеристику  $\eta = \eta(P)$ , а также оптимальную зону электрической нагрузки по критерию максимального КПД, т. е.  $\eta \rightarrow \max$ . В общем случае при переменном световом потоке  $E$  вольт-амперную характеристику ФЭП при постоянной температуре  $T$  представляют функциональной зависимостью двух переменных  $I = I(U, E)$ , где  $U$  – непрерывно изменяющийся аргумент, а  $E$  – дискретно задаваемый параметр.

Электрическая схема соединений аппаратуры представлена на рис. 4.

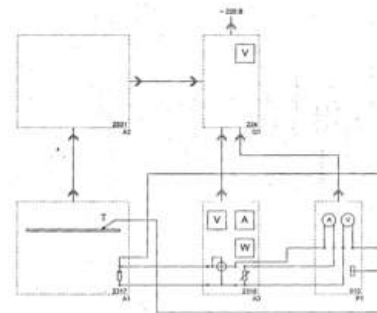


Рис. 4 – Электрическая схема соединений, предназначенная для снятия ВАХ и энергетической характеристик

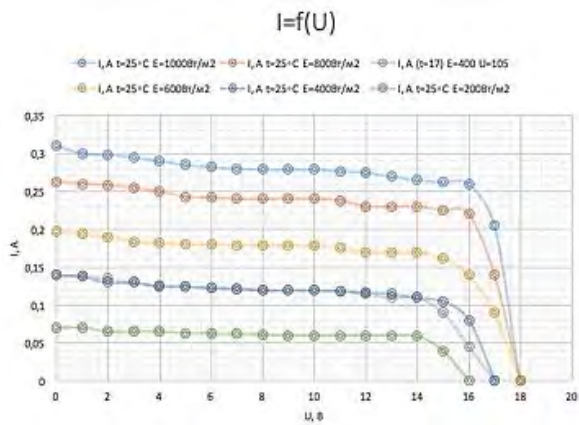


Рис. 5 – Семейство ВАХ солнечного модуля при различных освещенностях

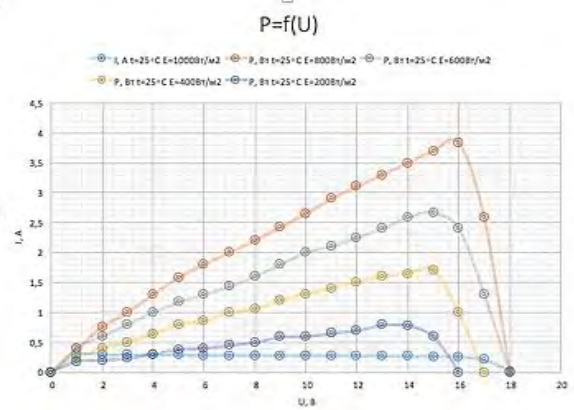


Рис. 6 – Мощностные характеристики при различных освещенностях

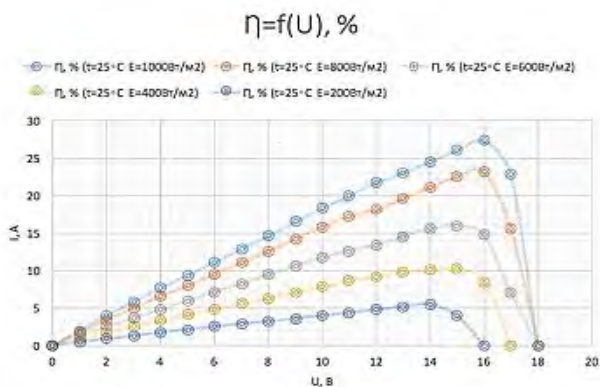


Рис. 7 – Рабочие характеристики солнечного модуля при различных освещенностях

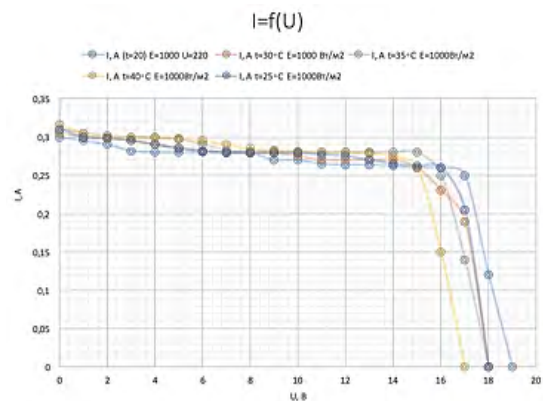


Рис. 8 – Семейство ВАХ при постоянной освещенности и различных температурах

Нагружая элемент, регулируется значение освещенности и поддерживается его постоянность в ходе эксперимента. Проводится эксперимент для значения освещенности  $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$ . Контролируется температура поверхности фотоэлектрического модуля ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Регулируя нагрузку, изменяется ток нагрузки и напряжение на нагрузке фотоэлектрического модуля. Опыт повторяется аналогично для значений освещенности 200, 400, 600 и  $800 \text{ Вт/м}^2$ . Получается семейство вольт-амперных характеристик, которые представлены на рис. 5.

Аналогично проводится опыт для снятия мощностной и рабочей характеристик, при этом фиксируются значения мощности. В результате проведения измерений строится зависимость  $P = f(U)$  (рис. 6), а также рабочая характеристика солнечного элемента  $\eta = f(U)$  (рис. 7). КПД рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{UI}{EF}, \quad (5)$$

$E = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ;  $U = \text{const} = 16 \text{ В}$ ;  $F = 152,375 \text{ см}^2$  – площадь солнечного элемента.

Таким образом, уровень освещенности  $E$  влияет на ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

Для получения зависимости эффективности солнечного модуля для температур ниже  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  проводилось исследование влияния высоких температур ( $25\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а также

температуры ниже данного диапазона ( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Для снятия вольт-амперной характеристики (рис. 8) в зависимости от температуры поддерживается освещенность, равная  $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$ , при этом изменяется температура солнечного элемента.

Строятся мощностная и рабочая характеристики (рис. 9). Для каждого значения температуры находится максимальное значение мощности и строится математическая модель  $P_{\text{max}}(t)$  солнечного модуля, а также характеристики  $R(t)$  при данных значениях мощности (рис. 10, 11).

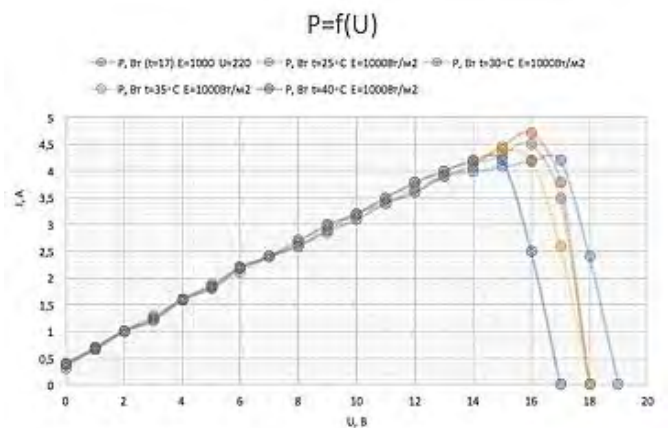


Рис. 9 – Мощностные характеристики солнечного элемента при постоянной освещенности и различных температурах

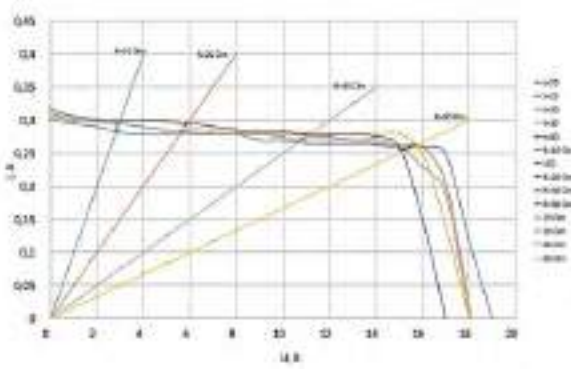


Рис. 10 – Семейство ВАХ при постоянной освещенности и различных температурах, зависимости  $R(U)$

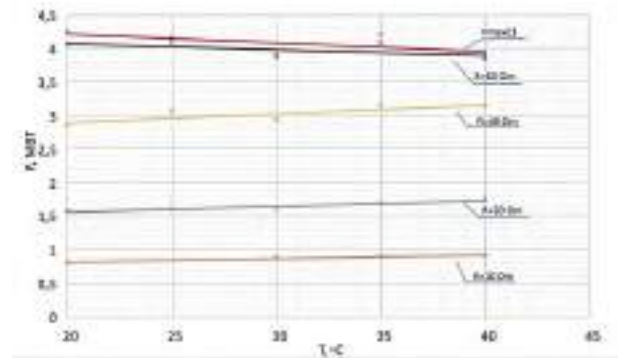


Рис. 11 – Зависимость максимальной мощности от температуры солнечного модуля

#### IV. Выводы

Приведена методика построения вольт-амперных и энергетических характеристик солнечного модуля, в результате анализа которых получена математическая модель изменения КПД от температур выше и ниже номинальной (25 °С). Полученная зависимость КПД от температуры нелинейная. С повышением температуры КПД значительно уменьшается на высоком диапазоне температур по сравнению с диапазоном ниже номинальной температуры.

Проведен анализ зависимости сопротивления от мощности солнечного модуля: сопротивление солнечного модуля зависит от значения мощности. Регулируя значение сопротивления, можно поддерживать необходимую мощность солнечного модуля.

#### Список литературы

- [1] Поулек В., Либра М., Стребков Д.С., Харченко В.В. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Теория и практика использования солнечной энергии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2013. 324 с.
- [2] Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
- [3] Сенигов П.Н., Модель фотоэлектрической солнечной электростанции. Базовые эксперименты. Челябинск: Издательско-полиграфический центр «Учебная техника», 2009. 23 с.
- [4] Хавард Б.В. Моделирование фотоэлектрических модулей в Simulink/MatLab.

# ПРОВЕДЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА КАК ОСНОВА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Манцерова Т.Ф., Лапченко Д.А., Тымуль Е.И.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь  
mantf@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В связи с ограниченностью собственной материально-сырьевой базы и высокой энергоемкостью производства продукции в республике эффективное потребление энергетических ресурсов является одной из важнейших общенациональных задач, решение которой неразрывно связано с дальнейшим социально-экономическим развитием страны и укреплением энергетической независимости и безопасности. Высокие цены на топливно-энергетические ресурсы оказывают влияние на промышленное производство, так как в структуре валового внутреннего продукта (ВВП) более 31 % приходится на промышленную продукцию и потребляется значительная доля топливно-энергетических ресурсов. Это делает необходимыми поиск, разработку и внедрение мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов на предприятиях республики, что может быть достигнуто внедрением энергосберегающих технологий и мероприятий организационно-экономического характера. Для достижения поставленной цели целесообразно использовать энергетический аудит.

**Материалы и методы:** При проведении энергетического мониторинга и аудита могут быть использованы такие методы как приборный, расчетный и опытно-расчетный. Данные получены на основе документального и инструментального обследований.

**Результаты:** Определен перечень возможных энергосберегающих мероприятий в зависимости от исследуемого объекта энергетического аудита и его оцениваемых параметров.

**Выводы:** Вопросы экономии топливно-энергетических ресурсов на промышленных предприятиях тесно связаны с общей задачей повышения эффективности производства. Целесообразным представляется разработка программы энергосбережения топливно-энергетических ресурсов с учетом технологических особенностей производства и результатов энергетических обследований.

**Ключевые слова:** топливно-энергетические ресурсы, промышленное предприятие, энергетический аудит, этапы, факторы, энергосберегающие мероприятия.

## ENERGY AUDIT AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF THE PROGRAM OF ENERGY SAVING IN INDUSTRIAL ENTERPRISES

T. Mancerova, D. Lapchenko, E. Tymul  
Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic Of Belarus  
mantf@mail.ru

## Abstract

**Background:** Due to the limited material and raw material resources base and high energy intensity of production in the country, the efficient consumption of energy resources is one of the most important national tasks, the solution of which is inextricably linked with the further socio-economic development of the country and the strengthening of energy independence and security. High prices for fuel and energy resources have an impact on industrial production, as in the structure of gross domestic product (GDP) more than 31 % is accounted for industrial products and a significant share of fuel and energy resources is consumed. This makes it necessary to search, develop and implement measures aimed at the efficient use of energy resources in the enterprises of the Republic, which can be achieved by the introduction of energy-saving technologies and measures of organizational and economic nature. To achieve this goal, it is advisable to use energy audit.

**Materials and methods:** Such methods as instrumentation, calculation and experimental-calculation can be used in conducting energy monitoring and audit. The data were obtained on the basis of documentary and instrumental surveys.

**Results:** The list of possible energy-saving measures depending on the studied object of energy audit and its estimated parameters is determined.

**Conclusions:** the issues of fuel and energy resources saving at industrial enterprises are closely related to the General task of improving production efficiency. It is expedient to develop a program of energy saving of fuel and energy resources, taking into account the technological features of production and the results of energy surveys.

**Key words:** fuel and energy resources, industrial enterprise, energy audit, stages, factors, energy saving measures.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на промышленных предприятиях является одним из важных направлений повышения эффективности их работы. В настоящее время доля энергозатрат в себестоимости продукции (без учета стоимости сырья и материалов) составляет 40–45 %, а в отдельных случаях достигает 70–80 %. Для повышения эффективности использования ТЭР целесообразной представляется разработка комплексной программы энергосбережения. Созданию такой программы способствуют проведение энергетического обследования (энергоаудита) и паспортизация на его основе энергетического хозяйства предприятия.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Энергетический аудит является основным инструментом энергетического менеджмента и представляет собой комплексное обследование энергопотребления конкретного производства с целью определения резервов экономии энергии, разработки программы энергосбережения и определения размера инвестиций на энергосберегающие мероприятия.

Основными целями энергетического мониторинга и аудита являются:

- определение форм используемой энергии;
- изучение потребления энергии, сбор данных по затратам энергии;
- проверка текущей информации по энергетике и исследование рабочих процессов и операций;
- определение структуры тарифов на электроэнергию;
- определение удельного потребления энергии;
- определение потенциальных зон производства, где имеются наиболее существенные потери энергии;
- разработка мероприятий по сокращению потребления энергии.

Энергетический аудит призван решать следующие задачи:

- выявление неэкономичных режимов работы оборудования, что осуществляется на основе обследования работы и энергопотребления предприятия и анализа результатов;
- определение возможного потенциала энергосбережения на предприятии по видам энергоносителей и оценка размера инвестиций на энергосберегающие мероприятия;
- разработка комплексной программы по энергосбережению, включающей в себя технико-экономические обоснования эффективности применения конкретных мероприятий, с учетом динамики развития предприятия;

- составление энергетического паспорта с отражением всех основных сведений об энергохозяйстве предприятия и оценка эффективности использования ТЭР по объектам предприятия.

Методически проведение энергоаудита разделяется на предварительный этап (предварительный аудит), на котором происходит ознакомление с объектом и его энергопотребляющими системами и устройствами, и на основной этап – собственно энергоаудит (подробный аудит) [1].

Предварительный этап служит для составления программы подробного энергоаудита. Он заключается в записи и анализе потребления энергии определенным участком производства за установленный временной период. На этом этапе определяются основные энергетические характеристики объекта, его систем и устройств, выделяются наиболее энергоемкие системы энергопотребления и места наиболее вероятных потерь энергоресурсов. Аудит может быть выполнен быстрым осмотром оборудования, системы энергоснабжения и счетов на топливо. Визуальный осмотр проводится с целью определения возможностей экономии энергии и установления необходимости в более подробном анализе. Предварительный этап выполняется экспертами энергоаудита совместно с персоналом предприятия (объекта). Информацию следует фиксировать в специально разработанных табличных формах и в описательном тексте. По результатам предварительного аудита составляется программа проведения подробного энергетического аудита, согласованная с руководством предприятия. В конце предварительного этапа составляется программа проведения энергоаудита, которая согласуется с администрацией объекта и подписывается двумя сторонами. В зависимости от сложности предприятия на эту стадию аудита может потребоваться 1–3 дня [2].

Подробный аудит заключается в сборе и записи полной информации о потребляемой энергии на каждом участке производства за каждый временной период с расчетами энергетических балансов и показателей энергетической эффективности. Для проведения подробного аудита используются резервные портативные контрольно-измерительные приборы. Продолжительность проведения подробного аудита может составлять недели, а иногда и месяцы.

На всем протяжении энергетического обследования происходит сбор информации в соответствии с разработанной программой.

Для восполнения отсутствующей информации, необходимой для оценки эффективности использования энергии, применяется так называемое инструментальное обследование. Инструментальное обследование применяется также и в тех случаях, когда имеющаяся информация вызывает сомнения в достоверности.

Проведению подробного энергетического аудита предшествует предварительный энергетический осмотр. Для того чтобы облегчить работу по обследованию, обычно заранее подготавливают соответствующие формы по энергетическому осмотру, в которых должна быть отражена вся необходимая информация. Затем при обследовании в подготовленные формы производится запись информации.

Объекты энергетического аудита, параметры проверки и рекомендуемые энергосберегающие мероприятия приведены в таблице.

Процесс энергетического обследования состоит из пяти этапов:

1. Разработка технической программы.
2. Проведение энергетического обследования в рамках технической программы.
3. Обработка и анализ результатов обследования.
4. Разработка мероприятий по сбережению ТЭР.
5. Составление энергетического паспорта.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГОАУДИТА

Объекты энергетического аудита	Параметры проверки	Энергосберегающие мероприятия
Паровые системы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• температура и давление пара;</li> <li>• наличие и состояние конденсатоотводчиков;</li> <li>• состояние теплоизоляции;</li> <li>• возможные места утечки пара;</li> <li>• возврат конденсата</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• устранение утечек пара;</li> <li>• выполнение теплоизоляции паропроводов</li> <li>• установка конденсатоотводчиков и возврат конденсата;</li> <li>• утилизация тепла конденсата</li> </ul>
Система сжатого воздуха (компрессорные системы, системы распределения и регулирования давления)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• давление у потребителя;</li> <li>• присутствие в воздухе конденсата;</li> <li>• наличие утечек;</li> <li>• состояние системы охлаждения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• устранение утечек воздуха и его осушка;</li> <li>• установка систем регулирования давления;</li> <li>• секционирование компрессоров;</li> <li>• межступенчатое охлаждение;</li> <li>• ограничение расхода охлаждающе воды;</li> <li>• применение экономичных компрессоров</li> </ul>
Водоснабжение (насосные установки, электропривод насосов)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• режимы работы насосов;</li> <li>• утечки воды;</li> <li>• непроизводительные потери воды</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• устранение утечек воды;</li> <li>• уменьшение потерь энергии на транспортирование воды по трубопроводным системам;</li> <li>• модернизация электроприводов насосов</li> </ul>
Котельные установки	<ul style="list-style-type: none"> <li>• давление, состав дымовых газов в различных точках тракта;</li> <li>• температура воды и воздуха;</li> <li>• параметры пара;</li> <li>• КПД установки;</li> <li>• состояние теплоизоляции;</li> <li>• потери тепла с излучением, дымовыми газами и проточной водой;</li> <li>• тепловой баланс</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• теплоизоляция наружных поверхностей установки;</li> <li>• установка автоматических регуляторов;</li> <li>• уплотнение клапанов и тракта;</li> <li>• утилизация тепла дымовых газов и продувочной воды;</li> <li>• модернизация нагнетательных устройств</li> </ul>
Печи	<ul style="list-style-type: none"> <li>• давление, состав и температура дымовых газов в топках и тракте печи;</li> <li>• температура наружных поверхностей;</li> <li>• расход и температура охлаждающей воды;</li> <li>• характеристики электропривода нагнетательных устройств;</li> <li>• нагрузка и мощность электрических печей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• теплоизоляция наружных поверхностей печи;</li> <li>• установка автоматических регуляторов;</li> <li>• уплотнение заслонов и клапанов;</li> <li>• утилизация тепла дымовых газов и воды;</li> <li>• предварительный подогрев шихты за счет утилизируемого тепла;</li> <li>• установка регенераторов;</li> <li>• модернизация нагнетательных устройств</li> </ul>
Бойлеры и теплообменники	<ul style="list-style-type: none"> <li>• входная и выходная температура теплоносителей;</li> <li>• расход теплоносителей;</li> <li>• перепады давления;</li> <li>• потери тепла;</li> <li>• КПД аппаратов;</li> <li>• состояние теплоизоляции</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• изоляция трубопроводов;</li> <li>• изоляция наружных поверхностей;</li> <li>• очистка теплообменных поверхностей</li> </ul>
Система кондиционирования воздуха, отопление, вентиляция	<ul style="list-style-type: none"> <li>• характеристики электроприводов насосов, вентиляторов, систем регулирования теплообменников;</li> <li>• температура и расход теплоносителя;</li> <li>• температура и влажность воздуха в помещениях и снаружи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• теплоизоляция трубопроводов;</li> <li>• устранение утечек;</li> <li>• рекуперация вентиляционного тепла;</li> <li>• применение термосифонов и тепловых насосов;</li> <li>• установка центральных и индивидуальных регуляторов</li> </ul>
Освещение	<ul style="list-style-type: none"> <li>• соответствие уровня освещенности категории помещения и рабочему месту;</li> <li>• состояние окон;</li> <li>• состояние осветительных приборов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• использование энергоэффективных типов ламп;</li> <li>• использование естественного и местного освещения;</li> <li>• внедрение системы автоматического регулирования (установка детекторов присутствия, таймеров, секционирование осветительных сетей)</li> </ul>
Электрооборудование	<ul style="list-style-type: none"> <li>• суточные и недельные графики напряжений, активной и реактивной мощности;</li> <li>• пиковые нагрузки оборудования;</li> <li>• время холостого хода</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оптимизация нагрузки в трансформаторах;</li> <li>• замена устаревших электроустановок на современные энергоэффективные модели;</li> <li>• модернизация электрооборудования</li> </ul>
Здания	<ul style="list-style-type: none"> <li>• качество изоляции стен;</li> <li>• уплотнение дверных и оконных проемов;</li> <li>• состояние систем водоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, освещения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дополнительная изоляция стен и перекрытий;</li> <li>• вакуумное остекление;</li> <li>• установка регулирующих устройств;</li> <li>• модернизация системы отопления и водоснабжения</li> </ul>

При проведении энергетического обследования следует учитывать различные факторы: отраслевую принадлежность предприятия; функциональные особенности предприятия (потребитель энергоресурсов или производитель отдельных видов энергии); возможность использования энергоресурсов только для собственных нужд или для оказания услуг по передаче тепла и электроэнергии другим потребителям; инвестиционные возможности предприятия по реализации энергосберегающих мероприятий.

Энергоаудит, как правило, выполняется с привлечением исполнителей от различных лицензированных организаций: аудиторских, проектных, исследовательских и пр.

Однако опыт проведения энергоаудитов показывает, что наиболее высокие результаты достигаются при решении указанных задач в комплексе единой организацией-исполнителем с привлечением компетентных специалистов при обязательном участии заинтересованных специалистов самого предприятия.

Состав группы энергоаудита зависит от характера обследуемого объекта и должен включать специалистов по электроснабжению, теплоснабжению, газоснабжению, водоснабжению, компрессорному и холодильному оборудованию, метрологии, контрольно-измерительным приборам и автоматике (КИПиА). Условием достоверного, качественного энергоаудита является наличие приборного парка в совокупности с серьезным программным обеспечением.

После завершения энергетического обследования оформляются отчет о проведенном энергетическом обследовании, топливно-энергетический баланс, энергетический паспорт предприятия, рекомендации [3].

Технический отчет о проведении энергетического обследования должен включать в себя следующие характеристики:

1. Краткая характеристика предприятия и структурная взаимосвязь основных производств предприятия.
2. Энергоемкость производств предприятия по видам потребляемых энергоресурсов.
3. Динамика удельного энергопотребления по видам энергоресурсов и по основным видам выпускаемой продукции и сравнение их с соответствующими характеристиками энергоэффективных предприятий-аналогов.
4. Фонд фактического рабочего времени технологических агрегатов и механизмов с оценкой использования установленных мощностей и коэффициентов их загрузки.
5. Структура распределения и учета потребления энергоносителей с оценкой источников их поступления и потребления.
6. Распределение расхода всех видов энергоносителей по предприятию, т. е. по технологическим переделам, по вспомогательным службам (например, в водородных циклах и очистных сооружениях, в компрессорном и холодильном оборудовании, если оно не входит в основной технологический процесс),

по ремонтно-механическим, строительным, административно-бытовым службам и т. д.

7. Нормативные и фактические потери энергоносителей в распределительных сетях и системах.

При выработке рекомендаций по повышению эффективности использования ТЭР необходимо учитывать, что проведение энергосберегающих мероприятий неизбежно связано с дополнительными затратами. Поэтому экономический эффект энергосберегающего мероприятия определяется путем сравнения величины снижения затрат, которая достигается в результате экономии энергии после проведения энергосберегающего мероприятия, и дополнительных затрат, связанных с проведением энергосберегающего мероприятия.

В настоящее время энергоаудит в Республике Беларусь осуществляется в соответствии с «Положением о проведении энергетического обследования предприятий, учреждений и организаций», разработанным Государственным комитетом по энергосбережению и энергетическому надзору Республики Беларусь.

По результатам энергетического обследования составляется соответствующий технический отчет, на основе которого разрабатывается оптимальный режим потребления топливно-энергетических ресурсов, а также программа по энергосбережению, выполнение которой контролируется и анализируется до следующего энергетического обследования [4].

### III. Выводы

Качество и эффективность технологических процессов, конкурентоспособность продукции промышленного предприятия в значительной степени определяются их энергетической эффективностью, которая характеризуется уровнем и структурой потребления энергоресурсов, исключая их нерациональный расход и сверхнормативные потери. Основным инструментом для оценки энергоэффективности предприятия является энергоаудит.

Результаты энергетического аудита служат основой для формирования перспективного плана по снижению потребления ТЭР на промышленных предприятиях. Выбор направлений энергосбережения, а следовательно, и конкретных мероприятий, определяется параметрами проверки объектов энергоаудита с учетом специфики вида деятельности аудируемого предприятия. Руководство организации при принятии решений по финансированию программы энергосбережения в первую очередь должно учитывать энергоэффективность конкретных мероприятий, а затем определить схему финансирования проектных решений.

### Список литературы

- [1] Ганжа В.Л. Пути решения энергетической проблемы в Беларуси // Энергоэффективность. 1997. № 11. С. 3–5.
- [2] Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Основы энергосбережения. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. 569 с.
- [3] Беляев В.М., Ившин В.В. Основы энергосбережения: учеб.-метод. комплекс. Минск: МИУ, 2004. 111 с.
- [4] Баштовой В.Г., Березовский Н.И., Волков Ю.А. Энергосбережение. Курс лекций. Минск: Технология, 2009. 146 с.

# РАЗРАБОТКА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЧИСЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ СТАНЦИЙ С СОЛНЕЧНЫМИ ПАНЕЛЯМИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ

Местников Н.П.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»  
Якутск, Россия  
sakhacase@bk.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** С 2016 года была начата передача земель Дальневосточного федерального округа гражданам России для осуществления фермерской и предпринимательской деятельности или строительства жилого строительства. На 30 октября 2017 года было отдано 31 247 участков на пользование. К сожалению, данные участки в основном не имеют всей необходимой инфраструктуры для продуктивной предпринимательской и фермерской деятельности, а именно: электричество, газ, тепло и дороги. Следует отметить, что для обеспечения электроэнергией участка требуется построить ВЛ 0,4 кВ, в котором на строительные-монтажные работы и приобретение необходимого оборудования тратится около 600–800 тыс. руб./км в зависимости от местоположения участка. В основных случаях расстояние от электростанции до участка «Дальневосточный гектар» достигает более 10 кмВЛ 0,4 кВ, что составляет 6–8 млн руб. в денежном эквиваленте. Данные показатели являются экономически невыгодными и неприемлемыми для начинающего фермера. Таким образом, необходимо получить методику внедрения децентрализованных систем электроснабжения со значительной экономией дизельного топлива и ГСМ.

**Материалы и методы:** Разрабатывается математическая модель работы системы накопления на основе полного изменения с аккумуляторов на суперконденсаторы. Определены оптимальные условия для выбора электроэнергетического оборудования. Производится учет климатических особенностей Якутии.

**Результаты:** Определены суточные графики потребления электроэнергии на 1 семью сельской местности и 1 объект фермерского хозяйства. Разработаны оптимальные режимы работы автоматики системы накопления энергии при максимальных и базовых нагрузках. Выбраны наиболее пригодные под определенные параметры электроэнергетическое оборудование.

**Выводы:** Предложена методика совместной работы модели гибридной установки с суперконденсаторами для эффективного электроснабжения отдаленных потребителей.

**Ключевые слова:** ДГУ, солнечные панели, суперконденсаторы, ионисторы, АСУ, суточный график нагрузки, фермерские хозяйства, гибридные установки, ручное переключение, ГСМ, продолжительность сияния, величина солнечной радиации, базовая и максимальная нагрузки, срок окупаемости, вес установки.

## DEVELOPMENT OF DECENTRALIZED SYSTEM OF ELECTRICAL SUPPLY OF SMALL-SIZED SETS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) WITH THE USE OF HYBRID STATIONS WITH SOLAR PANELS AND SUPERCONDENSATORS

N. Mestnikov

North-Eastern Federal University  
Yakutsk, Russian Federation  
sakhacase@bk.ru

## Abstract

**Background:** Since 2016, the transfer of land in the Far Eastern Federal District to Russian citizens for the implementation of farming and entrepreneurial activities or construction of residential construction has been started. As of October 30, 2017, 31 247 land plots were allocated for use. Unfortunately, these sites basically do not have all the necessary infrastructure for productive entrepreneurial and farming activities, namely electricity, gas, heat and roads. It should be noted that to provide electricity to the site it is required to build a 0.4 kV overhead line in which construction and installation works and the acquisition



of necessary equipment are spent about 600-800 thousand rubles / kilometer, depending on the location of the site. In the main cases, the distance from the power plant to the "Far Eastern Hectare" section is more than 10 kilometers of 0.4 kV overhead lines (6-8 million rubles). These indicators are economically unprofitable and unacceptable for a beginner farmer. Thus, it is necessary to obtain a methodology for the introduction of decentralized power supply systems with significant savings in diesel fuel and fuels and lubricants.

**Materials and methods:** A mathematical model of the work of the accumulation system is developed on the basis of a complete change from batteries to supercapacitors. Optimal conditions for the choice of electric power equipment are determined. The climatic features of Yakutia are taken into account.

**Results:** The daily schedules of electricity consumption for 1 family of rural areas and 1 farm object were determined. The optimal modes of operation of the automatic system of energy storage at the maximum and base loads are developed. Elected the most suitable for certain parameters of electric power equipment.

**Conclusions:** A technique for working together a model of a hybrid installation with supercapacitors for efficient power supply to remote consumers is proposed.

**Key words:** DGU, solar panels, supercapacitors, ionists, ACS, daily load graph, farms, hybrid plants, manual switching, fuel, duration of radiance, the value of solar radiation, basic and maximum loads, payback period, installation weight.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Якутия обладает значительными запасами минеральных ресурсов (алмазов, золота, цветных и благородных металлов), энергоносителей (нефти, газа, урана), крупным гидроэнергетическим потенциалом. [1]

В свое время выборочный подход к освоению разведанных запасов полезных ископаемых, очаговое развитие и размещение производительных сил сформировали локальные промышленные узлы. Открытым способом велась добыча алмазов в Западной Якутии, угля – в Южной Якутии. Отрасли местной, легкой, пищевой промышленности формировались в Центральной Якутии. Значительные расстояния между промышленными узлами обусловили образование независимых друг от друга энергетических районов: Западного, Центрального, Южного. В каждом из энергетических районов имеется один основной энергетический источник: в Западном – каскад Вилюйских ГЭС (680 МВт), в Центральном – Якутская ГРЭС на природном газе (320 МВт), в Южном – Нерюнгринская ГРЭС на угле (618 МВт). При относительно малой мощности энергетических источников радиус электроснабжения является значительной из-за низкой плотности нагрузок (при среднероссийской плотности населения 2,2 чел. на км<sup>2</sup>, а плотность населения республики составляет 0,3 чел. на км<sup>2</sup>). В результате централизованным электроснабжением от вышеперечисленных энергетических источников охвачена треть территории РС(Я) с численностью населения около 800 тыс. чел.

## II. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ЯКУТИИ

Одной из серьезных проблем функционирования энергосистемы Якутии является то, что обособленность энергетических районов не позволяет рационально использовать структуру энергетического хозяйства республики для централизованного энергообеспечения, повысить надежность энергоснабжения и создать конкурентную среду по производству электроэнергии [2].

Другую проблему создает малая энергетика северной части республики, которая в основном обеспечивает потребности населения, бюджетных организаций и предприятий. Север Якутии охватывает площадь 1,7 млн км<sup>2</sup>, или 53 % территории республики. Столь большая площадь делает невозможным ее охват линиями электропередач, а отсутствие крупных потребителей приводит к нецелесообразности строительства энергетических источников

большой установленной мощности. В результате энергоснабжение 144 населенных пунктов осуществляется изолированными, автономными энергетическими источниками, которые представлены в виде дизельных и газотурбинных электростанций. Функционирование северного энергетического района характеризуется сложной транспортной схемой доставки топлива с несколькими перевалками. Высокая стоимость топлива в местах потребления, низкие технико-экономические показатели существующих энергетических источников малой мощности приводят к высокой себестоимости производства электроэнергии и тепла (в России ежегодно затрачивается более 16 млрд руб. на завоз топлива в северные регионы, в том числе в северные районы РС(Я) – свыше 7,5 млрд руб. Кроме этого, протяженность данного пути составляет 500–600 суток. Износ ДЭС превышает 40–60 % в большинстве районов северной части Якутии, несмотря на то, что за год в эксплуатацию планируется ввести 7 новых автоматизированных ДЭС [2].

## III. ПРОЕКТ «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГЕКТАР»

Законопроект предполагает возможность оформить участок в аренду или собственность только на шестой год (земель лесного фонда – после 15 лет) его использования, если он «использовался для осуществления любых видов деятельности, не запрещенной российским законодательством». В том числе разрешено продавать лес с участков лесного фонда. Земля не может быть передана, подарена или продана иностранным гражданам, лицам без гражданства, иностранным юридическим лицам или образованных с их участием юридическим лицам. Согласно закону №119-ФЗ РФ земля предоставляется на 5 лет на основании договора безвозмездного пользования. По истечении пятилетнего срока землю можно оформить в собственность или долгосрочную аренду.

Настоящий Федеральный закон регулирует отношения, связанные с предоставлением земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности и расположенных на территориях Республики Саха (Якутия), Камчатского края, Приморского края, Хабаровского края, Амурской области, Магаданской области, Сахалинской области, Еврейской автономной области, Чукотского автономного округа, гражданам Российской Федерации (далее – граждане).

#### IV. НЕДОСТАТКИ «ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ГЕКТАРА»

Основной проблемой является электроснабжение участков, которые были выданы согласно Федеральному закону от 1 мая 2016 г. № 119-ФЗ (ред. от 29 июля 2017 г.) «Об особенностях предоставления гражданам земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности и расположенных на территориях субъектов Российской Федерации, входящих в состав Дальневосточного федерального округа, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». С 2016 года была начата передача земель Дальневосточного федерального округа гражданам России для осуществления фермерской и предпринимательской деятельности или строительства жилого строительства. На 30 октября 2017 года было отдано 31 247 участков на пользование. К сожалению, данные участки в основном не имеют всей необходимой инфраструктуры для продуктивной предпринимательской и фермерской деятельности, а именно: электричество, газ, тепло и дороги. Следует отметить, что для обеспечения электроэнергией участка требуется построить ВЛ 0,4 кВ, в котором на строительно-монтажные работы и приобретение необходимого оборудования тратится около 600–800 тыс. руб./км в зависимости от местоположения участка. В основных случаях расстояние от электростанции до участка «Дальневосточный гектар» достигает более 10 км ВЛ 0,4 кВ, что составляет 6–8 млн руб. в денежном эквиваленте. Данные показатели являются экономически невыгодными и неприемлемыми для начинающего фермера. Поэтому использование объектов децентрализованного электроснабжения наиболее реально и достижимо при комбинации дизель-генератора и солнечной энергетики.

#### V. ЛОГИСТИКА ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯКУТИИ

Солнечная энергетика в Республика Саха имеет динамичное развитие в увеличении суммарной мощности генерации преимущественно в населенных пунктах децентрализованного электроснабжения. В 2016 году в пгт. Батагай была запущена крупнейшая СЭС с удельной мощностью 1 МВт и системой накопления энергии в виде огромного количества Li-ion аккумуляторов. Руководством эксплуатирующей организации АО «Сахаэнерго» планировалось на летний период полностью заменить ими дизель-генераторы с целью уменьшения износа оборудования и экономии ГСМ. Следует отметить, что топливо-снабжение отдаленных потребителей производится сложной схемой транспортировки:

- Усть-Кут – Якутск (до 30 дней);
- Якутск – Тикси (30-40 дней);
- Тикси – пгт. Батагай (от 180 до 360 дней).

По данной системе производится топливо-снабжение всего северного энергорайона. Для электроснабжения малых хозяйств наиболее эффективна система «дизель + солнце», так как система «дизель + ветер» технически возможна в прибрежной части моря Лаптевых, а в данном районе слабо развито сельское хозяйство.

#### VI. РАСЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ

В качестве потребителя были выбраны коневодческие хозяйства Якутии и крестьянское фермерское хозяйство «Нэлэгэр» (далее – КФХ) Усть-Алданский район центральная часть РС(Я). Данные для КФХ и среди коневодческих хозяйств Якутии в среднем приведены в табл. I.

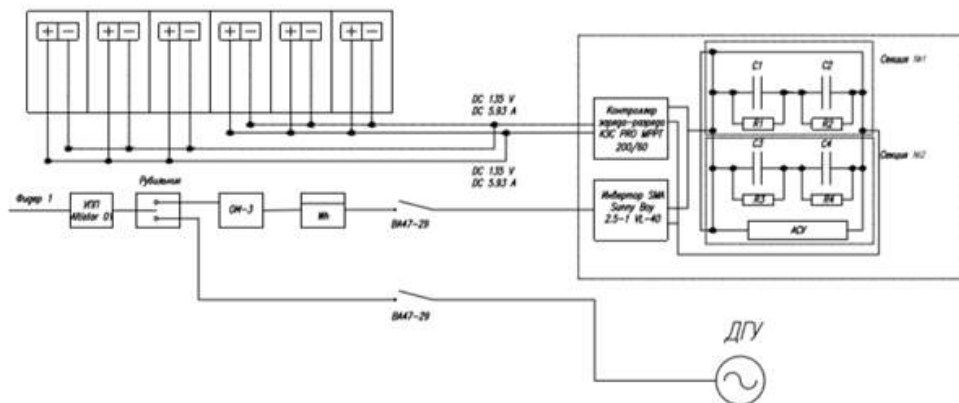
Таблица I – ПАРАМЕТРЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ КФХ

Электроприборы	Установленная мощность, Вт	
	Крестьянское фермерское хозяйство «Нэлэгэр»	Коневодческое хозяйство
Холодильник	160	
Телевизор	180	
Компьютер	140	
Освещение	600	
Чайник	2200	
Сепаратор	60	–
Электродойник	550	–
Маслобойник	30	–
Потребление в день, кВт·ч	6,533	6,724

#### VII. ПРИНЦИПЫ И ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Данный агрегат, схема которого представлена на рисунке, предполагает собой комбинированную электростанцию по системе «Дизель + Солнце» низкого напряжения (далее – НН) с удельной мощностью 3 кВт. Такая комбинация успешно используется в объектах компании АО «Сахаэнерго» в Северном энергетическом районе Якутии. Монтаж установки производится с минимальной сложностью для потребителя. Основной защитой от токов короткого замыкания ст.7.5.10. при НН, являются плавкие предохранители, согласно ПУЭ.

Параллельная работа солнечных панелей и ДГУ не приоритетна ввиду того, что основной целью проекта является выход на окупаемость с помощью значительной экономии средств, направленных на ГСМ. Для облегчения



Структурная схема гибридной установки

монтажа и эксплуатации установки переключение ДГУ и солнечных панелей производится без использования автоматики. В случае поломки рубильников *P1* и *P2* они могут быть заменены с последовательным отключением генерирующих элементов установки. Основной генерирующей составляющей являются солнечные панели. Панели имеют некоторые минусы, главным из которых является влияние погоды на объем выработки.

Для увеличения эксплуатационного ресурса системы накопления, АСУ и ДГУ вводится ограничитель мощности ОМ-3. Для защиты от пускового тока нагрузки устанавливается устройство плавного пуска Altistar 01. Управление включения того или иного источника энергии производится вручную для максимального облегчения монтажа и эксплуатации установки.

#### VIII. СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГИЧНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

Для электроснабжения объектов «Дальневосточного гектара» могут быть выбраны следующие типы технических решений (табл. II):

1. Ввод ВЛ 10 кВ с КТП 10/0,4 кВ.
2. Приобретение дизель-генератора с удельной мощностью 3–4 кВт.
3. Приобретение комбинированной электростанции системы «Дизель + Солнце» с системой накопления (аккумуляторы).
4. Приобретение комбинированной электростанции системы «Дизель + Солнце» с системой накопления (суперконденсаторы).

Таблица II – Анализ возможных вариантов установок

№ варианта	Затраты на ГСМ, руб./мес.	Цена, руб.	Масса, кг	Срок службы, лет
1	Нецелесообразен			
2	218 050	34 000	87	5
3	39 335	219 545	839	6
4	39 335	477 395	191,2	13

#### IX. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Далее производим расчет срока окупаемости проекта по разным вариантам (техническим решениям). Принимаем ставку дисконтирования, равной 16 %. Результаты расчета представлены в табл. III.

Таблица III – РАСЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТА ПО ВАРИАНТАМ

Тип установки	PP, лет	NPV, тыс. руб.	IRR, %
Вариант № 1	–	–	–
Вариант № 2	–	–	–
Вариант № 3	2	15,7	25,01
Вариант № 4	6	20,1	17,22

#### X. РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно проведенным расчетам можно сделать следующие выводы:

1. Вариант № 2 пригоден для использования фермерами, но со значительными затратами по ГСМ.
2. Вариант № 3 пригоден для использования фермерами проекта «Дальневосточный гектар» ввиду меньшей цены и отсутствия мобильности оседлых фермерских хозяйств.
3. Вариант № 4 ввиду легкого веса, малых габаритов и значительного срока эксплуатации может использоваться геологоразведочными экспедициями ПАО «АЛРОСА» и ООО «АРКТИК КАПИТАЛ» с целью интенсивного освоения Арктики, а также Вооруженными силами РФ.

#### Список литературы

- [1] Баскаков А.П., Мунц В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. для ВУЗов. М.: Изд-во Дом «БАСТЕТ», 2013. 368 с.
- [2] Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика: учеб. пособие. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 208 с.
- [3] Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК Пресс, 2012. 144с.
- [4] Константинов А.Ф. Гидроэнергетические установки: учеб. пособие для студ. очн. и заочн. форм обуч. Якутск: Изд-во Якутского университета, 2009. 171 с.
- [5] Константинов А.Ф. Нетрадиционные энергоисточники Якутии / отв. ред. Н.С. Бурянина. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 212 с.
- [6] Кудрин Б.И. Системы электроснабжения: учеб. пособие для студентов ВПО. М.: Изд. центр «Академия», 2011. 352 с.
- [7] Монахова И. Энергия // Международный конгресс по нетрадиционной энергетике.
- [8] Пополов А. Энергетика третьего тысячелетия // Снабженец. 2001. № 35. С. 52–56.
- [9] Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование ЭС и ПС: учеб. для студ. СПО. 5-е изд., стер. М.: ИЦ «Академия», 2008. 448 с.

# ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ЧЕТЫРЕХСТВОЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Мирсалихов К.М.<sup>1</sup>, Федоренков Д.И.<sup>2</sup>, Грибков А.М.<sup>3</sup>  
ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
<sup>1</sup>mirsalihovkm@gmail.com, <sup>2</sup>dif-96@mail.ru, <sup>3</sup>gribkovalmi@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Дымовая труба является более дешевым средством снижения приземных концентраций вредных веществ, чем газоочистка, но ее стоимость все же соизмерима со стоимостью основного оборудования станции. К тому же она должна соответствовать ряду экологических, экономических и эксплуатационных требований. Для обеспечения высокой надежности дымовой трубы ТЭЦ применяют конструкцию с несколькими стволами внутри железобетонной оболочки. Такая конструкция значительно упрощает профилактические осмотры, проведение текущего и капитального ремонта, а также, в случае выхода из строя одного из стволов, позволяет отключать только те котлоагрегаты, которые подсоединены к этому газотводящему стволу, а не все энергетическое оборудование, подключенное к трубе. Таким образом необходимо рассмотреть влияние экологических и экономических факторов на основные параметры дымовых труб данного типа.

**Материалы и методы:** Использовались аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) и математическое программное обеспечение «PTC Mathcad».

**Результаты:** Проведен численный эксперимент на основе технико-экономических расчетов по методике, изложенной в [1] с использованием математического программного обеспечения «PTC Mathcad».

**Выводы:** Приведены результаты численного эксперимента о влиянии таких параметров, как концентрация вредных веществ, которая может быть создана дымовой трубой; стоимость стройматериалов; число часов фактической работы котельного оборудования; доля заемных средств в общей сумме инвестиций; доля собственных средств; инфляция. Эти данные позволяют оценить динамику изменения основных параметров многоствольных дымовых труб, что дает возможность в дальнейшем более точно и эффективно проектировать вновь возводимые трубы этого типа.

**Ключевые слова:** многоствольная дымовая труба, программа расчета, тепловая электрическая станция.

## INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC FACTORS ON CHOICE OF THE OPTIMUM SIZES OF FOUR-FLUE STACKS

K. Mirsalichov<sup>1</sup>, D. Fedorenkov<sup>2</sup>, A. Gribkov<sup>3</sup>  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
<sup>1</sup>mirsalihovkm@gmail.com, <sup>2</sup>dif-96@mail.ru, <sup>3</sup>gribkovalmi@mail.ru

## Abstract

**Background:** The stack is the cheapest method of surface concentrates of harmful substances, and it must comply with a number of environmental, economic and operational requirements. To ensure high reliability of the stacks, power stations use a design with several flue inside the reinforced concrete shell. This design greatly simplifies preventive inspections, carrying out current and major repairs, and in the event of failure of one of the trunks, it is possible to disconnect only those boilers that are connected to this gas outlet shaft, and not all power equipment connected to the stack, which significantly increases the reliability operation in comparison with a single-flue stack, but the cost of multi-flue stack remains high. Thus, it is necessary to consider the influence of environmental and economic factors on the main parameters of the stacks of this type.

**Materials and methods:** Aerodynamic calculation of boiler installations (normative method) and mathematical software “PTC Mathcad”.

**Results:** A numerical experiment was performed on the basis of technical and economic calculations using the methodology described in the manual [1] using the mathematical software “PTC Mathcad”.

**Conclusions:** The results of a numerical experiment on the influence of such parameters as number of flues; the concentration of harmful substances that can be created by the stack; cost of building materials; number of hours of actual operation of the boiler equipment; share of borrowed funds in the total amount of investments; share of own funds; inflation. These data allow us to assess the dynamics of changes in the main parameters of multi-fluestacks, which makes it possible in the future to more accurately and efficiently design newly constructed stack of this type.

**Key words:** multi-fluestack, calculation program, thermal power plant.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Дымовая труба является основной частью газозвдушного тракта ТЭС, от функциональности которой зависит надежность и экономичность работы станции. Даже при наличии других методов снижения концентрации вредных веществ на уровне дыхания (сероочистка, пиролиз, газификация, мокрые и сухие способы очистки дымовых газов) применение дымовой трубы остается самым дешевым.

На ТЭС дымовые трубы должны обладать высокой надежностью в связи с отсутствием резервирования отпуска теплоты на отопление. Это требование стало одним из главных факторов появления многоствольных дымовых труб. В дальнейшем из-за удобства эксплуатации и надежности работы дымовые трубы этого типа начали устанавливать достаточно часто. Многоствольные дымовые трубы уже длительное время надежно работают на Костромской ГРЭС, Лукомльской ГРЭС, Омской ТЭЦ, Мосэнерго ТЭЦ-21 и ТЭЦ-25, и на других электростанциях. Многоствольные дымовые трубы распространены и за рубежом: ТЭС Колесон Коув (Канада) [3], ТЭС Коттэм (Англия) [3], ТЭС Тянцжан (Малайзия) [3], ТЭС Касл Пик (Гонконг) [4], ТЭС Коккари (Греция) [4], Дувская ТЭС (Южная Африка) [5] и др.

Несмотря на высокую надежность, многоствольные дымовые трубы стоят дороже одноствольных. Высокая стоимость дымовых труб подтверждает необходимость более детального исследования факторов, влияющих на размеры дымовой трубы.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Выбор размеров дымовых труб производился по оптимальной скорости выхода газов из устья. Оптимальная скорость – это скорость, при которой суммарные дисконтированные затраты оказываются минимальными [1, 2].

Исследование базового варианта расчета привязано к четырехствольной дымовой трубе, с подключением к ней 4-х котлов ТГМ-84 (рис. 1). Стволы одинаковые, круглые металлические, снаружи закрыты тепловой изоляцией. Ветровую и весовую нагрузку стволы воспринимает железобетонная оболочка. Между стволами находится обслуживаемая зона. Для обеспечения свободы тепловых удлинений ствола между ним и площадкой предусматривается зазор с привалочными опорами для ствола [6, 7].

В ходе расчета производится выбор конструкции элементов дымовой трубы, определяются ее геометрические параметры, стоимость трубы согласно актуальным ценам на стройматериалы, затраты, необходимые для транспорта газа. На основании этих данных вычисляются издержки и суммарные дисконтированные затраты  $Z_d$  для каждой скорости. По результатам расчета определяется зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода газов (рис. 2). Скорость дымовых газов, при которой суммарные дисконтированные затраты минимальные, является оптимальной.

Изменяя значения исследуемых параметров, получили массив оптимальных скоростей, характеризующий их зависимость от экологических и экономических условий.

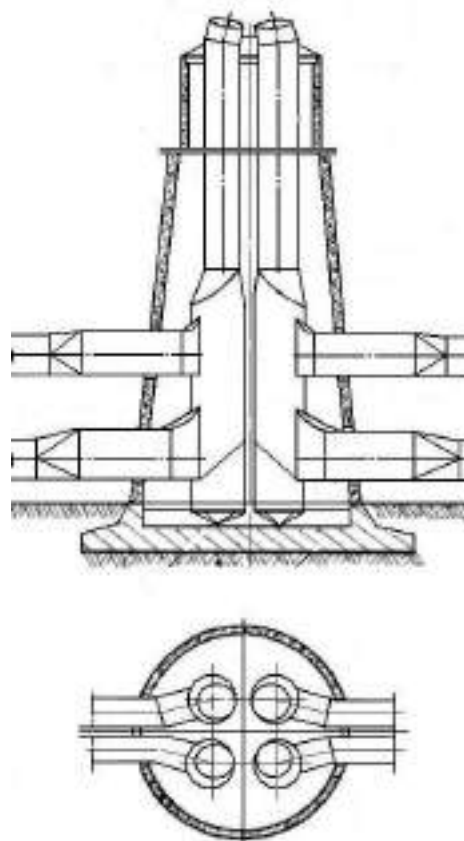


Рис. 1 – Четырехствольная дымовая труба

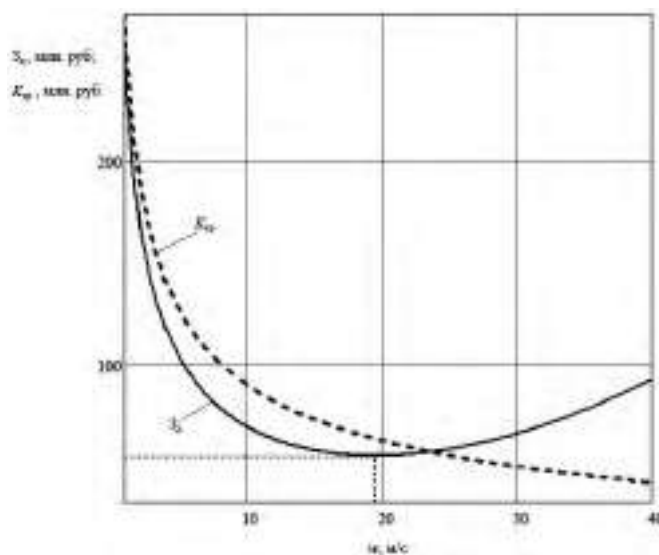


Рис. 2 – Пример нахождения оптимальной скорости по минимуму суммарных дисконтированных затрат

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При расчете базового варианта необходимо учесть следующее:

- труба четырехствольная расположена во втором ветровом районе;
- грунт – средней прочности;
- стоимость железобетонного ствола составляет 10 700 руб./м<sup>3</sup>, железобетона фундамента – 7 300 руб./м<sup>3</sup>, стали для стволов – 436 000 руб./м<sup>3</sup> [8];
- топливо – сернистый мазут;
- температура дымовых газов равна 130 °С, окружающего воздуха – 22 °С;
- объемный расход газов составляет 700 м<sup>3</sup>/с;
- массовый выброс вредных веществ в пересчете на диоксид азота – 700 г/с;
- коэффициент температурной стратификации равен 160, коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе – 1, а коэффициент нагрузки котельного оборудования за рабочий период – 0,75;
- себестоимость электроэнергии – 1,5 руб./кВт·ч;
- фактическая работа котельного оборудования в году – 8 000 ч/год;
- доля заемных средств в общей сумме инвестиций составляет 40 %, собственных средств – 60 %;
- кредит получен под 15 % годовых;
- инфляция – 8 %.

Изменяя приземную концентрацию вредных веществ  $C_{тр}$ , созданную дымовой трубой, до значений, соответствующих предельно допустимой концентрации (ПДК) оксида азота (от 0,01 до 0,2 мг/м<sup>3</sup>), получили зависимости оптимальной скорости газов в стволах  $w$  (м/с), высоты  $H$  (м), стоимости трубы  $K_{тр}$  (млн руб.) и доли стоимости стволов  $L$  в общей стоимости трубы от уровня экологических требований (рис. 3).

С повышением экологических требований уменьшение концентраций  $C_{тр}$  на уровне дыхания достигается увеличением высоты трубы.

Стоимость стволов  $K_{тр}$  изменяется пропорционально их высоте. Но их диаметр при снижении оптимальной скорости увеличивается, увеличивая и диаметр оболочки. Таким образом доля стоимости стволов  $L$  в общей стоимости трубы будет меняться. Из рис. 3 видно, что при уменьшении высоты дымовой трубы  $H$  доля стоимости стволов  $L$  в общей стоимости трубы будет возрастать. Для высоких труб наоборот – стоимость оболочки преобладает над стоимостью стволов, что объясняется повышенными весовой и ветровой нагрузками. С увеличением стоимости дымовой трубы  $K_{тр}$  увеличивается оптимальная скорость выхода дымовых газов  $w$ .

На рис. 4, а представлена зависимость оптимальной скорости газов, стоимости дымовой трубы и суммарных дисконтированных затрат при изменении уровня инфляции от 1 до 20 %. В базовом варианте  $C_{тр}$  принята равной 0,1 мг/м<sup>3</sup>.

Из рис. 4, а следует, что при увеличении инфляции суммарные дисконтированные затраты  $Z_d$  будут также расти. Таким образом, возрастет оптимальная скорость газов  $w$ , а стоимость трубы  $K_{тр}$  снизится.

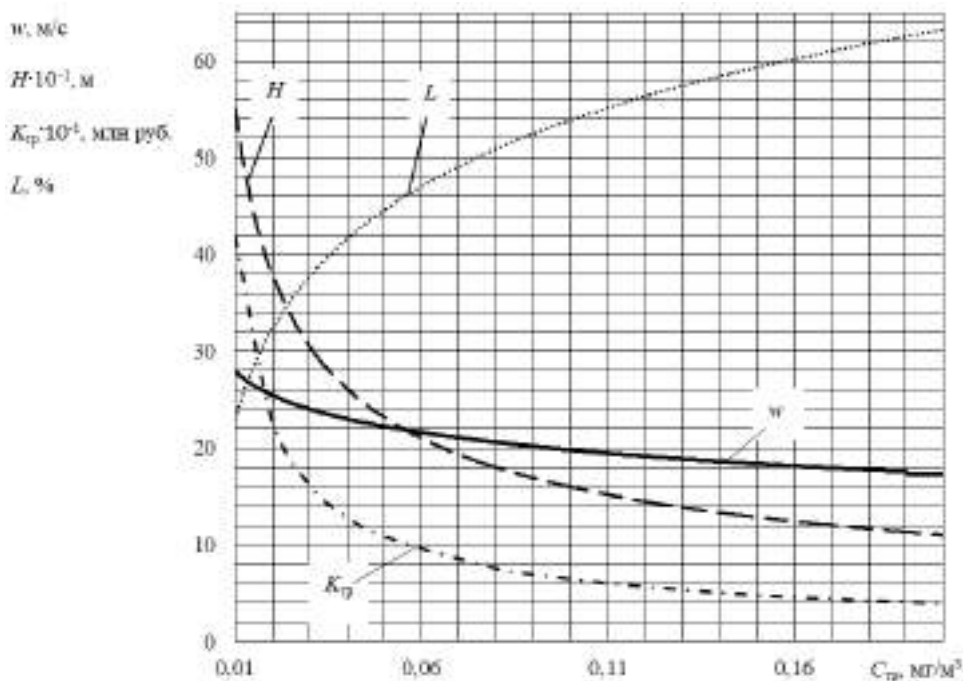


Рис. 3 – Зависимость основных параметров дымовой трубы от уровня экологических требований

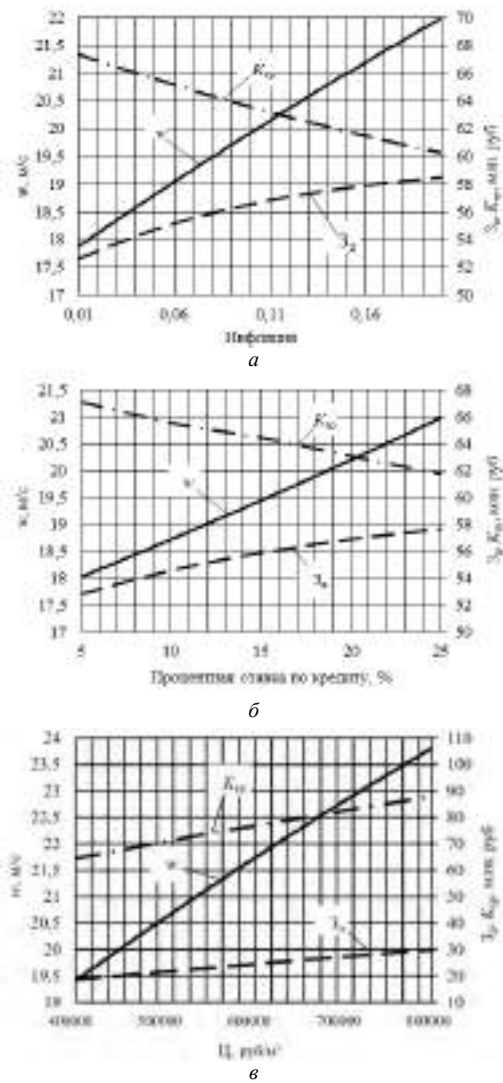


Рис. 4 – Зависимости оптимальной скорости газов, суммарных дисконтированных затрат и стоимости четырехствольной трубы от инфляции (а), процентной ставки по кредиту (б) и цены металла стволков (в)

Аналогичная зависимость наблюдается при изменении процентной ставки по кредиту от 5 до 25 % (рис. 4, б). Данная зависимость была получена для базовых условий и  $C_{тр} = 0,1 \text{ мг/м}^3$ .

При увеличении стоимости металла стволов Ц с учетом монтажа в два раза для базового варианта и  $C_{тр} = 0,1 \text{ мг/м}^3$  возрастают оптимальная скорость газов  $w$ , стоимость трубы  $K_{тр}$  и суммарные дисконтированные затраты  $Z_d$  (рис. 4, в).

Из приведенных расчетов следует, что оптимальная скорость выхода дымовых газов из четырехствольной трубы не сильно зависит от экологических требований и для рассмотренного базового варианта находится в пределах от 18 до 22 м/с.

### Список литературы

- [1] Рогалев Н.Д. и др. Экономика энергетики: учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Рогалева. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 288 с.
- [2] Грибков А.М. Выбор оптимальных размеров дымовых труб и внешних газоходов: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. 83 с.
- [3] Hadek protecting power plant chimney. URL: <https://www.hadek.com/> (дата обращения: 26.04.2018).
- [4] Poujoulat industrial chimney. URL: <http://www.poujoulat.cn/en/> (дата обращения: 26.04.2018).
- [5] McMillan C.M., Price H.J., Veck G.A. Design and construction of a 300 m high multi-flue chimney at Duvha Power Station // Civil Engineer in South Africa. 1979. Vol. 21. P. 287–294.
- [6] Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электро-станций: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 216 с.
- [7] Дужих Ф. П., Осоловский В. П., Лавыгин В. М. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: Справочное издание / Под ред. Ф.П. Дужих. М.: Теплотехник, 2004. 464 с.
- [8] Единый металлургический портал. URL: <https://metal100.ru/> (дата обращения: 26.04.2018).

# НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Муштуков Д.А.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет»  
Томск, Россия

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Применение накопителей энергии позволяет запасать электроэнергию в то время, когда она наиболее дешевая, и выдавать ее потребителю тогда, когда она наиболее дорогая. Кроме того, накопление электрической энергии даже в небольших количествах позволяет выровнять график нагрузок, предотвратить нарушение как статической, так и динамической устойчивостей. На данный момент в России работает ряд гидроаккумулирующих электростанций, принципиально являющихся накопителями электрической энергии, что говорит о постепенном внедрении такой технологии в энергосистему России.

**Материалы и методы:** В ходе исследования были изучены различные виды накопителей электрической энергии, их особенности, возможность их применения для нескольких целей, а также коммерческая освоенность. Для анализа влияния накопителей энергии на переходные процессы электроэнергетических систем был использован программный комплекс «Мустанг».

**Результаты:** Определена применимость различных видов накопителей электрической энергии для целей управления режимами, осуществления функции резервирования и обеспечения качества электроснабжения. Установлено положительное влияние накопителей электрической энергии на динамическую устойчивость электроэнергетической системы.

**Выводы:** В проделанной работе с помощью количественных и качественных характеристик описаны преимущества применения накопителей электрической энергии в установившихся и переходных режимах электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** накопители энергии, режимы электроэнергетических систем, статическая устойчивость, динамическая устойчивость, качество электроснабжения, резервное питание.

# ENERGY CONSUMERS AND THEIR APPLICATION FOR MANAGEMENT OF ELECTRICITY SYSTEM REGIMES

D. Mushtukov

National Research Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russian Federation

## Abstract

**Background:** The use of energy storage allows you to store electricity at a time when it is the cheapest, and give it to the consumer at a time when it is the most expensive. In addition, the accumulation of electrical energy, even in small quantities, makes it possible to equalize the load schedule, to prevent the violation of both static and dynamic stability. At the moment, a number of pumped storage power plants operate in Russia, which is basically accumulators of electrical energy, which indicates the gradual introduction of such technology into the energy system of Russia.

**Materials and methods:** In the course of the study, various types of electric energy storage devices, their features, the possibility of their use for several purposes, as well as commercial development were studied. To analyze the effect of power storage devices on the transient processes of electric power systems, the "Mustang" software complex was used.

**Results:** The applicability of various types of electrical energy storage devices for the purposes of regime management, the implementation of the redundancy function and the provision of power supply quality has been determined. The positive influence of electric energy storage devices on dynamic stability is established.

**Conclusions:** In the work done, quantitative and qualitative characteristics describe the advantages of using electric energy storage devices in the established and transient modes of electric power systems.

**Key words:** energy accumulator, operating conditions of power system, small signal stability, transient stability, quality of electricity, backup power supply.



## I. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент электроэнергия является таким товаром, который необходимо потреблять в процессе его производства и, наоборот, производить в процессе его потребления. Невыполнение этого временного баланса может привести к авариям и катастрофам в энергосистеме. Существующие накопители электрической энергии позволяют запастись небольшим ее количеством, однако даже это можно использовать довольно эффективно.

В результате исследования были изучены как уже коммерчески освоенные виды накопителей электрической энергии, так и передовые разработки. Так они были классифицированы следующим образом:

- гидроаккумулирующие электростанции;
- пневматические накопители энергии;
- электрохимические аккумуляторы;
- кинетические накопители;
- сверхпроводящие индуктивные накопители.

## II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно классификации накопителей электрической энергии, была исследована их наилучшая применимость для трех основных целей:

- обеспечение качества электроснабжения;
- осуществление функций резервного источника питания;
- управление режимами электроэнергетических систем.

Наглядно уровень развития технологии накопления электроэнергии представлен на диаграмме (рис. 1).

Исследование проводилось путем определения границ применимости каждого типа накопителей энергии исходя из их свойств (рис. 2).

Кроме того, в ходе исследования была произведена проверка влияния накопителя электрической энергии на динамическую устойчивость генераторов на примере электроэнергетической системы, схема которой представлена на рис. 3.

Схема замещения электроэнергетической системы представлена на рис. 4.

## III. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследования необходимо проанализировать количественные характеристики различных типов накопителей электрической энергии, такие как класс мощности и время разрядки. Также необходимо учесть индивидуальные особенности каждого типа накопителей и установить границы их применимости в соответствии с диаграммой (рис. 2). Для анализа влияния исследуемых устройств на динамическую устойчивость энергосистемы ее необходимо смоделировать в ПК Мустанг и провести соответствующие опыты.

В часы максимального потребления ГАЭС работает в генераторном режиме, а в часы минимального потребления заряжается, помогая работе тепловых блоков, которые не могут быть разгружены ниже определенного уровня как по техническим условиям, так и по условиям несения

тепловой нагрузки. Мощность крупных ГАЭС достигает 1 ГВт, а время разрядки может составить несколько часов до тех пор, пока не закончится вода в верхнем бассейне. Кроме того, время выхода ГАЭС на полную мощность (2–3 мин), поэтому такие электростанции наиболее эффективны для управления режимами энергосистемы.

Аналогично ситуация обстоит с мощными современными образцами пневматических накопителей энергии, только вместо воды в них используется воздух. Однако данная технология находится на стадии демонстрации и развертывания.

На данный момент освоено большое количество разновидностей электрохимических аккумуляторов. В данной статье будут рассмотрены наиболее коммерчески освоенные.

Натрий-серные аккумуляторы отличаются большими ресурсными характеристиками (2000–4000 циклов) при глубине разряда 80–90 %. Несмотря на неспособность хранить запасенную энергию в течение длительного времени (вся она будет израсходована на поддержание рабочей температуры электролитов в течение нескольких часов), эти аккумуляторы оказались востребованы для резервирования и управления режимами энергосистем.

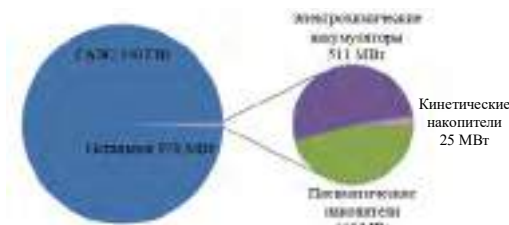


Рис. 1 – Уровень развития технологии накопления электроэнергии

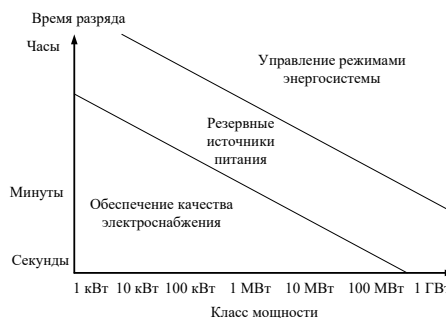


Рис. 2 – Диаграмма для классификации накопителей энергии

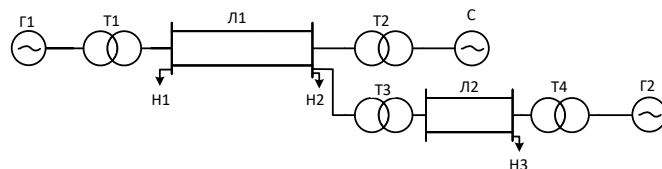


Рис. 3 – Схема электроэнергетической системы

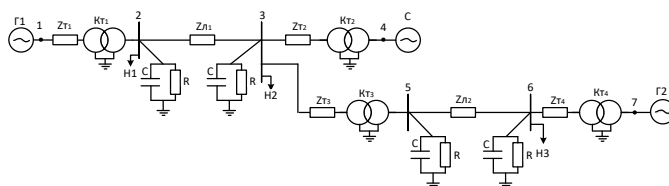


Рис. 4 – Схема замещения электроэнергетической системы

Литий-ионные аккумуляторы характеризуются высокой энергоемкостью, глубокими циклами разряда (70–80 %), а также отсутствием эффекта памяти. Однако на данный момент до конца не решен вопрос взрывоопасности таких аккумуляторов большой мощности, поэтому они наиболее пригодны для поддержания качества электроснабжения.

Свинцово-кислотные (СКА) наиболее распространены благодаря своей дешевизне, отработанной технологии производства и большому опыту эксплуатации. На данный момент выпускаются и используются СКА широким диапазоном номинальных мощностей (до 100 МВт). К сожалению, в таких аккумуляторах используется токсичный свинец, поэтому они обладают малой энергоемкостью и низкой допустимой глубиной разряда и, соответственно, небольшим временем разрядки (до 1 ч).

Никель-кадмиевые аккумуляторы отличаются большой энергоемкостью, работой при низких температурах и высокими токами заряда/разряда. Также им присущ эффект памяти, отрицательно сказывающийся на их характеристиках. Кроме того, такие аккумуляторы наиболее требовательны к соблюдению требований по эксплуатации. В связи с этим время их разряда составляет около получаса, что делает их пригодными для поддержания качества электроэнергии и резервирования потребителей небольшой мощности.

Ванадий-редоксные или проточные аккумуляторы имеют очень продолжительный срок службы (до 20 лет) и достаточно большую емкость. Принцип их работы позволяет производить такие аккумуляторы достаточно больших мощностей (несколько сотен МВт). При этом они способны работать при низких и высоких температурах, без деградации, так как объем используемого электролита остается постоянным. Благодаря своим свойствам проточные аккумуляторы способны выступать надежным резервным источником питания и принимать участие в управлении режимами энергосистем.

Принцип действия кинетических накопителей электроэнергии основан на преобразовании кинетической энергии вращения массивного маховика в электрическую энергию и обратно. Вращение КНЭ малой мощности затухает довольно долго (до нескольких часов), отдавая энергию в сеть, однако высокоомощные маховики отдают энергию намного быстрее, соответственно, затухая в течение нескольких минут.

В сверхпроводящих индуктивных накопителях (СПИН) происходит запасание энергии электромагнитного поля в сверхпроводящем соленоиде. Поскольку такой контур не имеет сопротивления, ток можно увеличивать до очень большого значения, увеличивая энергию электромагнитного поля. Такие соленоиды могут достигать мощности в несколько ГВт, однако отдавать ее в течение нескольких секунд ввиду отсутствия инерционных элементов.

Накопители электрической энергии оказывают положительное влияние не только на установившиеся режимы электроэнергетических систем, но и на переходные.

В схеме, смоделированной в ПК Мустанг (см. рис. 4), произведен анализ переходных процессов при отсутствии накопителя энергии и при его наличии. В узле 2 произведено короткое замыкание с последующим отключением одной цепи в линии 1. При этом фиксируется сохранение или нарушение динамической устойчивости.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

После исследования разновидностей накопителей энергии, выявления основных свойств и особенностей, а также оценки их пригодности для целей управления режимами, осуществления функции резервирования и обеспечения качества электроснабжения, выводы представляются в виде диаграмм (рис. 5).

При двухфазном КЗ на землю в узле 2 в энергосистеме, представленной на рис. 4 происходит нарушение динамической с последующим асинхронным режимом (рис. 6, а). Нагрузка в узле 2 составляет 9 ГВт, время срабатывания релейной защиты с последующим отключением одной цепи в линии 1 – 0,12 с.

При двухфазном КЗ на землю в узле 2 с накопителем электрической энергии мощностью 0,5 ГВт, установленном также в узле 2 и его подключении через 0,15 с после начала КЗ, нарушения динамической устойчивости энергосистемы не происходит (рис. 6, б).

Таким образом, накопители электрической энергии посредством запасаания и выдачи электроэнергии в нужные моменты времени позволяют эффективно реализовывать функции: обеспечение качества электроснабжения, резервных источников питания, а также управление режимами энергосистемы. Помимо положительного влияния на установившиеся режимы, накопители энергии способствуют сохранению динамической устойчивости энергосистемы.

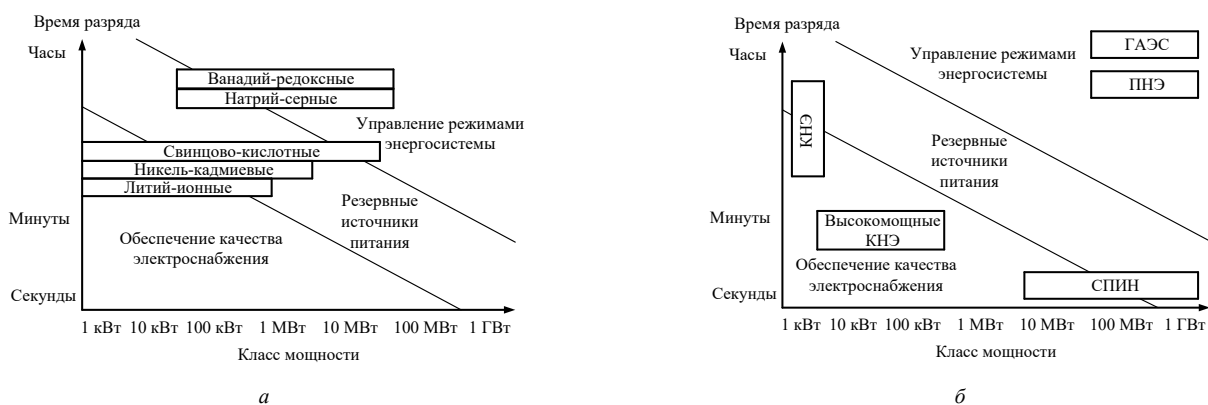


Рис. 5 – Диаграмма применимости электрохимических (а) и других (б) накопителей электроэнергии

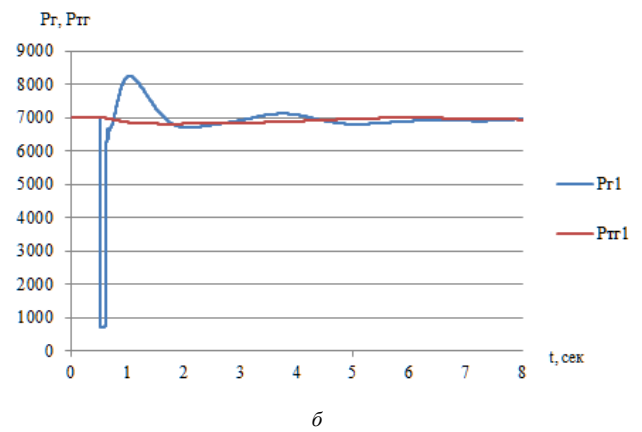
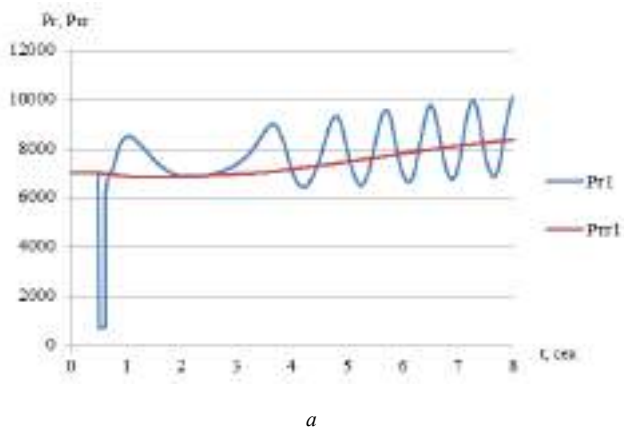


Рис. 6 – Переходный процесс с нарушением (а) и без нарушения (б) динамической устойчивости

### Список литературы

- [1] Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 95 с.
- [2] Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике // ЭЛЕКТРО – 2005.
- [3] Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях // Ползуновский вестник. 2013. № 4.
- [4] Гуртовцев А.Л. Гидроаккумулирующие электростанции // Эксплуатация – 2009.

# О ВОПРОСАХ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Наумкин Р.Б.  
Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири  
Кемерово, Россия  
NaumkinRB@osib.so-ups.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Участие электростанций в предоставлении диапазона регулирования реактивной мощности регулируется с помощью механизмов оптового рынка мощности, при этом стоимость данной услуги заранее включена в цену мощности. В настоящее время границы диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования определены на основании актуальных по состоянию на 01.01.2006 данных. Любое сужение диапазона регулирования приводит к применению штрафных коэффициентов при определении объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности и упущенной выгоде субъектов ОРЭМ, что обуславливает некорректность подтвержденных данных.

**Материалы и методы:** Использовались методы экономического и логического анализа.

**Результаты:** Выделены особенности существующей системы предоставления диапазонов регулирования реактивной мощности. Проанализированы модели, включающие механизмы оплаты услуг по регулированию реактивной мощности. Предложена система предоставления диапазонов регулирования реактивной мощности в качестве системной услуги.

**Выводы:** Предложенные рыночные механизмы справедливого отбора диапазонов регулирования реактивной мощности позволят повысить прозрачность и управляемость в процессе предоставления диапазона регулирования реактивной мощности электростанциями.

**Ключевые слова:** регулирование напряжения, реактивная мощность, оптовый рынок мощности, рынок системных услуг.

## ABOUT PROVIDING OF THE REACTIVE POWER CONTROL RANGE BY POWER STATIONS

R. Naumkin  
Integrated Dispatcher Control of Siberia, branch of «SO UPS»  
Kemerovo, Russian Federation  
NaumkinRB@osib.so-ups.ru

## Abstract

**Background:** The providing of the reactive power control range by power stations is regulated by means of capacity market mechanisms, while the cost of this service is included in the price of capacity. The limits of the reactive power control range of generating equipment are determined on the basis of data as of 01.01.2006. Any narrowing of the regulatory range leads to the application of penalty coefficients in determining the volumes of the power, which put on the capacity market. There are the lost profit of the capacity market subjects, which causes the incorrectness of the confirmed data.

**Materials and methods:** Methods of economic and logical analysis.

**Results:** It was selected features of the existing system of providing of the reactive power control ranges. Models were analyzed that include mechanisms for payment for reactive power control services. It was proposed a system of providing of the reactive power control ranges as a system service.

**Conclusions:** It was proposed market mechanisms for a fair selection of reactive power control ranges. This is increase transparency and manageability in the process of providing a range of reactive power control by power stations.

**Key words:** voltage regulation, reactive power, capacity market, system service market.

### 1. БАЛАНС РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Баланс реактивной мощности в энергосистеме – соответствие суммарной генерируемой реактивной мощности и суммарной потребляемой реактивной мощности. Ему сопутствует важный параметр режима энергосистемы –

напряжение. Регулирование реактивной мощности в энергосистеме имеет такое же значение, как и регулирование активной мощности. Оно позволяет поддерживать постоянство напряжения в сети, снизить перегоки реактивной мощности по линиям и тем самым обеспечить устойчивую и экономичную работу энергосистемы.

Регулирование реактивной мощности электростанциями производится путём изменения тока возбуждения синхронной машины, что обуславливает изменение реактивного тока в обмотке ротора. В генераторном режиме при увеличении тока возбуждения увеличивается отдача в сеть реактивной мощности, а при уменьшении тока возбуждения – потребление её из сети.

## II. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время участие электростанций в предоставлении диапазона регулирования реактивной мощности регулируется с помощью механизмов оптового рынка мощности [1]. Стоимость услуг по регулированию реактивной мощности и напряжения в энергосистеме для субъектов ОРЭМ – поставщиков электрической энергии и мощности включена в стоимость объёмов фактически поставленной на оптовый рынок активной мощности. В случае невыполнения требований, определяющих готовность генерирующего оборудования к участию в предоставлении диапазона регулирования реактивной мощности, в отношении такой группы точек поставки (ГТП) генерации применяются коэффициенты, снижающие объём мощности, фактически поставленной на оптовый рынок, и, как следствие, уменьшающие выручку субъекта оптового рынка.

Системный оператор определяет соответствие участия электростанций в предоставлении диапазона регулирования реактивной мощности требованиям, описанным в [1], и производит расчёт показателей, влияющих на показатель неготовности генерирующего оборудования за расчётный месяц. К ним относят показатели снижения диапазона регулирования реактивной мощности  $R_{\text{диап},m}^j$  и фактического предоставления диапазона регулирования реактивной мощности  $R_{Q,m}^j$ . Оба показателя находятся в диапазоне от 0 до 1.

Показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности характеризует сокращение актуального диапазона регулирования относительно базового диапазона. Сокращение диапазона оценивается по каждому генератору, входящему в ГТП генерации, как в части выдачи реактивной мощности, так и её потребления. Оценка производится на нескольких интервалах в диапазоне от номинальной минимальной до номинальной максимальной активной мощности генерирующего оборудования.

Показатель фактического предоставления диапазона регулирования реактивной мощности характеризует исполнение стандартных документируемых диспетчерских команд на регулирование напряжения и реактивной мощности, отдаваемых диспетчерским персоналом Системного оператора, и определяется как отношение количества исполненных команд к общему количеству команд по отдельной ГТП за расчётный месяц.

Итоговый объём недопоставки мощности на оптовом рынке, определяемый предоставлением диапазона регулирования реактивной мощности в расчётном месяце  $m$ , рассчитывается как

$$\Delta N_{Qm}^{\text{гот},j} = \min(N_{\text{ПО},m}^j; N_{\text{уст},m}^j) \cdot k_p \cdot k_{\text{диф},m}^j \times \times (2 - R_{\text{диап},m}^j - R_{Q,m}^j), \quad (1)$$

где  $N_{\text{ПО},m}^j$  – предельный объём поставки мощности по ГТП  $j$ ;  $N_{\text{уст},m}^j$  – установленная мощность ГТП  $j$ ;  $k_p$  – коэффициент, определяемый [2], равен 0,03;  $k_{\text{диф},m}^j$  – показатель дифференциации значений коэффициентов готовности, находится в пределах от 0,75 до 2,00.

Таким образом, выпадающие доходы субъекта оптового рынка при невыполнении требований к участию в предоставлении диапазона регулирования реактивной мощности могут составить до 12 % от общей выручки на оптовом рынке мощности.

На данный момент в части предоставления диапазона регулирования реактивной мощности субъектами оптового рынка можно выделить ряд особенностей:

1. Стоимость услуг по регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме заранее включена в стоимость оплаты активной мощности на оптовом рынке.
2. Направление в Системный оператор актуальной информации по реактивной мощности, отображающей реальные данные (к примеру, после замены системы ограничения минимального тока возбуждения), для субъектов оптового рынка экономически не оправдано, если такие данные ухудшают диапазоны регулирования реактивной мощности.
3. Направление в Системной оператор актуальной информации, улучшающей диапазоны регулирования реактивной мощности, также экономически не оправдано для субъектов, так как не изменяет выручку на оптовом рынке.
4. Вследствие согласования субъектами оптового рынка с Системным оператором недостоверных данных в части диапазонов регулирования, часть команд на регулирование реактивной мощности и напряжения может быть не исполнена.
5. Отсутствуют механизмы, позволяющие Системному оператору проверить достоверность полученных от субъектов оптового рынка сведений.
6. Отсутствуют экономические стимулы для модернизации генерирующего оборудования с целью увеличения диапазонов предоставления регулирования реактивной мощности.

Эти факторы обуславливают искажение информации, которую использует диспетчерский персонал Системного оператора при управлении режимом, что негативно сказывается на надёжности и устойчивости работы энергосистемы.

## III. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ

Ряд исследований в РФ и за рубежом [3–5] предлагает механизмы оплаты услуг по регулированию реактивной мощности на основе маржинального ценообразования путём проведения спот-торгов между производителями и покупателями реактивной мощности. Однако, в отличие от выработки активной мощности, изменение выдачи реактивной мощности не требует затрат топливных ресурсов. Кроме того, отклонения напряжения носят локальный характер и различны в отдельных узлах энергосистемы.

В таких условиях подаваемые производителями ценовые заявки будут зависеть, в первую очередь, от сетевой инфраструктуры и потребностей потребителей реактивной мощности в отдельных узлах энергосистемы, что значительно снижает справедливость такого ценообразования.

Баланс реактивной мощности поддерживается не только за счёт выдачи реактивной мощности генераторами, но и путём размещения компенсирующих устройств непосредственно на месте потребления электроэнергии, что оправдано как по техническим, так и по экономическим соображениям, поскольку снижение объёмов передачи реактивной мощности приводит к снижению потерь энергии и повышению пропускной способности электросетевого комплекса.

Некоторые работы предлагают модели, в которых конкуренция осуществляется не только на основании ценовых заявок генераторов электростанций, но и других источников реактивной мощности (батареи статических конденсаторов, статистические тиристорные компенсаторы, шунтирующие реакторы). Однако в настоящее время оплата услуг на содержание объектов электросетевого хозяйства в РФ производится исходя из необходимой валовой выручки сетевых организаций. Данный показатель утверждается регулирующими органами.

Кроме того, компенсирующие устройства в первую очередь используются в электросетевом комплексе для осуществления процесса передачи электрической энергии и мощности, а перетоки реактивной мощности зависят от сложившегося в энергосистеме режима и могут значительно изменяться, особенно в ремонтных схемах.

В таких условиях возникает трудность в разделении необходимых сетевым организациям для содержания компенсирующих устройств денежных потоков, поступающих в качестве оплаты услуг по предоставлению диапазонов регулирования реактивной мощности и услуг по передаче электрической энергии и мощности.

#### IV. ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КАК СИСТЕМНАЯ УСЛУГА

Для повышения прозрачности и управляемости в процессе предоставления диапазона регулирования реактивной мощности электростанциями предлагается исключить данный процесс из механизмов оптового рынка мощности и включить в рынок системных услуг.

Оказание услуг по обеспечению системной надёжности регулируется [6] и требуется для обеспечения надёжности функционирования электроэнергетики. На данный момент к таким услугам относятся: услуги по нормированному первичному регулированию частоты, услуги по автоматическому вторичному регулированию частоты и перетоков активной мощности, услуги по регулированию реактивной мощности без производства электрической энергии и услуги по развитию систем противоаварийного управления.

Цены (тарифы) на услуги по обеспечению системной надёжности на оптовом рынке подлежат государственному регулированию и определяются по результатам конкурентного отбора исполнителей. Организация отбора исполнителей услуг по обеспечению системной надёжности и оплаты данных услуг в целях обеспечения надёжности Единой энергетической системы России, координация действий по оказанию услуг по обеспечению системной надёжности осуществляются Системным оператором [7].

В настоящее время предусматривается, что в стоимости поставленной на оптовый рынок мощности включена оплата услуг по предоставлению диапазонов регулирования реактивной мощности в размере 3 % ( $k_p = 0,03$ ). Цена конкурентного отбора мощности (КОМ) определяется по методике наклонного спроса, но не выше предельных значений, утверждённых Правительством РФ (для КОМ на 2021 год предельные значения утверждены [8]). Используемые при определении цены КОМ по методике наклонного спроса предельные значения предлагается снизить на 3 % для исключения стоимости услуг по предоставлению диапазонов регулирования реактивной мощности из цены на оптовом рынке мощности при проведении очередного КОМ после внесения изменений в соответствующие нормативные документы. Высвобожденные средства должны быть направлены на оплату услуг по регулированию реактивной мощности и напряжения на рынке системных услуг. Такое решение позволит сохранить платежи на оптовом рынке на уровне текущей тенденции.

Отбор исполнителей услуг по регулированию реактивной мощности и напряжения предлагается производить на основании заявленных субъектами оптового рынка диапазонов регулирования в разрезе единиц генерирующего оборудования (ЕГО) по результатам аттестации. Цены (тарифы) на данные услуги должны устанавливаться на регулируемый год исходя из суммы диапазонов по всем ЕГО в рамках одной ценовой зоны. Диапазоны регулирования реактивной мощности должны заявляться субъектами оптового рынка в табличном виде для значений активной мощности в интервале от нуля до 100 % установленной мощности ЕГО с шагом 10 % и подлежат согласованию с Системным оператором. Корректировка заявленных диапазонов возможна не чаще одного раза в месяц.

Установление тарифов предлагается производить на основании суммы показателей  $Q_{\text{диап.заявл}}^g$  :

$$Q_{\text{диап.заявл}}^g = \frac{\sum_{i=P_{\text{мин}}}^{P_{\text{макс}}} (Q_{\text{макс.заявл},i}^g - Q_{\text{мин.заявл},i}^g)}{w + 1}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{диап.заявл}}^g$  – среднее значение заявленного субъектом оптового рынка диапазона регулирования по реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$  на диапазоне регулирования активной мощности от номинальной минимальной мощности  $P_{\text{мин}}$  до номинальной максимальной мощности  $P_{\text{макс}}$ , МВАр;

$w$  – количество интервалов активной мощности, в отношении которых осуществляется оценка предоставления диапазона регулирования реактивной мощности;

$Q_{\text{макс.заявл},i}^g$  – максимальное значение реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , МВАр;

$Q_{\text{мин.заявл},i}^g$  – минимальное значение реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , МВАр.

Фактически предоставленный диапазон регулирования реактивной мощности по ГТП генерации  $j$  за расчётный месяц  $m$ , используемый при определении стоимости оказанных услуг, вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{диап},m}^j = R_{Q,m}^j \cdot k_{\text{диф},m}^j \cdot \sum_{g \in j} Q_{\text{диап},m}^g, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{диап},m}^g$  – фактически предоставленный диапазон регулирования реактивной мощности по генерирующему оборудованию  $g$  за расчётный месяц  $m$ .

$$Q_{\text{диап},m}^g = \frac{\sum_{i=P_{\text{мин}}}^{P_{\text{макс}}} \sum_{d=1}^k t \left( Q_{\text{макс},i,d}^g - Q_{\text{мин},i,d}^g \right)}{w+1} \cdot D_{\text{мес}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{макс},i,d}^g$  – максимальное значение реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , в период работы с диапазоном регулирования  $d$ , МВАр;

$Q_{\text{мин},i,d}^g$  – минимальное значение реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , в период работы с диапазоном регулирования  $d$ , МВАр;

$k$  – количество различных диапазонов регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$  в расчётном месяце  $m$ ;

$t$  – число часов работы генерирующего оборудования  $g$  с диапазоном регулирования реактивной мощности  $d$  в расчётном месяце  $m$ ;

$D_{\text{мес}}$  – число часов в расчётном месяце  $m$ .

Значения  $Q_{\text{макс},i,d}^g$  и  $Q_{\text{мин},i,d}^g$  не могут превышать значения  $Q_{\text{макс.заявл},i}^g$  и  $Q_{\text{мин.заявл},i}^g$  соответственно по модулю.

Кроме того, во избежание подачи диапазонов регулирования реактивной мощности, заведомо не соответствующих фактическим параметрам генерирующего оборудования, предлагается добавить в [9] с обязательным указанием причины («Проверка фактических резервов реактивной мощности») и присвоением атрибута внешней инициативы («ИВ») возможность отдачи диспетчерских команд: «Загрузить по реактивной мощности до максимума», «Снизить выдачу реактивной мощности

до минимума» и «Перевести в режим потребления с максимальным приёмом реактивной мощности». В случае неисполнения одной из команд показатель  $Q_{\text{диап},m}^j$  считается равным нулю.

## V. ВЫВОДЫ

Действующая система предоставления диапазонов регулирования реактивной мощности электростанциями на оптовом рынке имеет ряд недостатков. Оказание услуг по предоставлению диапазонов регулирования реактивной мощности в рамках рынка системных услуг позволило повысить достоверность информации, имеющейся в распоряжении диспетчерского персонала Системного оператора, улучшить качество управления режимом энергосистемы и создать экономические стимулы для модернизации оборудования электрических станций с целью расширения возможностей выдачи реактивной мощности.

## Список литературы

- [1] Регламент определения объёмов фактически поставленной на оптовый рынок мощности: приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка.
- [2] Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172.
- [3] Frias P., Gomez T., Soler D. A Reactive Power Capacity Market Using Annual Auctions // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Вып. 3. С. 1458–1468.
- [4] Haghghi H., Canizares C., Bhattacharya K. Dispatching Reactive Power Considering All Providers in Competitive Electricity Markets // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2010.
- [5] Колибаба В.И., Жабин К.В. Формирование механизма оптимального ценообразования на системные услуги по регулированию реактивной мощности // Вестн. ИГЭУ. 2017. Вып. 2. С. 68–75.
- [6] О порядке отбора субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по обеспечению системной надежности, и оказания таких услуг, а также об утверждении изменений, которые вносятся в акты Правительства Российской Федерации по вопросам оказания услуг по обеспечению системной надежности: постановление Правительства РФ от 3 марта 2010 г. № 117.
- [7] Об электроэнергетике: федер. закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ.
- [8] Об установлении значений цены на мощность, используемых для определения спроса на мощность при проведении в 2017 году долгосрочного конкурентного отбора мощности с началом периода поставки с 1 января 2021 года: распоряжение Правительства РФ от 17 августа 2017 г. № 1767-р.
- [9] Порядок отдачи и регистрации стандартных документируемых диспетчерских команд, распоряжений, разрешений и сообщений, используемых диспетчерским персоналом АО «СО ЕЭС» и его филиалов при управлении режимами работы объектов генерации участников оптового рынка и внешними перетоками.

# УНИВЕРСАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Зырянов В.М.<sup>1</sup>, Кирьянова Н.Г.<sup>1</sup>, Нестеренко Г.Б.<sup>1,2</sup>, Пранкевич Г.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

<sup>2</sup> ТИК ООО «Системы накопления энергии»

Новосибирск, Россия

nesterenkogb@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На сегодняшний день в отечественной электроэнергетике отсутствует практика разработки универсальных математических моделей систем накопления энергии (СНЭ), подходящих для расчёта переходных процессов в энергосистемах со СНЭ. Идёт разработка отдельных высокодетализированных моделей в таких программных комплексах (ПК), как MATLAB и PSIM. Однако избыточно детальное моделирование устройств силовой электроники и элементов накопления энергии (аккумуляторов, суперконденсаторов) делает модели СНЭ требовательными к вычислительным ресурсам и малоприспособными для расчёта в составе энергосистем с большим количеством узлов, а также для расчёта электромеханических переходных процессов. Кроме того, указанные программные комплексы сами по себе не приспособлены в полной мере для осуществления типовых электроэнергетических расчётов. В связи с этим разработка универсальной математической модели СНЭ является актуальной задачей.

**Материалы и методы:** Для разработки модели СНЭ и расчётов переходных процессов в составе энергосистемы использована комплексная система расчета и планирования электрических режимов DiGSILENT PowerFactory. Для сравнения результатов параллельно разрабатывалась модель в пакете MATLAB. Разработанные модели верифицированы по данным натурного эксперимента совместной работы СНЭ и дизель-генераторной установки (ДГУ), проведенного в Новосибирске.

**Результаты:** Разработана модель СНЭ для расчёта переходных процессов. Модель обладает модульным характером: для изменения уровня детализации силовой преобразователь может заменяться управляемым источником мощности; могут использоваться различные модули внешней системы управления, определяющие желаемую мощность СНЭ в данный момент. Результаты расчётов с использованием разработанной модели с достаточным уровнем точности совпали с результатами натурных испытаний.

**Выводы:** Для исследования переходных процессов в энергосистемах со СНЭ достаточна математическая модель без избыточной точности моделирования. Для расчёта электромеханических переходных процессов подходит модель СНЭ на основе управляемого источника мощности. Для расчёта электромагнитных переходных процессов источник мощности заменяется на силовой преобразователь. Разработанная модель может быть использована на практике проектными и инженерными организациями для расчета переходных процессов в энергосистемах с системами накопления энергии.

**Ключевые слова:** система накопления энергии, математическая модель, аккумуляторная батарея большой мощности, автономная энергосистема, резкопеременная нагрузка.

## MULTI-OPERATED MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM

V. Zyryanov, N. Kiryanova, G. Nesterenko, G. Prankevich

Novosibirsk State Technical University

Novosibirsk, Russian Federation

nesterenkogb@yandex.ru

## Abstract

**Background:** To date, in Russia there isn't a developing of energy storage systems (ESS) multi-operated mathematical models for the transient analysis of power systems with ESS. There is a developing of highly detail models in MATLAB and PSIM. However, unnecessarily detail model development of power electronics and energy storage (high output batteries, supercapacitors) makes ESS models exacting to computer power and hardly suitable for analysis of structural-complicated power systems with ESS and calculating long-continued electromechanical transients. Furthermore, MATLAB and PSIM are not fully suitable for electric power engineering routine calculations. Accordingly, the developing of ESS multi-operated mathematical model is a topical issue.

**Materials and Methods:** DiGSILENT PowerFactory is a power system analysis software that has been used for developing ESS model and power system transient analysis. Also, MATLAB model has been developed and used for comparison of results. Furthermore, calculation results have been verified by full-size experiment test of the ESS with diesel generator conducted place at Novosibirsk.



**Results:** The model for transient analysis has been developed. The model is modular: the power converter can be replaced by controlled power source for change of detalization level; various control systems defining ESS power can be used. Comparison of calculated and experimental results has shown their quite satisfactory coincidence.

**Conclusions:** Simplified ESS model for calculating electromechanical transients in power systems is proposed. The ESS model is based on controlled power source. The power source may be replaced by the power converter for calculating electromagnetic transients. Developed model allows design and engineering companies to do transient analysis of power systems with ESS.

**Key words:** energy storage system, mathematical model, high output batteries, autonomous power system, abruptly variable load.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый прогресс в развитии технологий накопления энергии позволяет прогнозировать в ближайшем будущем значительные изменения в организации функционирования энергосистем. Схемно-режимные решения, состав оборудования, планирование, оптимизацию и ведение режимов, систему противоаварийной автоматики необходимо будет пересматривать с учётом появления в составе энергосистем нового многофункционального элемента – систем накопления энергии (СНЭ). Это многофункциональные устройства, способные одновременно выполнять функции управления активной и реактивной мощностью, активного фильтра высших гармоник, компенсации несимметрии. СНЭ уже сегодня позволяют эффективно решать ряд задач: разнесение во времени потребления и производства электрической энергии, демпфирование колебаний мощности, использование СНЭ в качестве элемента противоаварийной автоматики и др. [1].

Наибольший эффект от применения СНЭ при современном уровне технологий может быть получен в автономных энергосистемах, энергосистемах с распределённой генерацией. Частая характеристика таких систем – стохастическая резкопеременная нагрузка, мощность которой соизмерима с установленной мощностью генерирующего, такой системы.

Для расчётов режимов и переходных процессов в энергосистемах необходимы соответствующие математические модели. Настоящая работа посвящена описанию и верификации математической модели для расчётов переходных процессов в энергосистеме, в составе которой имеется СНЭ на базе аккумуляторных батарей большой мощности (АББМ).

### II. ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ СНЭ

Основное назначение расчётов с использованием модели – оценить эффективность работы СНЭ в разных условиях, апробировать алгоритмы управления СНЭ, оценить правильность выбора параметров СНЭ. Модель должна позволять рассчитывать переходные процессы с учётом управляемого обмена активной и реактивной мощностью СНЭ и энергосистемы при основных ограничениях, накладываемых характеристиками АББМ и преобразователя. Подробное моделирование процессов в транзисторном преобразователе и АББМ для расчёта электромеханических переходных процессов не требуется. Для расчёта электромагнитных переходных процессов необходима более детализированная модель.

### III. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математическая модель автономной энергосистемы со СНЭ разработана в ПК PowerFactory (рис. 1, 2). Аналогичная модель была реализована в ПК MatLab\Simulink (рис. 3, 4). Модель включает в себя три основных элемента: дизель-генераторную установку (ДГУ), нагрузку и систему накопления энергии.

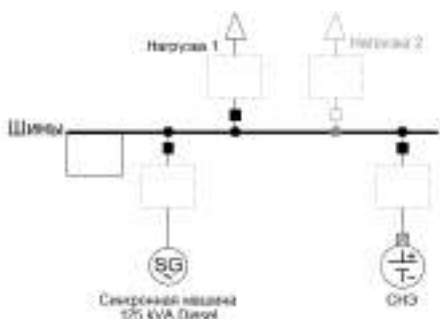


Рис. 1 – Модель автономной энергосистемы со СНЭ в PowerFactory

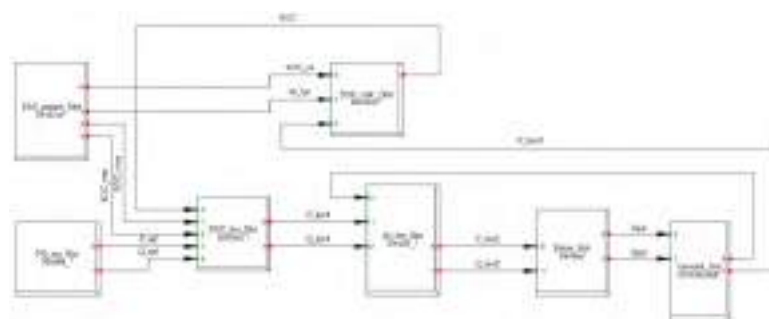


Рис. 2 – Структурная схема модели СНЭ в PowerFactory

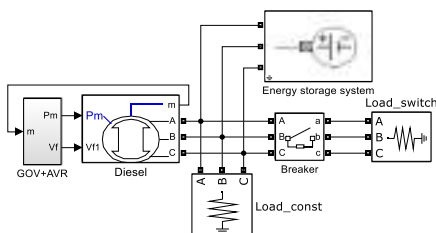


Рис. 3 – Модель автономной энергосистемы со СНЭ в MatLab

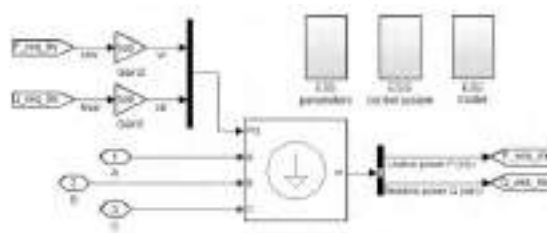


Рис. 4 – Структурная схема модели СНЭ в MatLab

Модель ДГУ представляет собой синхронный генератор с типовыми автоматическим регулятором возбуждения и автоматическим регулятором скорости.

Для сокращения времени расчета электромеханических переходных процессов в основе модели СНЭ по умолчанию используется управляемый источник мощности. Также в состав модели (рис. 2) входят: блок «задание основных параметров СНЭ» (ESS param Slot); блок «моделирование динамических параметров СНЭ» (SOC calc Slot, SOC lim Slot, Sn lim Slot, Delay Slot); блок «система управления мощностью СНЭ» (PQ inp Slot).

В блоке параметров задаются параметры СНЭ: номинальная энергоемкость, номинальная мощность, начальный уровень заряда, ограничения по максимальному и минимальному уровню заряда.

Блоки, моделирующие функционирование подсистем СНЭ, представляют собой наборы элементов и функций, позволяющих источнику мощности выдавать/потреблять энергию с учётом особенностей СНЭ.

В данной работе рассмотрены два режима работы СНЭ: ограничение мощности нагрузки по верхнему и нижнему пределам, ограничение скорости сбросов и набросов нагрузки.

#### IV. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Многие проблемы автономных энергосистем связаны с реакцией генерирующего оборудования на резкие изменения нагрузки [2]. Поэтому основное внимание уделяется работе СНЭ при резкопеременных режимах нагрузки. Верификация модели осуществлялась по модели, реализованной в ПК MatLab\Simulink.

Оценка достоверности модели СНЭ для расчёта электромеханических переходных процессов проводилась путём сравнения результатов расчёта (рис. 5, б и 6, б) с результатами натурных экспериментов (рис. 5, а и 6, а), проведённых в г. Новосибирске на производственной площадке ООО «СПТ» специалистами ООО «СНЭ» и НГТУ со СНЭ 100 кВА 153 кВт·ч с литий-железо-фосфатными аккумуляторами LT-LYP300АН в составе автономной энергосистемы с ДГУ ЭДД 100 кВт (125 кВА), работающей на резкопеременную нагрузку. Модуль коммутирования нагрузки позволил с заданной периодичностью подключать и отключать блоки нагрузки.

Энергообмен между АКБ и энергосистемой осуществляется с помощью согласующего трансформатора и двунаправленного транзисторного преобразователя. Управление – на основе скалярной ШИМ частотой 5,1 кГц. В системе управления использованы элементы теории мгновенной мощности и блок фазовой подстройки частоты [3].

Опыт со СНЭ, работающей по алгоритму ограничения максимальной и минимальной мощности нагрузки на ДГУ, проводился при повторно-кратковременном характере изменения активной нагрузки: длительность цикла 10 с, скважность 0,5. Уставки: минимальная мощность 45 кВА, максимальная – 65 кВА. При попадании мощности нагрузки за пределы указанных значений СНЭ ликвидирует небаланс, выдавая или потребляя мощность.

Опыт со СНЭ, работающей по алгоритму ограничения скорости изменения мощности нагрузки на ДГУ, проводился по той же схеме, что и предыдущий, но алгоритм управления СНЭ ограничивал величину производной тока ДГУ.

По результатам численного эксперимента и сравнению их с натурными можно утверждать, что разработанная модель СНЭ имеет высокое качественное и количественное (максимальная относительная погрешность составила 1,38 %) сходство с реальной СНЭ.

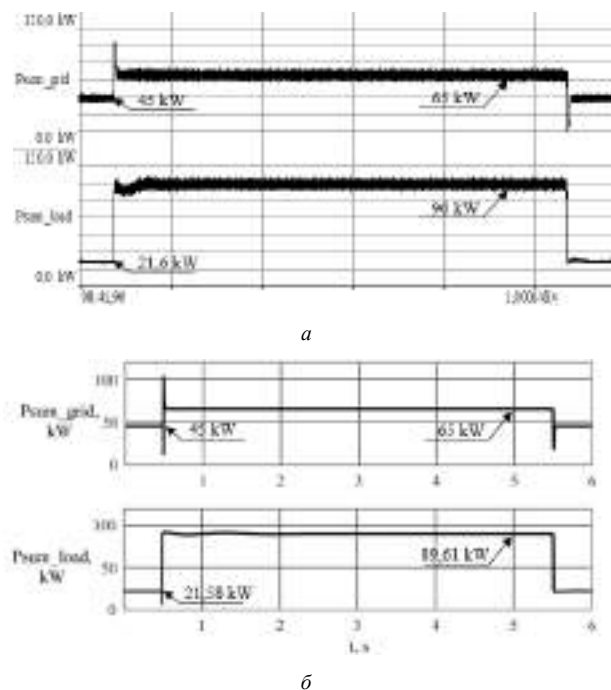


Рис. 5 – Переходный процесс при набросе/сбросе мощности при работе СНЭ в режиме ограничения максимальной и минимальной мощности (сверху вниз: мощность ДГУ, мощность нагрузки): а – эксперимент; б – расчет

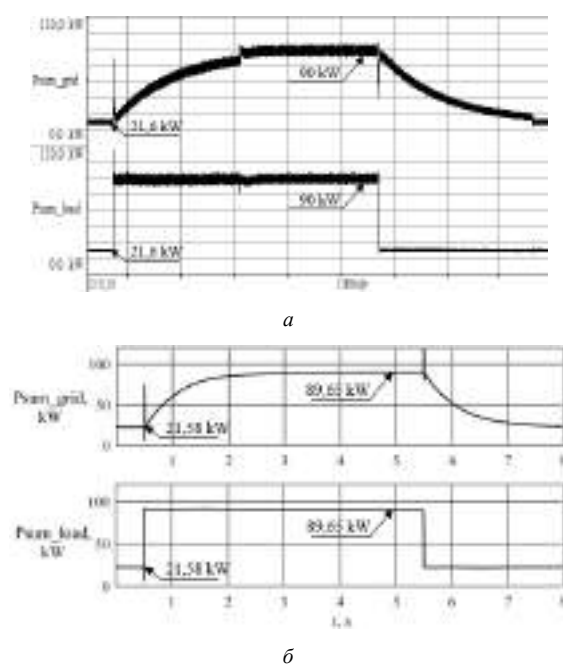


Рис. 6 – Переходный процесс при набросе/сбросе мощности при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности (сверху вниз: мощность ДГУ, мощность нагрузки): а – эксперимент; б – расчет

## V. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ ПО РЕАЛЬНЫМ ОСЦИЛЛОГРАММАМ

На рис. 7 представлены расчеты для автономной системы плавучего крана в ПК PowerFactory. Верхний график отображает мощность генератора (при работе СНЭ), нижний – мощность нагрузки. Как видно, нагрузочная диаграмма имеет резкопеременный характер. Присутствуют режимы, в которых синхронная машина без СНЭ переходила бы из генераторного режима в двигательный. Установленная мощность ДГУ составляет 300 кВт. Средняя мощность нагрузки составляет 66,6 кВт. Коэффициент использования мощности – 22 %. Как следствие, ДГУ работает неэффективно [2]. СНЭ будет работать в режиме ограничения минимальной и максимальной мощности. Уставки: минимальная мощность – 56,7 кВт, максимальная мощность – 76,7 кВт. Они составляют  $\pm 10$  кВт от мощности нагрузки. Так как мощность нагрузки носит резкопеременный характер и имеет место колебание нагрузки с высокой частотой, такие колебания не оказывают значительного влияния на генераторный агрегат [4]. Для уменьшения лишнего негативного воздействия на СНЭ в процессе управления мощностью предлагается пренебречь высокочастотной составляющей нагрузки. Для этого применяется цифровой фильтр нижних частот (с частотой среза 10 Гц) для фильтрации измеренного сигнала мощности нагрузки.

## VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

В программных комплексах PowerFactory и MatLab реализованы математические модели СНЭ, которые позволяют:

- 1) рассчитывать электромеханические переходные процессы;
- 2) оценивать работу СНЭ в составе энергосистемы;
- 3) производить синтез и апробацию алгоритмов управления СНЭ.

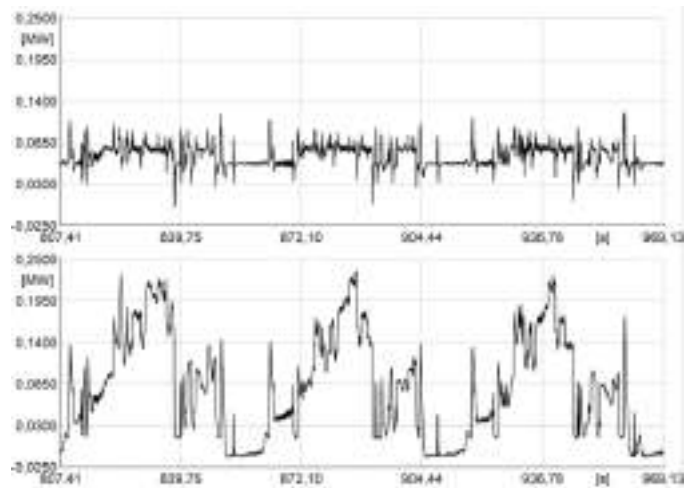


Рис. 7 – Переходный процесс нормального технологического процесса плавучего крана при работе СНЭ в режиме максимальной/минимальной мощности (сверху вниз: мощность ДГУ, мощность нагрузки)

## Список литературы

- [1] Гибридный накопитель энергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников [и др.] // Энергия единой сети. 2013. № 1. С. 40–51.
- [2] Эффективность применения накопителей энергии в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой / В.А. Алемасов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2007. № 2. С. 113–120.
- [3] Dybko M.A., Brovanov S.V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [proc.], Altai, 2015. P. 415–421.
- [4] Energy storage device application for load oscillations damping in isolated power systems / N.G. Kiryanova [et al.] // Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. P. 325–330.

# ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ СХЕМ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Нестеренко. Е.С.<sup>1</sup>, Чудный В.С.<sup>1</sup>, Смирнова Л.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

<sup>2</sup>АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

Санкт-Петербург, Россия

nesterenko.es.94@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Использование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) является одним из ключевых факторов, определяющих вектор развития современной энергетики во всем мире. Доля установленной мощности электростанций на ВИЭ в общей структуре установленной мощности электростанций западных стран и России по типам генерации характеризуется стремительным ростом на долгосрочную перспективу. Одним из наиболее распространённых ВИЭ является энергия ветра. В России ветроэнергетика обладает существенным потенциалом и играет важную роль в процессе долгосрочного реформирования существующей структуры генерирующих мощностей в сторону увеличения использования ВИЭ при производстве электроэнергии. Для развития данного направления электроэнергетики необходим системный и стандартизированный подход в вопросах технической реализации соответствующих проектов.

**Материалы и методы:** Изучение и сопоставление существующей нормативно-технической базы в области возобновляемых источников энергии в части требований к разработке схем выдачи мощности (СВМ).

**Результаты:** Рассмотрены существующие требования к разработке СВМ, оценена и предложена разработка менее жестких требований для электростанций на ВИЭ как к негарантированному поставщику электроэнергии.

**Выводы:** Менее жесткие требования к разработке СВМ электростанций на ВИЭ, в частности для ветровых электростанций (ВЭС), позволят уменьшить себестоимость реализации СВМ и увеличат привлекательность данных проектов для существующих генерирующих компаний и новых инвесторов.

**Ключевые слова:** схема выдачи мощности, ветровая электростанция, нормативно-техническая документация.

# DEVELOPMENT REQUIREMENTS FOR WIND POWER PLANTS POWER DISTRIBUTION SCHEME

Nesterenko.E.S.<sup>1</sup>, Chudny V.S.<sup>1</sup>, Smirnova L.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Joint Stock Company “Scientific and Technical Center of Unified Power System”

Saint Petersburg, Russian Federation

nesterenko.es.94@gmail.com

## Abstract

**Background:** Renewable energy sources (RES) is one of the key factors that determines the development of modern energy in the world. Power plants generation capacity part for renewable energy sources of the total capacity of power plants generation in Western countries and in Russia is characterized by rapid growth in the long term perspective. Wind power is the most common source of renewable energy. Wind power has a significant potential In Russia. It plays an important role in the process of long-term reformation of the existing structure of generating capacities in order to increase the use of RES for electricity generation. For developing this direction of the electric power industry, a systematic and standardized approach is needed for technical implementation of the relevant projects.

**Materials and Methods:** Examination and comparison of the existing normative and technical specifications for the requirements for the development of scheme of power distribution in the field of renewable energy sources.

**Results:** Existing requirements for the development of scheme of power distribution were considered and less stringent requirements for scheme of power distribution for wind power plants as a non-guaranteed supplier of electricity was evaluated and proposed.

**Conclusions:** less stringent requirements for scheme of power distribution for wind power plants will reduce the cost of scheme of power distribution implementation and increase the attractiveness of these projects for existing generating companies and new investors.

**Key words:** scheme of power distribution, wind power station, normative and technical specifications.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ветер является неисчерпаемым источником экологически чистой энергии и находит все более широкое применение по всему миру, приобретая большую общественную поддержку. На сегодняшний день в Европе и США ветроэнергетика является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей со значительным оборотом капитала [1]. Ввиду географических и климатических особенностей территории, в России существует значительный нереализованный потенциал в области ветроэнергетики.

## II. ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЭС В РОССИИ

На данный момент в мире существует множество электростанций, использующих энергию ветра, в том числе ветропарки большой мощности, такие как ВЭС «Ганьсу» (Китай, 7965 МВт), ВЭС «Муппандал» (Индия, 1500 МВт), ВЭС «Альта» (США, 1020 МВт) и др.

В России на данный момент эксплуатируются следующие ветряные электростанции, работающие параллельно с энергосистемой: Ульяновская ВЭС (35 МВт, Ульяновская область), Останинская ВЭС (25 МВт, Республика Крым), Сакская ВЭС (19 МВт, Республика Крым), Тарханкутская ВЭС (15,9 МВт, Республика Крым), Донузлавская ВЭС (10,9 МВт, Республика Крым), Пресноводненская ВЭС (6 МВт, Республика Крым), Восточно-Крымская ВЭС (2,8 МВт Республика Крым).

По данным проекта «Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на период 2018–2024 годы» планируется осуществить строительство и ввод в эксплуатацию 48 ВЭС в различных регионах России суммарной установленной мощностью более 2 400 МВт. Приоритетное развитие ВИЭ с темпами роста в десятки процентов в год планируется осуществить при мощной государственной законодательной, финансовой и политической поддержке.

Внедрение нетрадиционных источников энергии отражены в законодательной базе России: Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»; распоряжения Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» и от 8 января 2009 г. № 1-р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года»; постановление Правительства РФ № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

Для реализации запланированных объемов вводов необходимо применение единого подхода к разработке СВМ на всех стадиях проектирования.

## III. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

На данный момент в России не существует документации, регламентирующей способ подключения ВЭС на параллельную работу с энергосистемой. Из основных регламентирующих документов по нетрадиционной энергетике выделим:

- ГОСТ Р 51237-98, соответствующий терминам и определениям, отражающим систему понятий области ветроэнергетики [2];
- ГОСТ Р 51990-2002, дающий четкую классификацию ветроэнергетических установок (ВЭУ) по виду вырабатываемой энергии, назначению, мощности и пр. [3];
- ГОСТ Р 51991-2002, посвященный общим техническим требованиям и дающий более подробные сведения о параметрах режима ВЭУ, но только внутри самой электростанции [4].

Появление в России новых ВЭС предполагает необходимость разработки научно-технических документов, необходимых для регламентирования их работы. Эти документы должны быть разработаны в соответствии с действующей в после принятия Федерального закона «О техническом регулировании» системой технического регулирования в ветроэнергетике [7].

Стоит отметить, что нормативно-техническая документация в Российской Федерации составляется с учетом уже существующих нормативно-технических документов международного уровня. Такие документы принимаются Международной Электротехнической Комиссией (МЭК).

Помимо нормативно-технической документации, посвященной ВЭС в отдельности и возобновляемым источникам энергии в целом, существует ряд документов, касающихся общих требований к разработке СВМ вводимых объектов энергосистемы.

Так, например, методические рекомендации «по определению предварительных параметров выдачи мощности строящихся (реконструируемых) генерирующих объектов в условиях нормальных режимов функционирования энергосистемы, учитываемых при определении платы за технологическое присоединение таких генерирующих объектов к объектам электросетевого хозяйства» регламентируют основные требования, предъявляемые к СВМ [5]. На основании этого документа по данным о вводимом объекте генерации возможно оценить, какой должна быть соответствующая ему СВМ.

## IV. ВЕКТОР РАЗВИТИЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ ВЭС

Необходимость разработки базы нормативно-технической документации для возобновляемых источников энергии главным образом обуславливается особенностью их работы. С одной стороны, параллельная работа с энергосистемой требует надежной работы электростанции во всех режимах с учетом нормативных возмущений. С другой стороны, требования, предъявляемые к ВЭС, могут быть избыточными ввиду их нестабильной работы в части негарантированности получения необходимого количества электроэнергии в единицу времени.

Опираясь на вышеупомянутые существующие нормативно-технические документы, можно определить набор критериев, которым должна отвечать СВМ в случае ввода объекта ветроэнергетики в части выбора основных технических решений по подключению ВЭС к внешней электрической сети.

Начнем с [5]. Согласно данным рекомендациям сумма номинальных мощностей всех генераторов электростанции не должна превышать предварительную пропускную

способность схемы выдачи мощности электростанции. Таким образом, устанавливается «нижняя» граница пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) и распределительных устройств (РУ), входящих в состав СВМ. Данный критерий кажется очевидным, но в то же время именно он приводит СВМ к избыточности, как будет показано далее.

Основным недостатком возобновляемых источников энергии является непостоянство генерируемой мощности вследствие зависимости от природных условий. Напомним, что по данным АО «СО ЕЭС» за 2017 г. коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ВЭС на территории Российской Федерации составил около 15 % [6]. КИУМ ВЭС на территориях различных объединенных энергосистем (ОЭС), входящих в состав Единой энергосистемы России (ЕЭС), приведены в табл. 1.

Таблица 1 – КИУМ ВЭС на территории России

ОЭС	ЕЭС России	
	2016	2017
ЕЭС России	5,25	14,82
ОЭС Средней Волги	–	9,72
ОЭС Урала	4,89	5,29
ОЭС Северо-Запада	2,82	1,68
ОЭС Юга	9,28	15,85

Проанализируем технические решения, принятые для СВМ Ульяновской ВЭС (ПАО «Фортум»). Электростанция введена в эксплуатацию 24 декабря 2017 г. Установленная мощность Ульяновской ВЭС составляет 35 МВт.

Связь данной электростанции с энергосистемой осуществляется присоединением к РУ 110 кВ Ульяновской ТЭЦ-2 двумя ЛЭП. Известно, что каждая воздушная линия (ВЛ) 110 кВ обладает пропускной способностью около 30 МВт. Таким образом, в части ВЛ ограничений по выдаче мощности для данной электростанции нет, однако суммарная пропускная способность ЛЭП превосходит установленную мощность ВЭС почти в два раза. Исходя из выбранного технического решения, можно сделать вывод, что СВМ данной ВЭС разрабатывалась в соответствии с требованиями к электростанции на традиционном источнике (тепловая электростанция – ТЭС), для которой должна быть обеспечена выдача всей располагаемой мощности в нормальной схеме и при возникновении одного нормативного возмущения группы I, II или III не допускается воздействие противоаварийной автоматики на отключение генераторов и длительную разгрузку турбин (ограничение мощности).

Проведем технико-экономическое сравнение типовой СВМ для ТЭС и СВМ, разработанной с учетом специфики работы ВЭС. Анализ проекта схемы и программы перспективного развития ЕЭС России на 2018–2024 гг. показал, что средняя установленная мощность вводимых ВЭС составляет около 30 МВт.

Выдача в сеть данного объема мощности может выполняться двухцепной ВЛ 35 кВ, одно- или двухцепной ВЛ 110 или 220 кВ.

В случае проектирования СВМ тепловой электростанции варианты с выдачей всей мощности по одной линии были бы недопустимы, так как такая схема не отвечает

заявленным требованиям по надежности. Однако согласно типовому техническому заданию АО «СО ЕЭС» для разработки СВМ ВЭС [8] такое исполнение допускается.

С учетом вышесказанного рассчитаем приблизительно стоимость СВМ для ВЭС мощностью 30 МВт двумя способами: по требованиям к СВМ ТЭС (подраздел А) и по облегченным требованиям, учитывающим возможность полного или частичного отключения генерирующего оборудования ВЭС в нормальной схеме при единичном нормативном возмущении групп I, II или III (подраздел В).

Расчеты стоимости реализации проекта (силовой части) приняты в соответствии со стандартом организации (СТО) ПАО «ФСК ЕЭС» [9], СВМ ВЭС – согласно требованиям к ТЭС.

#### А. СВМ ВЭС (по требованиям к ТЭС)

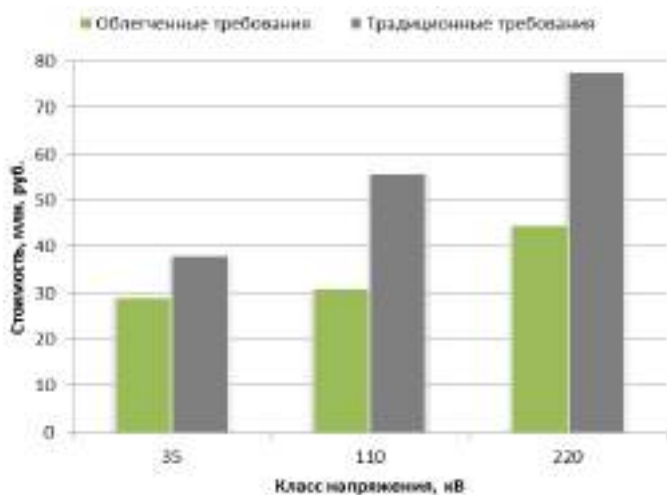
- На напряжении 35 кВ мощность электростанции может выдаваться двумя ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе два трансформатора 40 МВА и три ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 33,09 млн руб.
- На напряжении 110 кВ мощность электростанции может выдаваться двумя ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе два трансформатора 40 МВА и три ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 51,88 млн руб.
- На напряжении 220 кВ мощность электростанции может выдаваться двумя ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе два трансформатора 40 МВА и три ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 74,17 млн руб.

#### В. СВМ ВЭС (облегченные требования)

- На напряжении 35 кВ мощность электростанции может выдаваться двумя ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе один трансформатор 40 МВА и три ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 25,76 млн руб.
- На напряжении 110 кВ мощность электростанции может выдаваться одной ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе один трансформатор 40 МВА и две ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 29,23 млн руб.
- На напряжении 220 кВ мощность электростанции может выдаваться одной ВЛ. Тогда РУ будет содержать в себе один трансформатор 40 МВА и две ячейки выключателей соответствующего класса напряжения. Суммарная стоимость такой СВМ составит 42,96 млн руб.

Представим полученный результат графически (рисунок).

Относительная разница в стоимости СВМ ВЭС для разных классов напряжения приведена в табл. II.



Стоимостные показатели схем выдачи мощности по традиционным и облегченным требованиям

Наиболее ощутимая разница в стоимости СВМ для разных вариантов при выдаче мощности на напряжении 110 кВ. В таком случае облегченные требования позволяют снизить стоимость СВМ на 44,09 %.

Таблица II – Относительная разница в стоимости СВМ ВЭС и ТЭС

Класс напряжения, кВ	Относительная разница в стоимости, %
35	33,25
110	44,09
220	42,44

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России развитие возобновляемых источников энергии является одним из наиболее перспективных направлений в электроэнергетике. ВЭС обладают рядом существенных достоинств, таких как экологичность, эргономика, использование возобновляемого, неисчерпаемого источника энергии (экономия на топливе, в том числе на процессе его добычи и транспортировки), рост экономической конкурентоспособности по сравнению с традиционными источниками энергии, простое обслуживание, низкие затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию.

Однако, несмотря на массовое внедрение, стоимость строительства современной ВЭС велика. Кроме того, не следует забывать, что ВЭС присуща нестабильность,

закрывающаяся в негарантированности получения необходимого количества электроэнергии (значительная зависимость от неконтролируемого фактора – силы ветра). Указанные недостатки многие годы в России сдерживали развитие ветроэнергетики.

В настоящее время при государственной поддержке дан новый импульс для устойчивого развития этого многообещающего направления электроэнергетики.

Для эффективного развития отрасли необходимо обеспечение технико-экономических условий, способных привлечь новые инвестиции в соответствующие проекты, которые формируются в том числе на основе существующей нормативно-технической базы.

Формирование современных требований к разработке СВМ, учитывающих особенности производства электроэнергии на ВЭС, – лишь один шаг к выработке оптимальных норм и правил, в рамках которых будет расти и развиваться пласт «зеленой» энергии.

## Список литературы

- [1] Муравьев С.Б. Мировые тенденции использования возобновляемых источников энергии // Возобновляемая энергетика. Главный энергетик. № 8. С. 59–66.
- [2] ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1999.
- [3] ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 2003.
- [4] ГОСТ Р 51991-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2003.
- [5] Методические рекомендации по определению предварительных параметров выдачи мощности строящихся (реконструируемых) генерирующих объектов в условиях нормальных режимов функционирования энергосистемы, учитываемых при определении платы за технологическое присоединение таких генерирующих объектов к объектам электросетевого хозяйства: утв. 30 апреля 2008 г.
- [6] Отчет о функционировании ЕЭС России 2017 [Электронный ресурс]: отчеты. URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups\\_rep2017.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups_rep2017.pdf).
- [7] Томчин Г.А., Романов А.А., Гаврилов Е.И. О системе технического регулирования в электроэнергетике // Энергонадзор и энергобезопасность. 2006. № 3. URL: <http://www.iestream.ru>.
- [8] Рекомендуемая форма задания на выполнение работы «Схема выдачи мощности солнечной/ветровой электростанции». URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/ups\\_develop/forms/model\\_specification\\_vie\\_2013\\_1.RTF](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/ups_develop/forms/model_specification_vie_2013_1.RTF).
- [9] СТО 56947007-29.240.124-2012. Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–1150 кВ.

# РАЗРАБОТКА БИОГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Никулин К.В.

Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия  
kirill\_nikulin\_1996@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На сегодняшний день в Российской Федерации имеется большое количество полигонов твердых коммунальных отходов, каждый из которых имеет значительный энергетический потенциал. Полигон «Пашино», располагающийся к северу от Новосибирска, занимает 8 га и функционирует более 10 лет. Таким образом, необходимо изучить принципы получения газа из тела полигона и оценить его запасы, определить состав оборудования и основные технические параметры электростанции, а также обозначить способы управления объектом распределенной генерации.

**Материалы и методы:** Технические основы электротехники, визуальный осмотр территории полигона, каталожные данные производителя оборудования.

**Результаты:** Определены технические параметры станции, оценены запасы газа и примерные сроки функционирования объекта, проанализированы варианты конструкции электростанции, рассчитаны первичные экономические показатели, изучены особенности функционирования объекта в соответствии с законодательством РФ, изучены принципы совместной работы объектов распределенной генерации в составе виртуальной электростанции.

**Выводы:** Предложен вариант технического оснащения полигона ТКО, который позволит получить 1 МВт электрической энергии и за счёт этого компенсировать потери в сети, частично разгрузить проходящие линии. Также потери можно снизить, используя более совершенные системы управления: виртуальная электростанция обеспечивает эффективное управление спросом на электроэнергию и позволяет совмещать и оптимизировать графики нагрузок потребителей. Такое объединение генерирующих мощностей и потребителей способствует сглаживанию пиковых нагрузок и снижению цены на электроэнергию, обеспечивает баланс энергетической системы и регулирует непостоянную выработку возобновляемых источников энергии.

**Ключевые слова:** свалочный газ, распределенная генерация, нетрадиционная энергетика.

# DEVELOPMENT OF THE BIOGAS ELECTRIC STATION IN THE NOVOSIBIRSK REGION

K. Nikulin

Novosibirsk State Technical University,  
Novosibirsk, Russian Federation  
kirill\_nikulin\_1996@mail.ru

## Abstract

**Background:** Nowadays, there are a plenty of solid municipal waste landfills in the Russian Federation, each of them has significant energy potential. The Pashino landfill, located to the north of Novosibirsk, occupies 8 hectares and has been operating for more than 10 years. Thereby, it is necessary to know the principles of obtaining gas from the body of the landfill and assess its reserves, determine the composition of the equipment and the main technical parameters of the power plant, and also indicate methods for controlling the object of distributed generation.

**Materials and methods:** Technical fundamentals of electrical engineering, visual inspection of the landfill site, catalog data of the equipment manufacturer.

**Results:** The technical parameters of the station were determined, the gas reserves and approximate terms of the facility operation were estimated, the variants of the power plant design were analyzed, the primary economic indicators were calculated, and the features of the facility operation were studied in accordance with the legislation of the Russian Federation. The principles of joint operation of distributed generation objects in a virtual power plant are studied.

**Conclusions:** The technical equipment of solid municipal waste landfill is proposed, which will allow to receive 1 MW of electric energy and, due to this, to compensate losses in the network, to unload the passing lines partially. Also, losses can be reduced by using more sophisticated control systems: a virtual power plant provides efficient management of electricity demand and allows to combine and optimize the load graphs of consumers. This combination of generating and consuming power promotes smoothing the peak loads and lowering the price of electricity, ensuring the balance of the energy system and regulating the volatile generation of renewable energy sources.

**Key words:** landfill gas, distributed generation, non-traditional energy.



## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на территории России насчитывается более тысячи мусорных полигонов и около 15 тысяч санкционированных свалок. Со временем разлагающиеся отходы начинают выделять различные смеси газов. Состав смеси газов может варьироваться в зависимости от типа отходов, но всегда имеются метан, который занимает от 30 до 60 %, диоксид углерода и сероводород, первые два из этих газов являются парниковыми и усиливают негативный эффект изменения климата. Метан также является горючим и его свободный выход повышает пожароопасность свалок, соответственно, встает вопрос о сборе газа и его утилизации. Есть два способа утилизации газа: сжигание на факеле и использование для производства энергии [1].

## II. О ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ПОЛИГОНА ТКО

Полигон ТБО – специальное земляное сооружение, которое предназначено для изоляции и обезвреживания твердых бытовых (коммунальных) отходов. Есть два основных типа расположения полигона: на плоском рельефе либо в специально выкопанном карьере. Дно застилается специальной мембраной, которая не допускает попадания вредных веществ в почву, слои располагаемых отходов должны чередоваться со слоями грунта, которые предназначены для предотвращения выхода газа. Схема полигона представлена на рисунке.

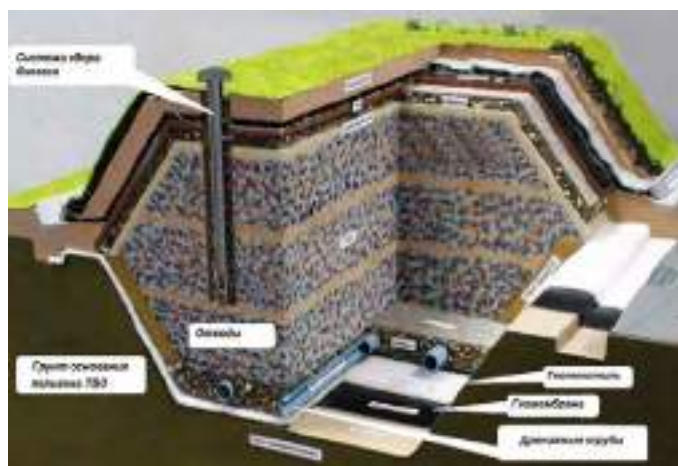


Схема полигона ТКО с установленной газосборной скважиной

Для получения газа на полигоне бытовых отходов используется система скважин. Для получения 500 м<sup>3</sup> газа в час на 3 га необходимо расположить 13–15 скважин. Скважина – это отверстие диаметром 600 мм, в центр которого помещается перфорированная труба и вокруг обсыпается щебнем. На некоторой глубине от поверхности полигона располагается патрубков, соединяющий скважину с компрессорной станцией. Такая система должна обеспечивать сбор газа в радиусе 25 м от скважины. Для стабильной и крупной подачи газа необходима укатка полигона: бытовые отходы в обязательном порядке должны спрессовываться, чтобы существенно повысить скорость выхода газа.

На начальном этапе эксплуатации станции газ будет выходить ускоренными темпами, но в скором времени поток снизится и станет постоянным. В этот момент необходимо найти баланс между производством и откачкой газа.

## III. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

Полигон, на котором планируется постройка станции, расположен в 6 км к северу от Новосибирска, недалеко от поселка Пашино. Площадь, отводимая на получение газа, составляет 3 га. В настоящее время момент на территории полигона располагается около 5 млн м<sup>3</sup> отходов и ежегодно добавляется 400–500 тыс. т. Предполагаемая мощность станции составит 1 МВт.

По данным, полученным в ходе общения со специалистом в области экологии, более 10 лет занимающимся вопросами утилизации газа, выделяемого полигоном ТБО, для получения 1 МВт электрической энергии необходимо в час 500 м<sup>3</sup> свалочного газа, и, соответственно, около 250 м<sup>3</sup> метана. Чтобы обеспечить такое количество газа, на территории 3 га необходимо расположить 13–15 скважин.

## IV. ВИДЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

На сегодняшний день для целей распределенной генерации применяется несколько аппаратов: газотурбинные установки, газопоршневые установки и парогазовые установки.

Газотурбинные установки (ГТУ) представляют собой объединенные в одном корпусе силовую турбину и электрический генератор. Лопатки турбины подвергаются воздействию высокотемпературного газа, что создает крутящий момент, который передается на вал электродвигателя. Коэффициент полезного действия данных установок находится в пределах 33–39 %, что в целом ниже, чем у газопоршневых агрегатов. Характеристики выбранного газотурбинного аппарата представлены в табл. I [2].

Таблица I – ХАРАКТЕРИСТИКА ГТУ

Характеристика	МГТУ-100
Мощность, кВт	100
Номинальная частота вращения, об/мин	65000
Расход топлива при номинальной мощности, м <sup>3</sup> /ч	50
Номинальное выходное напряжение, В	380 (± 10%)
Межсервисный интервал, час	4 000
Назначенный ресурс, час	60000
Масса, кг	2500
Температура выхлопа, °С	358,6

Важная особенность ГТУ, которая позволяет более высокую мощность, – возможность вторичного использования газа. После того, как газ совершает работу над турбиной, он все еще имеет высокий температурный потенциал порядка 550–640 °С, что позволяет применять

паросиловые установки (котлы-утилизаторы), где происходит нагрев воды и образование водяного пара. Температура дымовых газов достаточна, чтобы довести пар до состояния, необходимого для работы паровой турбины, которая приводит в действие торой электрогенератор. Объединенные вместе ГТУ, котел-утилизатор и паровая турбина образуют парогазовую установку. Таким образом, электрический КПД установок возрастает до 57–59 %, а коэффициент использования топлива повышается до 90 %. Данный способ использования потенциала отработавшего дымового газа не единственный, тепловая энергия может использоваться для отопления, получения горячей воды и других производственных потребностей [3].

В основе работы газопоршневых установок (ГПУ) лежит принцип действия двигателя внутреннего сгорания (ДВС) – это тип двигателя, в котором тепловая энергия топлива (обычно применяется жидкое или газообразное углеводородное топливо), сгорающего в рабочей зоне, преобразуется в механическую работу. Диапазон единичных мощностей ГПУ находится в районе от 0,1 до десятков МВт, общий моторесурс – в пределах 250 000 ч, ресурс до капитального ремонта составляет 60 000–80 000 ч. Кроме большого моторесурса к достоинствам ГПУ стоит отнести малую зависимость КПД двигателя от температуры окружающего воздуха, необходимое низкое давление топливного газа от 0,01 до 0,035 МПа, не требующее дожимного компрессора, малое снижение КПД при 50 % снижении нагрузки, неограниченное количество запусков. Характеристики газопоршневого аппарата представлены в табл. II [2]. Кроме того, одними из достоинств газопоршневой установки является ремонт агрегата на месте, низкие эксплуатационные затраты и малые размеры, т. е. низкие инвестиционные затраты, возможность кластеризации (параллельная работа нескольких установок).

Таблица II – ХАРАКТЕРИСТИКА ГПУ

Модель	ТМЗ-250
Мощность, кВт	250
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Номинальный коэффициент мощности	0,8
Номинальное напряжение, В	400
Ток номинальный, А	360
Удельный расход топлива при номинальной мощности, м <sup>3</sup> /кВт·ч	0,25
Расход топлива при номинальной мощности, м <sup>3</sup> /ч	62,5
Назначенный ресурс до ремонта, ч	24000
Масса, кг	3600
Диапазон рабочих температур, °С	-50...+50

Для дальнейшего рассмотрения были выбраны ГПУ, выигрывающие по ряду признаков: низкая цена, более высокий КПД, возможность проведения ремонта непосредственно на месте установки аппарата, отсутствие требования наличия повышенного давления газа. А также важный фактор, указанный заказчиком проекта, – оборотование должно быть российского производства.

## V. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

Экономическая привлекательность проекта обусловлена тем, что государство оказывает помощь в реализации проекта и устанавливает благоприятные условия для получения дохода. В табл. III представлен расчет капитальных затрат на строительство электростанции.

Таблица III – РАСЧЕТ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

Наименование	Кол-во	Цена, тыс. руб.	Затраты, тыс. руб.
ГПУ ТМЗ 250 кВт	5	3950	19750
Система синхронизации с сетью	1	580	580
Контейнер с технологическими системами	5	715	3575
Пуско-наладочные работы	5	150	750
Пробные бурки	1	3000	3000
Устройства очистки газа	1	21340	21340
Газосборная станция Факельная установка	1	68000	68000
Суммарные затраты			1165

Согласно постановлению от 23 сентября 2016 г. № 961, на технологическое присоединение установок до 25 МВт выделяются субсидии из федерального бюджета размером не более 70 % от стоимости технологического присоединения и не более 15 млн руб.

Согласно постановлению от 27 декабря 2004 г. № 861, государство гарантирует получение дохода на вложенный капитал инвестора, обеспечивает гарантированное участие в энергосистеме объектам НВИЭ; устанавливается специальный тариф на 15 лет с фиксированным уровнем доходности.

Тариф устанавливается согласно приказу ФАС России №900/15 от 30 сентября 2015 г. и включает в себя следующие требования:

- установленная мощность проектируемой станции не должна превышать 25 МВт;
- устанавливается долговременный тариф на 15 лет с фиксированным уровнем доходности;
- затраты на 1 кВт электрической энергии не должны превышать 98 000 руб.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации проекта генерации энергии на основе свалочного газа был предложен вариант технического оснащения полигона твердых коммунальных отходов. Также были изучены нормативные документы, регулирующие функционирование объекта распределенной генерации и устанавливающие меры государственной поддержки нетрадиционной энергетики. Расчет капитальных затрат на строительство электростанции показал, что при установленной мощности станции 1250 кВт затраты

на 1 кВт не превышают величины 98000 рублей. Выполнение данного условия в совокупности с малой величиной установленной мощности, не превышающей 25 МВт, позволяет установить специальные тарифные условия, которые позволяют ускорить сроки возврата инвестиционного капитала.

Реализация данного проекта позволяет компенсировать потери в сети и частично разгрузить проходящие линии. Также, благодаря установке газосборного оборудования, решается ряд экологических проблем, связанных со свободным выходом свалочного газа в окружающую среду.

Помимо рассмотренных принципов функционирования станции имеется перспективный вариант работы объекта распределенной генерации в составе виртуальной электростанции.

Виртуальная электростанция – это структура, объединяющая распределенные генераторы, активных потребителей и системы аккумулирования энергии. Элементы виртуальной электростанции могут располагаться на значительных расстояниях друг от друга. Управление

виртуальными электростанциями осуществляется дистанционно через управляющую систему, которая принимает информацию о текущем состоянии каждой энергоустановки и передает на них управляющие сигналы. Данная структура обеспечивает эффективное управление спросом на электроэнергию и позволяет адекватно совмещать и оптимизировать графики нагрузок потребителей. Такое объединение генерирующих мощностей и потребителей способствует сглаживанию пиковых нагрузок и снижению цены на электроэнергию [4].

#### Список литературы

- [1] Московенко В. Интерактивная карта свалок России: этапы большого пути [Электронный ресурс]. URL: <http://gosvopros.ru/>
- [2] GazEcos – промышленная компания, занимающаяся производством электростанций по собственной запатентованной технологии и их продажей конечным потребителям [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gazecos.ru/>
- [3] Программа «Модернизация электроэнергетики России на период до 2020 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/>
- [4] Стенников В.А., Воропай Н.И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energystrategy.ru>

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ САКМАРСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ОРЕНБУРГСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Обухова Н.В., Башкатова К.И., Егоров А.О.

ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия

ksenia\_paris@mail.ru, a.o.egorov@urfu.ru, enatikru@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В условиях отсутствия глубокой проработки вопросов эксплуатации солнечных электростанций крайне интересным являются исследования в области анализа режимов работы солнечных электростанций, так как на их основе можно оценить их технологическую и экономическую эффективность работы, оценить и получить экспериментальные обоснованные технико-экономические показатели.

**Материалы и методы:** Исходными данными для исследования работы солнечных ЭС являются численные массивы оперативно-информационного комплекса Диспетчера, предоставленные АО «СО ЕЭС». Математическая обработка численного массива статистических данных за годовой интервал времени с почасовой дискретностью позволяет определить основные и вторичные технико-экономические показатели работы СЭС.

**Результаты:** Рассчитаны параметры эффективности работы СЭС: коэффициент использования установленной мощности, число часов использования максимума, а также объёмы выработанной электроэнергии для суточных, месячных, сезонных и годового интервалов времени.

**Выводы:** Полученные закономерности функционирования солнечных ЭС используются для разработки правил оперативно-диспетчерского управления солнечными электростанциями в составе Единой энергосистемы и определения технико-экономического обоснования строительства новых СЭС.

**Ключевые слова:** солнечные электростанции, электрические режимы работы, ОИК Диспетчера.

## OPERATION MODES OF SAKMARSKAYA SOLAR POWER PLANT IN ORENBURG POWER SYSTEM

N. Obukhova, K. Bashkatova, A. Egorov

Ural Federal university named after the First President of Russia B.N. Yeltsin  
Ekaterinburg, Russian Federation

ksenia\_paris@mail.ru, a.o.egorov@urfu.ru, enatikru@gmail.com

## Abstract

**Background:** In the absence of a deep studying of power system operation issues, investigations in the sphere of solar power plants operation modes analysis become extremely interesting, as on their basis it can be possible to evaluate the efficiency of their operation, to assess their technical and economic indexes and other factors.

**Materials and Methods:** The initial research data are numerical arrays of SCADA system provided by “SO UPS”, JSC. Mathematical processing of statistic data numerical arrays for the annual per-hour resolution time intervals allows to determine the main and the proxy technical and economic indexes of solar power plants operation.

**Results:** The efficiency parameters of solar units' operation were calculated: capacity factor, maximum installed power utilization time, and capacity output for daily, monthly, seasonal and annual time intervals.

**Conclusions:** The obtained trends of solar power plants operation are used to develop the operational-dispatching control rules in the interconnected power system and to define the feasibility study for construction of new solar power plants.

**Key words:** solar power plants, electrical operating modes, operative-information complex of control engineer.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Оренбургская область находится на юге Российской Федерации, где наблюдается высокая солнечная активность. В этом регионе России складываются благоприятные условия для внедрения и использования установок на базе преобразования солнечной радиации. Работы по их строительству и эксплуатации находятся в начальной стадии как для использования на крупных энергоустановках, так и для малых автономных потребителей. Настоящая

работа посвящена исследованию режимов работы достаточно большой Сакмарской солнечной электростанции (СЭС) и исследованию её технико-экономических параметров.

### II. ОПИСАНИЕ САКМАРСКОЙ СЭС

Сакмарская СЭС, являясь уникальным экологическим и энергетическим объектом генерации электроэнергии из солнечного излучения установленной мощностью 25 МВт

с перспективой увеличения мощности до 40 МВт, располагается в северной части г. Орска на месте бывшего золоотвала Орской ТЭЦ-1 и находится на балансе ПАО «Т Плюс» [1].

На Сакмарской СЭС установлены 99 905 шт. фотоэлектрических панелей. Основной потребитель электроэнергии – Орский нефтеперерабатывающий завод.

Назначение объекта – производство электрической энергии, основанной на фотоэлектрическом преобразовании энергии солнечного излучения в электрическую энергию. Подключение Сакмарской СЭС к прилегающей энергосистеме – транзит.

Для преобразования постоянного тока фотоэлектрических солнечных модулей в переменный трехфазный ток применяются блочно-модульные инверторные установки (БМИУ). Для выдачи выработанной энергии в прилегающую энергосистему построена повышающая подстанция 10/110 кВ, расположенная в границах Сакмарской СЭС. В дальнейшем по ВЛ 110 кВ СЭС – Орская ТЭЦ-1 и ВЛ 110 кВ СЭС – НПЗ электростанция соединяется с существующей электрической сетью 110 кВ [2].

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа режимов работы СЭС и исследования её технико-экономических параметров используется экспериментальный массив данных, полученный из системы ОИК, представляющий собой графики выдачи активной и реактивной мощности с почасовой дискретностью. На рис. 1 представлена диаграмма исходных данных, полученных в ходе промышленной эксплуатации Сакмарской СЭС на протяжении 2016 г.

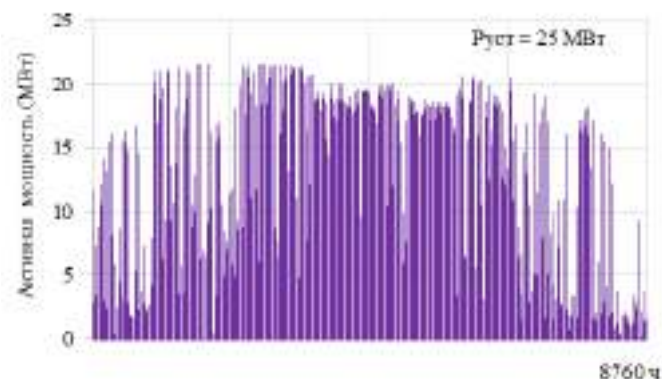


Рис. 1 – Годовой график выдачи активной мощности Сакмарской СЭС за 2016 г. (дискретность измерений – 1 ч)

Из диаграммы на рис. 1 видно, что для Сакмарской СЭС с установленной электрической мощностью 25 МВт характерна высокая неравномерность и импульсивная динамика выдачи мощности, так как работа станции напрямую зависит от условий окружающей среды – солнечной активности и облачности.

В течение срока эксплуатации станции отмечены режимы потребления активной мощности (отрицательная генерация). Отрицательная активная мощность станции объясняется её потреблением в ночные часы на собственные нужды электростанции.

На основе массива данных выдачи активной мощности с почасовой дискретностью для Сакмарской СЭС рассчитываются следующие эксплуатационные показатели:

- объём производства электроэнергии ежемесячно;
- среднемесячная активная мощность;
- среднемесячный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ).

Также строится график суточной активной мощности с почасовой дискретностью в день наступления абсолютного годового максимума, строятся графики выдачи активной мощности Сакмарской СЭС для летних и зимних характерных суток, соответственно, и на их основе рассчитываются локальные и интегральные параметры электростанции. В заключении приведена таблица эксплуатационных технико-экономических параметров Сакмарской СЭС.

### IV. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для обработки массива данных по активной и реактивной мощности Сакмарской СЭС используются классические формулы, используемые для обработки графиков нагрузок:

$$W_{\text{мес}} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad n \leq 744; \quad (1)$$

$$P_{\text{ср.мес}} = \frac{W_{\text{мес}}}{T_{\text{мес}}}, \quad (2)$$

$$W_{\text{сут}} = \sum_{i=1}^{24} P_i, \quad (3)$$

$$K_{\text{КИУМ}} = \frac{W_{\text{мес}}}{8760 P_{\text{уст}}}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – активная мощность за каждый час, МВт;  $n$  – количество часов;  $T_{\text{мес}}$  – количество часов в одном месяце;  $P_{\text{уст}}$  – установленная мощность электростанции, МВт.

По формулам (1)–(3) последовательно рассчитываются годовой и месячный объёмы выработки электроэнергии, среднемесячная выработка активной мощности, для летних и зимних суток рассчитываются суточные объёмы выработки электроэнергии летнего и зимнего характерного дня. По формуле (4) рассчитывается коэффициент использования установленной мощности для годового и месячного интервалов времени. Дискретность исходного массива данных составляет 1 ч. Мощность за 1 ч равна объёму электроэнергии, выработанной за каждый  $i$ -й час.

Результаты обработки массивов данных далее оформлены в графическом виде в соответствии с общепринятыми месячным и часовым усреднениями. Для расчёта характерных режимов суточного летнего и зимнего характерного дня взяты 22 июня и 22 декабря, соответственно. Все результаты сведены в таблицу.

### V. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлен годовой график выработки электроэнергии Сакмарской СЭС. Минимальный объём выработки электроэнергии в течение года отмечен в декабре – 382 тыс. кВт·ч. Максимальный объём выработки отмечен в августе – 3 851 тыс. кВт·ч. Среднемесячная выработка электроэнергии в течение года составила

2 290 тыс. кВт·ч. Особенность данной закономерности выработки электроэнергии заключается в сезонной неравномерности выдачи активной мощности. На графике видно, что месячные объёмы выдачи электроэнергии достигают максимальных значений в летние месяцы. В зимние месяцы объём выработки существенно снижается до уровня около 400 тыс. кВт·ч. Так, в летние месяцы средняя выработка электроэнергии составляет 3 452 тыс. кВт·ч, в зимние месяцы, в осенне-зимний период (сентябрь – февраль) средняя выработка электроэнергии составляет 1 459 тыс. кВт·ч, что в 2,5 раза меньше, чем летом. Всего в течение года выработано 27 471 тыс. кВт·ч электроэнергии, в том числе 17 258 тыс. кВт·ч в летний период и 10 213 тыс. кВт·ч в зимний период или 63 % электроэнергии выработано в летний период и 37 % в осенне-зимний период, соответственно. Такая существенная разница, очевидно, обусловлена различной энергией солнечного излучения, температурой, влажностью воздуха и другими условиями окружающей среды.

На рис. 3 изображена динамика изменения среднемесячной выдачи мощности Сакмарской СЭС в течение года. Данная диаграмма имеет схожую с графиком выработки электроэнергии (см. рис. 1) закономерность: при установленной мощности Сакмарской СЭС в 25 МВт, максимальная выдаваемая мощность отмечается в летний период (ЛП) и составляет 4,86–5,23 МВт, в осенне-зимний период (ОЗП) выдаваемая мощность СЭС составляет 0,51–2,59 МВт.

Значительный интерес представляют режимы работы электростанции на суточных интервалах времени. В качестве характерных летнего и зимнего дней выбраны 22 июня и 22 декабря 2016 г. (рис. 4, 5).

Для указанных дней станция находится в активном рабочем состоянии в различных интервалах времени. Так, весной Сакмарская СЭС активно работает в течение шести часов в интервале времени с 10:00 до 15:00, в июне время работы станции в интервале с 07:00 до 21:00 составило 15 часов, зимой станция работала в течение шести часов с 11:00 до 16:00.

На рис. 6 приведена динамика изменения коэффициента использования установленной мощности Сакмарской СЭС в течение года. Так, при установленной мощности электростанции 25 МВт максимальная выработка электроэнергии в течение года может составить 219 млн кВт·ч, однако в течение года выработка электроэнергии составила 27,47 млн кВт·ч. Таким образом, годовой КИУМ Сакмарской СЭС составил 11 %.

В течение года КИУМ Сакмарской СЭС менялся в диапазоне от 2 до 21 %. Минимальный КИУМ зарегистрирован в декабре – 2,1 %, максимальный отмечен в июне – 20,9 %. Средний КИУМ для летнего периода составил 18,76 %, для осенне-зимнего периода – 9,95 %.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам обработки массива данных ОИК системы с почасовой дискретностью за 1 год рассчитаны основные технологические параметры работы Сакмарской СЭС. Все параметры приведены в таблице.

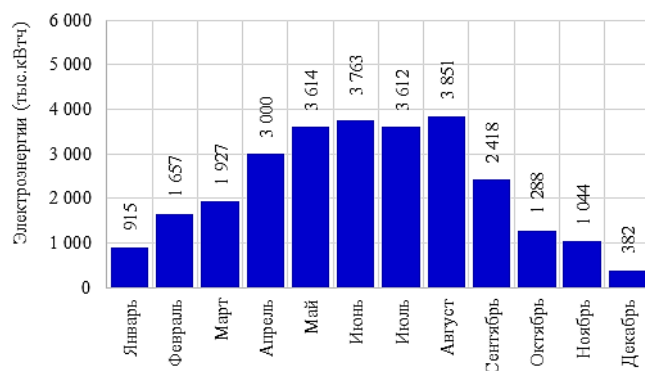


Рис. 2 – График выработки электрической энергии Сакмарской СЭС за 2016 г. (дискретность значений – 1 месяц)

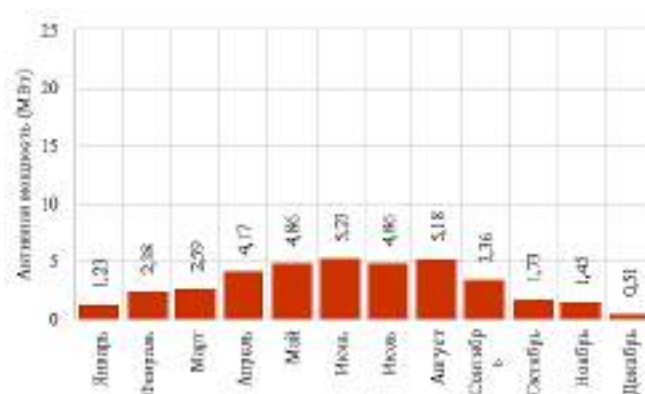


Рис. 3 – График изменения выдачи среднемесячной активной мощности Сакмарской СЭС в течение 2016 г.

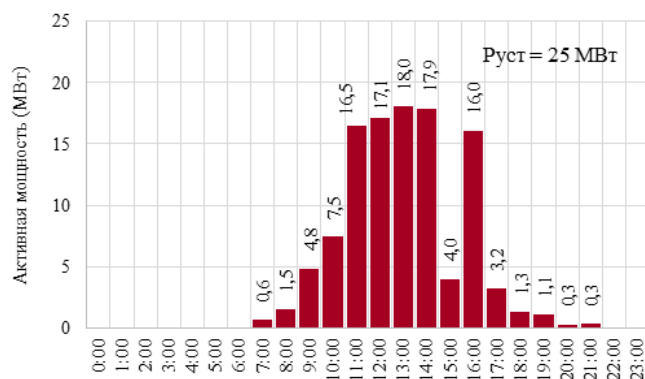


Рис. 4 – Летний суточный график выдачи активной мощности Сакмарской СЭС 22 июня 2016 г. (выработано 110,1 тыс. кВт·ч)

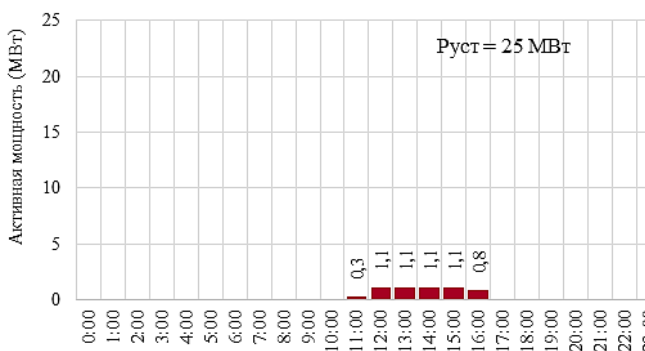


Рис. 5 – Зимний суточный график выдачи активной мощности Сакмарской СЭС 22 декабря 2016 г. (выработано 5,5 тыс. кВт·ч)

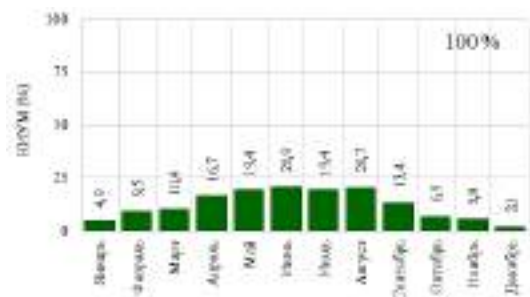


Рис. 6 – График изменения коэффициента использования установленной мощности КИУМ Сакмарской СЭС в течение 2016 г.

#### Ключевые показатели Сакмарской СЭС

Параметр	Значение
Установленная мощность, МВт	25,00
Абсолютный максимум, МВт	21,57
Абсолютный минимум, МВт	-0,34
Годовая выработка электроэнергии, кВт·ч	27 471 256
Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч:	
в течение года	2 290
летний период	3 451
осенне-зимний период	1 459
Время активной работы в течение суток, ч:	
летний период	15
осенне-зимний период	5
КИУМ, %:	
в течение года	11,17
летний период	18,76
осенне-зимний период	9,95

Таким образом, по истечении года эксплуатации Сакмарская СЭС имеет годовую выработку электроэнергии 27,5 млн кВт·ч, среднегодовую мощность 3,13 МВт и КИУМ 11 %. Данные параметры крайне важны для

электроэнергетики России не только с точки зрения оценки технико-экономической эффективности работы солнечных ЭС, но и с точки зрения повышения эффективности их работы для обоснования развития и строительства новых СЭС в России.

Особенно важным с научной, технической и экономической точек зрения являются исследования электрических режимов работы аналогичных солнечных электростанций в других регионах России, влияние состава элементной базы таких станций на их технико-экономические параметры. Также интерес представляет исследование и анализ электрических режимов работы на часовых и минутных интервалах времени, нерегулярных колебаний графика выдачи мощности для перспективной оценки возможности совместного использования резервов энергосистемы для регулирования электрических режимов больших электроэнергетических систем.

Важным параметром для СЭС всегда является объём инвестиций. По данным [1] инвестиции в электростанцию составили 2 538 млн руб, плановый срок окупаемости проекта – около 7 лет. В период 2017–2020 г. ПАО «Т Плюс» планирует ввести ещё 120 МВт генерирующих мощностей СЭС в Оренбургской энергосистеме [1].

#### Список литературы

- [1] ПАО «Т Плюс». Годовые отчёты [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tplusgroup.ru/> (дата обращения: 01.11.2017).
- [2] Задание на разработку проектной документации «Строительство Сакмарской солнечной фотоэлектрической станции установленной мощностью 25 МВт, г. Орск. Корректировка».
- [3] АО «СО ЕЭС». Годовые отчеты о технологическом функционировании ЕЭС России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.so-eps.ru>.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРАТКОСРОЧНОГО СНИЖЕНИЯ/ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ГПУ

Петровская Т.К., Фролова Я.А.  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»  
Новосибирск, Россия  
tanyapetrovskaya@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** При автономной работе электростанции малой мощности возникает вопрос поддержания баланса активной мощности. Для этого необходимо определять момент включения и отключения генераторов, их количество и загрузку при оперативном управлении режимом. Известно, что сейчас ввод/вывод в работу энергоблоков станций производится обслуживающим персоналом интуитивно, исходя из личного опыта, что порой может вести к неэффективному использованию оборудования. Ограничения, накладываемые применяемыми установками, в частности газопоршневой установкой, вынуждают держать в работе экономически необоснованное число агрегатов.

**Материалы и методы:** Математическое моделирование, расчет в Excel.

**Результаты:** Проанализировано влияние изменения частоты на основные электроприемники, оборудование электростанций и собственные нужды. Выявлено, что стабильная работа в изолированной системе возможна при таких снижениях/повышениях частоты, если речь идет о кратковременных колебаниях. В результате предлагается для решения задачи оптимального выбора и загрузки генерирующего оборудования учитывать статические характеристики нагрузки по частоте, что позволит снизить/повысить частоту на 1 Гц, допускаемое ГОСТом в изолированной системе.

**Выводы:** После применения на примере реальной энергосистемы делаем вывод, что такое условие сильно влияет на количество агрегатов в работе, что позволяет наиболее эффективно и экономически выгодно использовать оборудование.

**Ключевые слова:** изолированная система, газопоршневая установка, выбор состава, частота, график нагрузки, электроприемники, статические характеристики.

# ANALYSIS OF THE EFFECT OF SHORT-TERM REDUCTION/INCREASE IN FREQUENCY IN AN ISOLATED POWER SYSTEM WITH GAS PISTON UNIT ON THE EFFICIENCY OF THE USE OF EQUIPMENT

T. Petrovskaja, Ya. Frolova  
Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation  
tanyapetrovskaya@mail.ru

## Abstract

**Background:** With the autonomous operation of a low-power plant, the question arises of maintaining a balance of active power. To do this, it is necessary to determine the moment when the generators are turned on and off, their number and load when operating the mode. It is known that now the input / output of the power units of the stations is performed by the service personnel intuitively and based on personal experience, which can sometimes lead to inefficient use of equipment. Limitations imposed by the plants used, in particular the gas piston unit, force the economically unjustified number of units to operate.

**Materials and methods:** Mathematical modeling, calculation in Excel.

**Results:** The influence of frequency variation on main electric receivers, equipment of power plants and own needs is analyzed. It is revealed that stable operation in an isolated system is possible with such a decrease/increase in frequency, if it is a question of short-term fluctuations. As a result, it is proposed to take into account the static characteristics of the load in frequency to solve the problem of optimal selection and loading of generating equipment, which will allow to reduce/increase the frequency by 1 Hz, allowed by GOST in an isolated system.

**Conclusions:** After applying the example of a real power system, we conclude that such a condition greatly affects the number of units in operation, which makes it most cost-effective and economical to use the equipment.

**Key words:** isolated system, gas piston unit, choice of composition, frequency, load schedule, electric receivers, direct-current characteristic.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Неравномерное распределение населения по территории России и ее большая протяженность экономически и технически не позволяют охватить потребителей Единой энергосистемой. Решением этой проблемы стало создание энергосистем с электростанциями малой мощности. В зависимости от внешних условий такие станции могут работать параллельно с Единой энергосистемой либо периодически или постоянно в изолированном режиме. Третий вариант постоянной работы в изолированном режиме используется наиболее часто в связи со сложностью организации параллельной работы и имеет много особенностей [1, 2]. В условиях распределенной генерации электростанции строятся непосредственно вблизи с потребителями, а мощность выбирается, исходя из ожидаемой нагрузки.

С ростом количества объектов распределенной генерации малой мощности становится очевидным невозможность организации централизованного диспетчерского управления. Это задает своеобразный тренд в развитии автоматики управления режимами изолированных энергосистем. Одной из основных задач управления в изолированном режиме является выбор состава и загрузки генерирующего оборудования для поддержания баланса активной мощности.

При выборе состава оборудования в темпе производства возникает проблема нахождения наиболее оптимального набора агрегатов. В [3–5] представлены задачи выбора состава генерирующего оборудования на этапе проектирования энергосистем с малой генерацией. Малая генерация для России – это чаще всего газотурбинные, газопоршневые, дизельные электростанции. Остановим внимание на первых двух установках – газопоршневых (ГПУ) и газотурбинных (ГТУ). Имеется ряд особенностей, исходя из которых производится выбор между этими установками. Например, КПД поршневых машин 40–47 % и мало меняется при нагрузке в диапазоне 50–100 % мощности. У газовых турбин КПД, в свою очередь, он составляет 17–36 %, и снижение нагрузки даже до 50 % уменьшает электрический КПД используемой газовой турбины почти в три раза. Исходя из этого преимущества, возьмем за основу газопоршневые агрегаты.

## II. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ЧИСЛЕННОГО СОСТАВА АГРЕГАТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Для поддержания баланса активной мощности при заданной частоте в изолированном режиме работы электростанции малой мощности необходимо определять момент включения и отключения генераторов, их количество и загрузку. В статье [6] была приведена методика выбора состава агрегатов на основе критерия выгоды отключения. Он заключается в нахождении экономической мощности агрегата  $P_0$ . Это такая мощность, при работе с нагрузками ниже которой выгодно отключать агрегат (рис. 1) [7, 8].

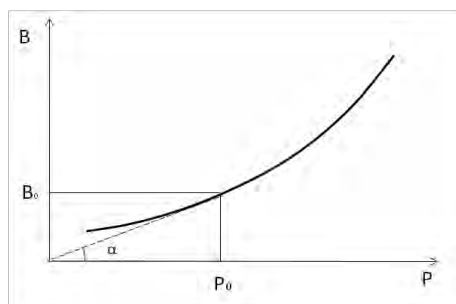


Рис. 1 – Определение экономической мощности агрегата

Также учитывались стационарные ограничения по балансу мощности, по загрузке агрегата, по режим сбросам/набросам нагрузки. В работе [6] показано, что наиболее значительное влияние на численный став оборудования оказывают резкие сбросы/набросы нагрузки. Это ограничение вытекает из того, что ГПУ не может стабильно работать при резких набросах/сбросах нагрузки свыше  $\pm 0,05 P_{\text{ном}}$  [9]. В результате были выявлены противоречия для отдельных периодов суток: наложение взаимоисключающих ограничений используемых установок. Например, ограничение работы с нагрузками ниже 40 %  $P_{\text{ном}}$  и ограничение на резкие сбросы/набросы нагрузки. По первому критерию при небольших нагрузках необходимо держать в работе малое число агрегатов, но из-за неравномерного потребления (скачков нагрузки) по второму критерию требуется значительно больше агрегатов. Такое противоречие необходимо устранить, к примеру, введением дополнительного оборудования (накопителей энергии) или совершенствованием методики выбора и загрузки состава включенного оборудования. Предлагается проанализировать влияние частоты на потребителей электроэнергии и оценить влияние учета статических характеристик нагрузки на выбор состава агрегатов.

## III. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В энергосистеме, как известно, поддерживается баланс производства и потребления электроэнергии, показателем качества этого процесса является отклонение частоты. Для изолированных систем в ГОСТ 32144-2013 приняты иные отклонения частоты, нежели для объединенной энергосистемы. Так, отклонение не должно превышать  $\pm 1$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и  $\pm 5$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю [10]. Известно, что частота напрямую связана с активной мощностью, в связи с чем необходимо проанализировать влияние отклонений частоты на оборудование станций, потребителей, потери в сетях и сделать вывод о возможности работы на пониженной частоте. В таблице и на рис. 2 представлено влияние отклонения частоты от номинальной на потребителей в зависимости от их типа [11].

Влияние частоты на производительность потребителей электроэнергии

Потребитель электроэнергии	Влияние частоты на производительность
Печи сопротивления Дуговые печи Лампы накаливания	Не влияет
Люминесцентные лампы	Влияет: снижение на 1 % уменьшает потребляемую активную мощность на 0,5–0,8 %
Синхронный двигатель	Влияет: частота вращения прямо пропорциональна частоте сети
Поршневые насосы Компрессоры Шаровые мельницы Дробилки Металлорежущие станки Подъемные механизмы Транспортные механизмы	Влияет: активная мощность снижается пропорционально частоте сети
Центробежные вентиляторы Насосы	Влияет: активная мощность снижается пропорционально третьей степени частоты сети

При анализе влияния частоты на силовые трансформаторы необходимо учесть увеличение тока холостого хода, который возрастает обратно пропорционально кубу частоты. Однако это актуально в больших энергосистемах, где мощные трансформаторы порой перегружены.

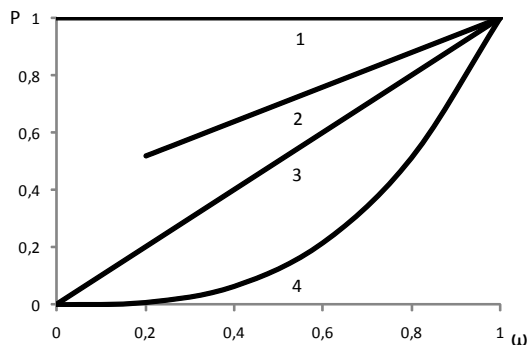


Рис. 2 – Статические характеристики потребителей электроэнергии: 1 – лампы накаливания, печи сопротивления, дуговые печи; 2 – люминесцентные лампы; 3 – поршневые насосы, компрессоры, шаровые мельницы, дробилки, металлоорежущие станки, подъемные и транспортные механизмы; 4 – центробежные насосы и вентиляторы

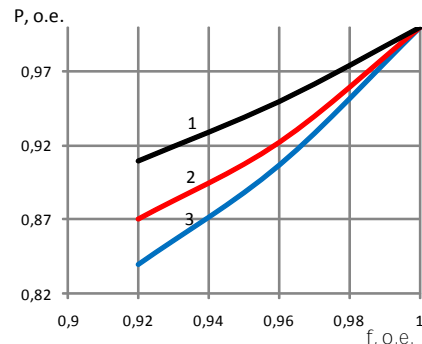


Рис. 3 – Статические характеристики для разных видов районов по типу нагрузки: 1 – район с преобладанием бытовых потребителей и осветительных установок; 2 – энергосистема; 3 – промышленный район с преобладанием асинхронных двигателей

Для малых энергосистем, имеющих маломощные трансформаторы, подобное возрастание тока опасности не представляет, поскольку этот ток относительно невелик.

Известным фактом является ограничение на глубокое снижение частоты ниже 49,0 Гц по условию работы собственных нужд тепловых станций. Данное ограничение обуславливает режим работы больших питательных электронасосов котлов станций. В том случае, когда речь идет о станциях малой мощности, также можно пренебречь этим ограничением.

В отношении потерь в электрических сетях справедливо соотношение: снижение частоты на 1 % увеличивает потери в электрических сетях на 2 %. Вместе с тем особенностью автономных систем является близкое расположение к потребителям и небольшая протяженность сетей.

Состав потребителей в энергосистеме может быть разным – бытовая, промышленная, осветительная нагрузки. Поэтому при анализе необходима информация о составе потребителей для оценки влияния суммарного графика нагрузки. Обычно станции малой мощности размещают в непосредственной близости к потребителю, и чаще всего это бытовая потребитель, который составляет 50 % и более. На рис. 3 представлены статические характеристики для различных потребителей по составу нагрузки. При преобладании бытовых потребителей характеристика мягче, соответственно, регулирующий эффект нагрузки меньше [12].

При снижении частоты до 49 Гц в энергосистеме в районе с преобладанием бытовых потребителей вырабатываемая активная мощность может составлять  $0,9P_{нагр}$  (рис. 3). Подобное допущение позволит устранить выявленный в предыдущих работах конфликт ограничений.

Таким образом, проанализировав влияние частоты на различных потребителей электроэнергии в энергосистеме, можно сделать вывод, что кратковременное снижение/повышение частоты не создаст сколько-нибудь значительного снижения производительности.

Благодаря более мягким условиям по частоте для изолированных систем график нагрузки (рис. 4) становится ниже, уменьшается амплитуда скачков и провалов нагрузки, вследствие чего в часы максимальных колебаний нагрузки уменьшается количество переключений и неэффективное использование оборудования. Снижаются требования по соблюдению ограничения на резкие

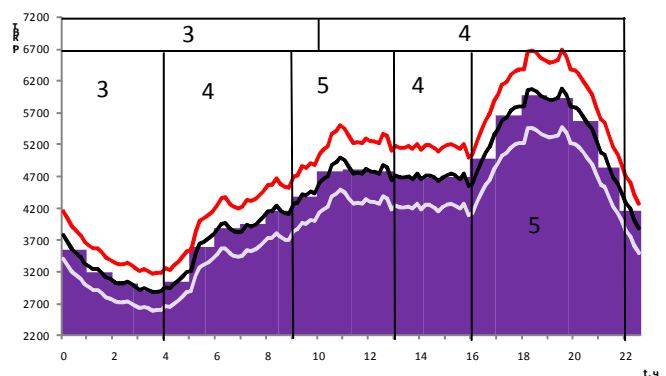


Рис. 4 – Влияние снижения/повышение частоты в энергосистеме на количество агрегатов в работе: черная линия – реальный график нагрузки объекта; красная линия – активная мощность станции при повышении частоты на 1 Гц; белая линия – активная мощность станции при снижении частоты на 1 Гц

сбросы/набросы нагрузки. Стоит отметить, что нет необходимости держать частоту в граничных пределах  $50 \pm 1$  Гц целые сутки, предлагается использовать это условие именно в часы, когда скачки нагрузки миксимальные.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

На примере изолированной энергосистемы с преобладанием бытовой нагрузки, содержащей ГПУ (на станции 5 ГПУ мощностью по 2 МВт каждый), было проверено влияние изменения частоты на  $\pm 1$  Гц на количество агрегатов в работе. На графике нагрузки (рис. 4) снизу указано количество установок при строгом поддержании частоты 50 Гц, сверху – при допущении изменения частоты на  $\pm 1$  Гц. Видно, насколько сильно влияет это условие на количество агрегатов. Такое уменьшение используемых установок обуславливается тем, что благодаря снижению/повышению частоты в «сложные» часы получается более плавный график и уменьшается влияние ограничения на резкие набросы нагрузки.

#### V. ВЫВОДЫ

В статье проанализировано влияние изменения частоты на разные части изолированной энергосистемы (нагрузка, сетевое оборудование) и сделан вывод о том, что кратковременное снижение/повышение частоты не принесет ущерба оборудованию таких систем.

Противоречия ограничений ГПУ для отдельных периодов суток, выявленные в результате предшествующей работы (наложение ограничения работы с нагрузками ниже 40 %  $P_{ном}$  и ограничения на резкие сбросы/набросы нагрузки), возможно устранить путем снижения частоты на 1 Гц.

В дальнейшем планируется на примере реального графика нагрузки определить, в какой момент времени необходимо снижать частоту для более эффективного управления режимами работы станции малой мощности.

### Список литературы

- [1] Курапин А.В., Гостевская О.В. и Сторожаков С.Ю. Перспективы использования автономных источников энергоснабжения // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. 2014. № 3(12). С. 77–83. (Инновационная деятельность).
- [2] Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
- [3] Артемьев И.Б., Синельников А.М. Выбор генерирующего оборудования для объектов распределенной генерации // Турбины и дизели. 2015. Март-апрель. С. 10–13.
- [4] Тарасенко В.В. Оптимизация развития и функционирования системы энергоснабжения с распределённой генерацией: дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2012.
- [5] Клер А.М., Жарков П.В., Сушко С.Н. Особенности оптимизации состава оборудования и режимов работы локальных систем энергоснабжения // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10(105).
- [6] Петровская Т.К., Фролова Я.А., Филиппова Т.А. Создание методики выбора состава агрегатов станции с ГПУ в изолированно работающих энергосистемах // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 2. С. 62–70. URL: <http://energo-press.info/журнал-новое-в-российской-электроэне/аннотации-выпусков-в-2018-г/>
- [7] Сравнение газопоршневых и газотурбинных установок // Оборудование для котельных и энергоснабжения. URL: <https://gazovik-teplo.ru/cat/articles/sravenie/>
- [8] Chedid R., Saliba Y. Optimization and control of autonomous renewable energy systems // Energyresearch. 1996. Vol. 20. P. 609–624.
- [9] Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- [10] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электро- магнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартиформ, 2014.
- [11] Голиков С.П. Анализ работы асинхронного двигателя при пониженной частоте питающей сети. 1999.
- [12] Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем // Центр подготовки кадров РАО «ЕЭС России». СПб., 2001. С. 184–189.

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ТРН НА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ

Пронина О.А., Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Демидова А.С.  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»  
Нижний Новгород, Россия  
olgapronina11@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Создание активно-адаптивной сети и переход к распределенной генерации усложняет систему релейной защиты и автоматики, а также диспетчерское управление в сетях электроснабжения 6–20 кВ. Для решения этих задач необходимо внедрение новых интеллектуальных устройств автоматического управления режимом, таких как твердотельный регулятор напряжения (ТРН). Однако требуется проведение исследований и формирование принципов работы данного устройства в сетях с источниками распределенной генерации (ИРГ).

**Материалы и методы:** Использовались ПО PSCAD и метод контурных токов.

**Результаты:** Определены диапазоны регулирования транспортных потоков мощности в системах электроснабжения кольцевой конфигурации с источниками и устройствами регулирования потоков мощности типа ТРН.

**Выводы:** Предложена методика определения уставок ТРН на основе многократного имитационного моделирования режимов систем электроснабжения, при этом выявлены зависимости изменений потокораспределения в сети от амплитуды и угла фазы напряжения вольтодобавочного трансформатора ТРН.

**Ключевые слова:** регулирование потоков мощности, твердотельный регулятор напряжения, гексагональные распределительные сети, распределенная генерация.

# DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE PRINCIPLES OF REGULATION OF POWER FLOW IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH SSVR ON SIMULATION MODELS

O. Pronina, A. Loskutov, D. Zyrin, A. Demidova  
Nizhny Novgorod State Technical University  
N. Novgorod, Russian Federation  
olgapronina11@gmail.com

## Abstract

**Background:** The creation of an active-adaptive network and the transition to distributed generation complicates the system of relay protection and automation, as well as dispatching control in the 6–20 kV power supply networks. To solve these problems, it is necessary to introduce new intelligent automatic control devices, such as a solid-state voltage regulator (SSVR). However, it is necessary to conduct research and form the principles of this device in networks with distributed generation sources.

**Materials and methods:** The software PSCAD and the method of contour currents were used.

**Results:** The ranges of regulation of the transport of power flow in power systems ring configuration with sources and devices for regulating the flow of power of type SSVR have been determined.

**Conclusions:** The technique of determining the set points of SSVR on the basis of multiple simulation modes of power supply systems, wherein the identified according to changes of the power flows in the network of the amplitude and phase angle of the voltage transformer shunt-transformer of SSVR.

**Key words:** automatic power flow control, solid state voltage regulator, hexagonal distribution networks, distributed generation.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Тенденция развития распределенной генерации поддерживается во многих странах мира. Однако внедрение источников распределенной генерации (ИРГ) требует решения новых комплексных вопросов по обеспечению управляемости электрической сети с помощью развития новых систем автоматики.

Сегодня эра внедрения интеллектуальных устройств, которые направлены на измерение параметров режима сетей, защиту систем, сигнализацию, технический учет и мониторинг качества электроэнергии, а также управления потоками мощности и др. Силовые полупроводниковые элементы являются ключевыми компонентами в устройствах на основе технологий гибких электрических сетей Flexible

Alternating Current Transmission Systems (FACTS) (табл. I). Данные устройства рассчитаны для электропередач высокого и сверхвысокого напряжений, но сами технологии способны решать многие задачи в интеллектуальных сетях электроснабжения 6–20 кВ с ИРГ.

Таблица I – Основные типы FACTS устройств

Тип присоединения устройства к сети	Контролируемый параметр		
	$P$	$Q$	$P$ и $Q$
Шунтирующее соединение	–	SVC, STATCOM	–
Последовательное соединение	TSSC, TCSC, SSSC	–	–
Комбинированное шунтирующее и последовательное	TCPST, TCPAR	TCVR	UPFC, IPFC, ST

В странах Европы, в Америке и Канаде технология FACTS является решением крупных сетевых задач, таких как оптимальное перераспределение потоков мощности между параллельными линиями, увеличение их пропускной способности, обеспечение резервирования электроснабжения. Особенности российской объединенной энергосистемы, а также структура сетей электроснабжения затрудняют применение устройств FACTS на разных классах напряжения. Тем не менее возникающие проблемы в распределительных сетях среднего напряжения требуют создания и изменения новых интеллектуальных средств управления транспортными потоками мощности, при внедрении ИРГ, особенно при их параллельной работе.

Технология UPFC, на базе которой в НГТУ им. Р.Е. Алексеева разрабатывается твердотельный регулятор напряжения (ТРН) для сетей электроснабжения среднего напряжения, позволяет гибко управлять потокораспределением мощностей систем электроснабжения.

## II. ОБ УСТРОЙСТВЕ

Регулирование потоков мощности в сетях можно производить с помощью устройств на различной полупроводниковой базе. Перспективными являются устройства типа TCPST (фазоворотный трансформатор с тиристорным управлением), TCPAR (регулятор фазового угла с тиристорным управлением) и IPFC (устройство управления потоком мощности между линиями электропередачи) (табл. I). Однако ТРН, в основе которого лежит транзисторная элементная база, имеет ряд преимуществ в сравнении с остальными устройствами.

Принципиальная схема ТРН включает вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), предназначенный для комплексного регулирования потоков как активной, так и реактивной мощностей (рис. 1), а также звено выпрямителя и инвертора. Регулирование происходит благодаря изменениям амплитуды и угла поворота фазы напряжения сети путем добавления вольтодобавки.

Устройство позволяет оптимизировать распределение потоков мощности по параллельным линиям электропередач, снизить потери сети, увеличить пропускную способность линий, обеспечить эффективное использование мощности от источников распределенной генерации.

## III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для начального рассмотрения механизма регулирования потоков мощности были сформированы имитационные и математические модели сети с двумя источниками и нагрузкой (рис. 2), на которых отработаны основные принципы регулирования параметров режима.

Эти модели показательны, потому что любую сеть можно привести к эквиваленту линии с двумя источниками и нагрузкой. На основе расчетов токов и напряжений для различных значений вольтодобавки были сформированы имитационные модели в ПО PSCAD (рис. 3).

Значения активной и реактивной мощностей представлены в табл. II.

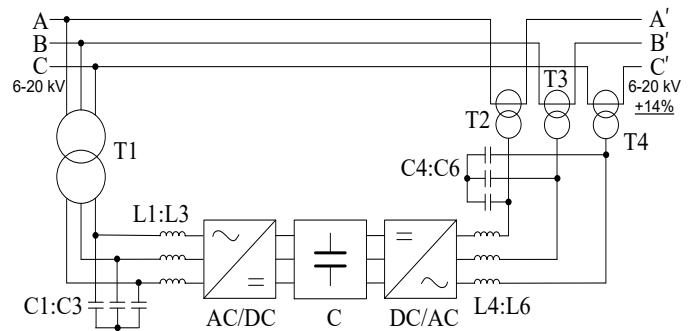


Рис. 1 – Принципиальная схема ТРН

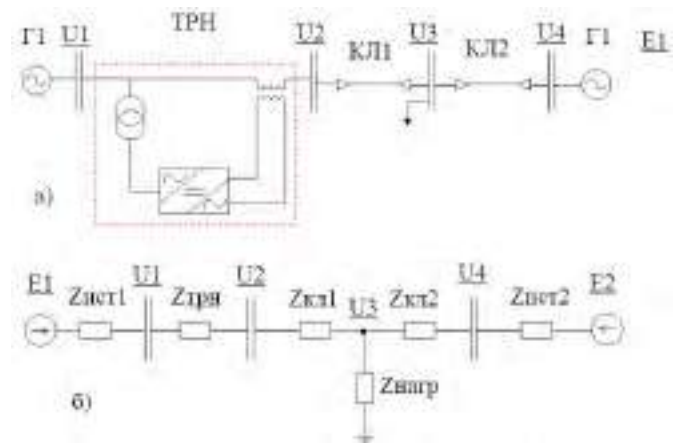


Рис. 2 – Схема с ТРН: а – электропередачи; б – замещения электропередачи



Рис. 3 – Имитационная модель

Таблица II – Значения распределения активной и реактивной мощности в линиях сети

Линии сети	Без ТРН		С ТРН	
	$P, MВт$	$Q, МВар$	$P, MВт$	$Q, МВар$
Линия 1	0,01551	0,03635	0,00367	0,008603
Линия 2	0,01551	0,03635	0,01469	0,03441
Нагрузка	0,03103	0,0727	0,01836	0,04302

При включении ТРН в линию мы видим изменение потокораспределения, происходит снижение активной и реактивной мощностей системы. Потоки активной мощности в линиях с ТРН и без ТРН отличаются, более чем

в пять раз, причем значения данных величин в линии с ТРН меньше, чем без ТРН. Этот эффект влияния устройства на распределение мощностей в сети можно использовать для регулирования потокораспределения или ограничения потока мощности того или иного источника при подключении ТРН непосредственно в линию к нему.

#### IV. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В МНОГОКОНТУРНЫХ СЕТЯХ

##### A. Выбор сети

Сегодня существуют особенности электроснабжения крупных городов и мегаполисов, среди которых: высокая плотность электрических нагрузок (выше 15–20 МВт/км<sup>2</sup> в центральных городских районах); рост количества потребителей, расположенных на ограниченной площади при дефиците нагрузок; высокая стоимость земли под застройку новых объектов электроснабжения ЭТК и сложность прокладки новых коммуникаций; растущие требования к надежности, категоричности электроснабжения городских потребителей, экологии и качеству электроэнергетики.

В качестве исследуемой многоконтурной сети была выбрана гексагональная распределительная сеть (ГРС). Преимуществами гексагональной топологии по сравнению с радиальными сетями, согласно [1], являются: равномерное распределение нагрузок, стабильность напряжения в узлах сети, формализованная топология, высокая живучесть сети при аварийных ситуациях, способность выравнивания графиков нагрузок различных источников.

Формализованная топологии сети, организация узла нагрузки позволяют формировать типовые подстанции с цифровым управлением, разрабатывать универсальные алгоритмы управления и функционирования в нормальных и аварийных режимах. Поэтому данный вид многоконтурной сети был выбран для дальнейшего исследования работы ТРН.

##### B. Исследование

Авторами была построена имитационная модель одного кольца ГРС с включением в линию ТРН (рис. 4). С помощью сопротивлений и индуктивностей были представлены кабельные линии 3×(АВВГ 1×300) длиной 5 км, питающий трансформатор ТДН 16000 кВА 110/10, вольтодобавочный трансформатор ТМ 1600 кВА 6/0,4, нагрузка, подключенная к шинам 10 кВ мощностью 3 МВА.

Изменения угла поворота фазы в диапазоне от 0 до 90 град. и амплитуды напряжения ТРН позволило нам увеличить значение активной и реактивной мощностей линий, наиболее приближенных к регулируемому устройству. В линиях, отдаленных от ТРН и находящихся вблизи источника, изменения мощностей незначительны, порядка 0,5 %.

Однако в распределительных сетях может стоять задача изменения потокораспределения не только в определенных линиях сети, в которые мы можем установить наше устройство, но и значительного изменения в отдаленных участках системы. Для этого был произведен анализ более сложной ГРС, состоящей из трех колец (рис. 5).

Установка трех ТРН позволяет добиться максимального перераспределения потоков мощности в отдаленных ветвях сети. Максимальное регулирование происходит в линии, где установлен ТРН, порядка 50 % (рис. 6). Это связано с тем, что сеть является протяженной, а мощность ТРН значительно меньше суммарной мощности источников. Если говорить про линии без ТРН, то максимальный диапазон регулирования 2 % достигается в линии равноудаленной от источников. Минимальное регулирование будет в линиях, наиболее приближенных к источникам и находящихся в одной цепи с ТРН.

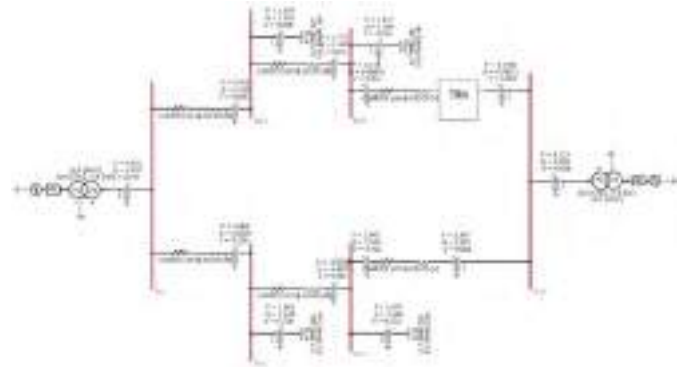


Рис. 4 – Имитационная модель кольцевой сети с ТРН

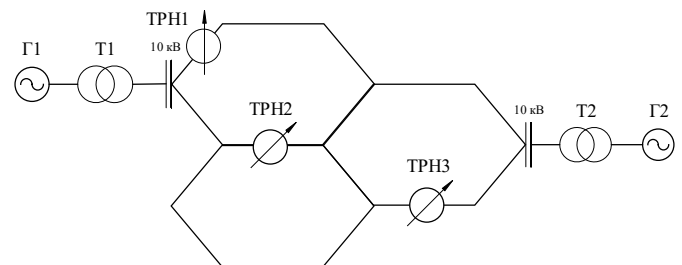
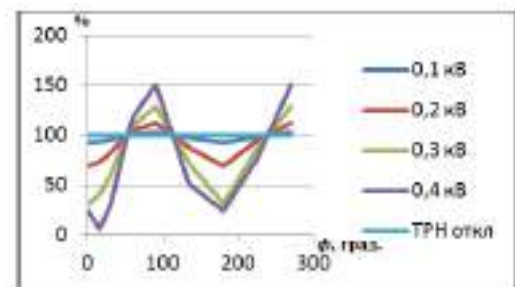
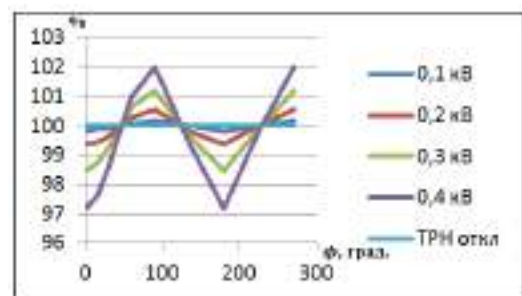


Рис. 5 – Схема многоконтурной сети с ТРН



а



б

Рис. 6 – Характерный график активной мощности линий: а – с ТРН; б – без ТРН

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение устройств регулирования потоков мощности типа ТРН в сетях с многоконтурной конфигурацией и несколькими источниками позволяет реализовывать гибкое потокораспределение. При этом имитационное моделирование позволяет выделить режимы, в которых можно достичь различного уровня регулирования для конкретного участка сети.

Сформирован ряд уставок величины амплитуды и фазы ВДТ ТРН. Максимальное регулирование достигается на участках сети (линия 1, 3 и 5), максимально приближенных к активному ТРН на 30–50 %. Наименьшее изменение потоков мощности происходит на участке сети у источника на 1,5 % (линия 4).

## Список литературы

- [1] Современные подходы к построению систем энергоснабжения мегаполисов / А.Б. Лоскутов [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф: в 2 т. Иваново, 2017. Т. 1. С. 39–48.
- [2] Моделирование режимов работы распределительной сети с различными источниками распределенной генерации / А.Б. Лоскутов [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. 2017. С. 128–131.
- [3] Гибкие распределительные сети с адаптивными алгоритмами – решение интеллектуализации городских сетей / А.Б. Лоскутов [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2014. № 2(104). С. 173–178.
- [4] Real-time implementation of intelligent reconfiguration algorithm for micro-grid / F. Shariatzadeh [et al.] // IEEE Trans. Sustainable Energy. 2014. Vol. 5. № 2. P. 598–607.
- [5] Z. Li. Global Energy Interconnection. 1 ed. Academic Press, 2015. 396 p.
- [6] The Parameter's and Configuration's Controlling of a 6-20 kV Distribution Network / A.B. Loskutov [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, № 23. P. 13868–13873.
- [7] Intelligent methods for reconfiguration of terrestrial and shipboard power systems / Q. Yu [et al.] // Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008. P. 1.

# СЦЕНАРИЙ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ СТРАН ЕАЭС В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ ОБЩЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЫНКА

Русецкая М.И., Чиж Е.П.  
БНТУ «Белорусский национальный технический университет»  
Минск, Беларусь  
mari.rusetskaya.1@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На данный момент механизмы международных экономических отношений проходят через необратимые изменения. Происходит деление экономик стран и образование альянсов по региональным признакам и качеству жизни. На территориях таких стран, как Республика Беларусь, Российская Федерация, Республика Армения, Республика Казахстан, Республика Кыргызстан 1 января 2015 г. был создан Евразийский Экономический Союз (ЕАЭС), на базе которого принимаются попытки по созданию единого рынка. В рамках ЕАЭС планируется создать общий энергетический рынок, что будет способствовать развитию энергетики во всех странах участниках.

**Материалы и методы:** Теоретическая и методологическая базы исследования проводилось на основе применения абстрактно-логического, сравнительного, аналитического, монографического, экономико-статистического методов.

**Результаты:** Выделены преимущества создания ЕАЭС, а также перспективы развития данного союза. Рассмотрен потенциал создания общего электроэнергетического рынка в рамках ЕАЭС.

**Выводы:** Благодаря введению общего электроэнергетического рынка в перспективе произойдет повышение конкурентоспособности продукции, усилится энергетическая безопасность и энергетическая независимость стран за счет повышения энергоэффективности производства, в том числе использования возобновляемых источников энергии, упрощения систем передачи электроэнергии не только в Республике Беларусь и Российской Федерации, так и в других странах-участниках.

**Ключевые слова:** Евразийский Экономический Союз, Общий энергетический рынок, топливно-энергетический комплекс, тариф, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность.

## THE SCENARIO OF ENERGY DEVELOPMENT OF THE EURASIAN ECONOMIC UNION IN CONDITIONS OF CREATION OF GENERAL ENERGY MARKET

M. Rusetskaya, K. Chyzh  
Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus  
mari.rusetskaya.1@mail.ru

## Abstract

**Background:** At the moment, the mechanisms of international economic relations are going through irreversible changes. There is a division of the economies of countries and the formation of alliances on regional characteristics and quality of life. On January 1, 2015, the Eurasian Economic Union (EAEU) was established on the territories of such countries as the Republic of Belarus, the Russian Federation, the Republic of Armenia, the Republic of Kazakhstan, the Republic of Kyrgyzstan, on the basis of which attempts to create a single market are being made. Within EEU it is planned to create the common energy market that will contribute to the development of power in all countries participants.

**Materials and methods:** The theoretical and methodological base of the research was based on the application of abstract-logical, comparative, analytical, monographic, economic and statistical methods.

**Results:** The advantages of creating the EAEU and the prospects of development of this Union are highlighted. The potential of creating a common electric power market within the EAEU is considered.

**Conclusions:** Thanks to introduction of the common electrical power market, increase in competitiveness of production in the long term will happen, the energy security and power independence of the countries due to increase in energy efficiency of production, including use of renewables, simplification of systems of power transmission not only in Republic of Belarus and the Russian Federation, and in other member countries will amplify.

**Key words:** Eurasian Economic Union, Common energy market, fuel and energy complex, tariff, renewable, energy efficiency.



## I. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития мировой экономики сложившиеся в конце XX – начале XXI столетия механизмы международных экономических отношений проходят через необратимые изменения. Продолжается процесс глобализации, характеризующийся развитием и усложнением мировой экономики, ужесточением конкуренции на мировых рынках сырья, товаров и услуг, ускоряется научно-технический прогресс и колоссальными темпами развивается информационное общество. Региональные интеграционные объединения различаются по уровню и качеству сопряжения экономик стран-участников, по устройству интеграционных институтов и механизму их работы, количеству государств-членов, социокультурным признакам и т. д.

Крупнейшими интеграционными центрами в современных МЭО являются Европейский Союз – 27 стран, НАФТА – США, Канада и Мексика, форум АТЭС – включая АСЕАН, а также МЕРКОСУР в Южной Америке, и Евразийский экономический союз России, Беларуси, Казахстана, Армении и Кыргызстана.

Евразийский экономический союз (ЕАЭС), созданный 1 января 2015 г., является прототипом объединения, целью которого является создание общего рынка между такими странами, как Российская Федерация (РФ), Республика Беларусь (РБ), Республика Казахстан, Республика Армения, Республика Кыргызстан. К настоящему времени на долю Евразийского Экономического Союза приходится не менее 4 % мирового ВВП, равно как и около 4 % мирового промышленного производства. На территории стран ЕАЭС проживает около 200 млн человек, то есть 5,5 % мирового населения. На основе ЕАЭС планируется создать общий энергетический рынок (ОЭР).

Целью развития энергетической отрасли в долгосрочной перспективе является повышение эффективности использования энергоресурсов для содействия росту экономики и качества жизни населения, а также укреплению внешнеэкономических связей.

Данный рынок будет базироваться на электроэнергетических системах, работающих параллельно (рис. 1).

ОЭР будет характеризоваться едиными техническими нормами и правилами, причем будет произведено согласование балансов энергоресурсов (табл. I).

Концепция формирования общего рынка электроэнергии была разработана и принята Евразийской экономической комиссией еще в 2014 году. При ее разработке был учтен зарубежный опыт работы общих рынков электроэнергии, а также особенности энергетических секторов стран ЕАЭС.

Важно отметить, что потенциал для развития общего рынка электроэнергии достаточно высок, поскольку в настоящее время возможности межстранового трансфера электроэнергии используются лишь на 20 %, а потенциальные генерирующие мощности всех государств ЕАЭС – не более чем на 50%.

Формирование общего энергетического рынка ЕАЭС разделено на три этапа. На первом этапе предполагается создание общего рынка электроэнергии в 2019 г. Объединение рынков планируется окончательно произвести до 2025 г. Рассматривая интеграцию энергетических рынков на примере следующих стран: Республики Беларусь и Российской Федерации.

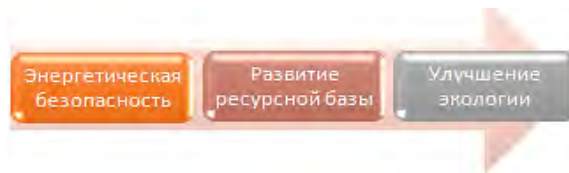


Рис. 1 – План развития

Таблица I – Сравнительная характеристика энергопроизводства и энергопотребления стран ЕАЭС

Показатель	Республика Беларусь	Российская Федерация	Республика Казахстан	Республика Кыргызстан	Республика Армения
Площадь, км <sup>2</sup>	207 595	17 100 000	2 725 000	199 900	29 743
Численность населения, млн. чел на 2016 г.	9,507	144,3	17,8	6,083	2,925
Установленная мощность, ГВт	240,3	10,2	20,8	3,8	4,2
Производство электроэнергии, млрд кВт·ч	33,6	1 071,8	93,9	18,8	8,3
Импорт, млрд кВт·ч	3,1	7,0	1,8	0,4	0,2
Потребление, млрд кВт·ч	36,6	1 054,5	92,1	14,7	6,8
Протяженность линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше, тыс. км	6,9	135,7	23,4	2,3	1,5
Доля ВИЭ, %	0,7	≈1	1,08	≈1	34

Для введения общего энергетического рынка в рамках ЕАЭС необходимо произвести изменения в следующих направлениях:

1. Гармонизация нормативно-правовой базы функционирования ОЭР.

При формировании ОЭР для Республики Беларусь важно произвести поэтапную трансформацию структуры управления национальной вертикально интегрированной модели в сфере электроэнергетики для того, чтобы выделить конкурентные и монопольные виды деятельности, т. е. необходимо доработать и принять закон «Об электроэнергетике». Его рассмотрение планируется в ближайшей перспективе. В рамках создания общего электроэнергетического рынка ЕАЭС необходимо будет синхронизировать все подходы в энергетике. В этой связи Республике Беларусь необходимо реформирование существующей модели управления в двухуровневый электроэнергетический рынок (оптовый и розничный). Первым делом необходимо разделить производство электроэнергии на конкурентные и монопольные виды деятельности, создать соответствующие структуры оптового и розничного рынка и в целом новую систему управления энергетической отраслью страны.

При функционировании двухуровневого электроэнергетического рынка (оптовый и розничный) планируется, что будут работать субъекты электроэнергетики – производители электроэнергии, системно-сетевой оператор, управляющая организация с функциями оператора оптового и розничного электроэнергетических рынков, энергоснабжающие организации. Разделение субъектов позволяет создать прозрачные условия для развития конкуренции среди производителей и последовательно двигаться по пути совершенствования отношений в области электроэнергетики.

Основными принципами и требованиями функционирования электроэнергетического рынка являются:

- образование субъектов электроэнергетики;
- недискриминационный доступ на электроэнергетический рынок Республики Беларусь субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии;
- взаимодействие субъектов оптового и розничного электроэнергетических рынков с соблюдением договорных обязательств, в том числе финансовых;
- обеспечение надежности (бесперебойности) электроснабжения;
- сочетание нерегулируемых и регулируемых цен (тарифов) на товары (услуги) в сфере электроэнергетики;
- обеспечение открытости для потребителей электрической энергии информации по регулированию цен (тарифов) на товары (услуги) в сфере электроэнергетики;
- регулирование тарифов на услуги естественных монополий в сфере электроэнергетики;
- коммерческий учет электрической энергии.

Розничный электроэнергетический рынок позволит продавать электроэнергию производителям, которые не входят в систему объединенной энергетической системы Республики Беларусь.

## 2. Потенциал топливно-энергетических ресурсов.

Россия имеет достаточные запасы энергетических ресурсов в отличие от Республики Беларусь, которая вынуждена производить закупку (рис. 2).

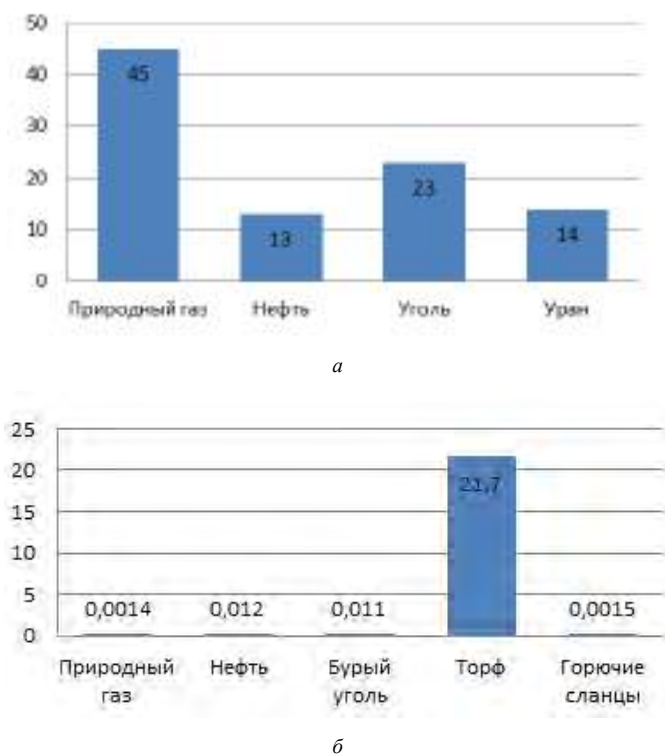


Рис. 2 – Доля топливно-энергетических ресурсов Российской Федерации (а) и Республики Беларусь (б) в мире, %



Рис. 3 – Тарифы на электроэнергию для потребителей в РБ и РФ в 2016 г. (цент США(КВт·ч))

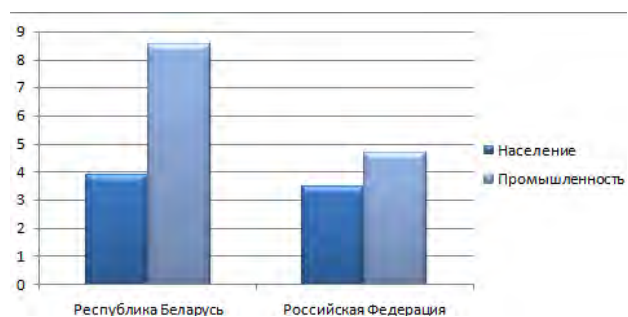


Рис. 4 – Тарифы на электроэнергию для потребителей в РБ и РФ на 2020 г. (цент США(КВт·ч))

Особое внимание следует уделить закупке газа, а именно созданию единого рынка газа, так как энергетический комплекс Республики Беларусь в качестве сырья использует 95 % газа, цена которого выше, чем у стран-соседей, в том числе и России. В данном случае это может снизить конкурентоспособность электроэнергии производимой в Республике Беларусь. Следовательно, без создания единого рынка газа в интеграционном объединении невозможно создать конкурентный рынок электроэнергии.

## 3. Тарифная политика.

При создании ОЭР будет произведено повышение эффективности использования генерирующих и передающих мощностей, будет увеличен рост объемов взаимной и внешней торговли электроэнергией. Благодаря этому цены на электроэнергию могут быть снижены. Предполагается, что для Беларуси единый рынок с Россией может снизить тарифы на электроэнергию в республике на 25 % (рис. 3, 4).

## 4. Потенциал развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Ввод ВИЭ является приоритетным для всех стран ЕЭАС. На данный момент в России до 2024 г. планируется ввести солнечные и ветровые электростанции общей мощностью 1600 и 3600 МВт, соответственно, а в РБ планируют повысить долю ВИЭ к 2020 г. до 6 %.

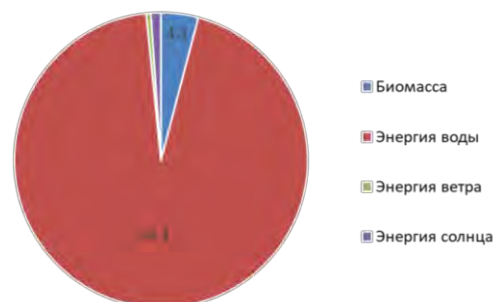


Рис. 5 – Баланс ВИЭ в ЕЭАС в 2017 г.

Положительным фактором распространения ВИЭ для стран ЕАЭС является создание новых рабочих мест и отраслей промышленности, развитие соответствующих технологий и сопутствующих производств.

Благодаря введению ОЭР произойдет повышение конкурентоспособности, усилится энергетическая безопасность и энергетическая независимость за счет повышения энергоэффективности, в том числе использования возобновляемых источников энергии, упрощения систем передачи электроэнергии не только в Республике Беларусь и Российской Федерации, но и в других странах-участницах.

### Список литературы

- [1] Успехи и проблемы ЕАЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnik.by/politics/20180125/1033247017/uspekhi-i-problemy-eaehs-obsudili-v-minske.html> (дата обращения: 17.04.2018).
- [2] Энергетики сравнили тарифы на электроэнергию в Беларуси и еще 8 странах. URL: <https://finance.tut.by/news568331.html> (дата обращения: 17.04.2018).
- [3] Топливо-энергетические ресурсы [Электронный ресурс]. URL: [http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/operativnye-dannye\\_3/toplivno-energeticheskie-resursy/index.php?sphrase\\_id=156413](http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/operativnye-dannye_3/toplivno-energeticheskie-resursy/index.php?sphrase_id=156413) (дата обращения: 15.07.2018).
- [4] Общий электроэнергетический рынок Евразийского союза: взгляд из Беларуси [Электронный ресурс]. URL: <http://eurasia.expert/obshchiy-elektroenergeticheskiy-rynok-evraziyskogo-soyuza-vzglyad-iz-belarusi/> (дата обращения: 17.06.2018).
- [5] Русецкая М.И., Стасула Я.А. Приоритетные направления развития энергетики Республики Беларусь // Сб. матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. 2018. 455 с.
- [5] Проект Закона «Об Электроэнергетике» [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/proekti> (дата обращения: 15.07.2018).
- [6] Развитие использования возобновляемых источников энергии в государствах-участниках СНГ. Содружество независимых государств Исполнительный комитет. М., 2013. 19 с.

---

© IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2018»

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКЕ

Салахутдинова В.З., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.  
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»  
Казань, Россия  
venera514@inbox.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Инвестиционная деятельность фирмы выступает управленческим видом деятельности, которая связана с состоянием предприятия в перспективе, требует корректных прогнозов, а, следовательно, является сложным и трудоемким процессом. Инвестиции представляют собой применение финансовых ресурсов в виде капиталовложений на длительный срок. Организация инвестиционной деятельности – длительный во времени процесс. Исходя из этого, фирма выстраивает свою индивидуальную инвестиционную политику с целью рационального использования финансовых ресурсов. Политика, в свою очередь, представляет собой свод правил для действий и утверждения решений, который способствует достижению целей предприятия.

**Материалы и методы:** Использовались критерии выбора инвестиционных проектов.

**Результаты:** Формирование инвестиционной составляющей предприятия в современной экономике находится под воздействием внешних и внутренних факторов. Для создания стабильного роста инвестиционной привлекательности нужна динамичная деятельность организации и соответствующих органов управления по всевозможным направлениям деятельности.

**Выводы:** Становление предприятия невозможно без инвестиционной деятельности. Грамотное управление инвестиционной деятельностью способствует достижению результатов фирмы, т. е. достижения поставленных целей с минимальными инвестиционными затратами. Любая деятельность заключается в необходимости соответствующих инвестиций или финансовых вложений в программы дальнейшего развития. Утверждение такого рода решений является наиболее сложной функцией управленческой деятельности, поскольку объем необходимых инвестиций достаточно велик и возможны материальные потери при реализации инвестиционных программ.

**Ключевые слова:** инвестиции, финансовые ресурсы, прогнозирование, политика предприятия, экономический рост.

## PROBLEMS OF MANAGEMENT OF INVESTMENT ACTIVITIES OF THE ENTERPRISE IN THE PRESENT ECONOMY

V. Salakhutdinova, N. Yudina, S. Livshits, T. Dunaeva  
Kazan State Energy University  
Kazan, Russian Federation  
venera514@inbox.ru

## Abstract

**Background:** The investment activity of the firm is a managerial activity that is related to the state of the enterprise in the future, which requires a correct forecast, and, therefore, is a complex and time-consuming process. Investments are the application of financial resources in the form of capital investments for a long period. The organization of investment activities is a time-consuming process. Proceeding from this, the company builds its individual investment policy with the aim of rational use of financial resources. Policy, in turn, is a set of rules for action and approval of decisions that contributes to the achievement of the objectives of the enterprise.

**Materials and methods:** Criteria for choosing investment projects were used.

**Results:** The formation of the investment component of the enterprise in the modern economy is influenced by external and internal factors. To create a stable growth of investment attractiveness, the dynamic activity of the organization and the relevant management bodies in all kinds of activities is needed.

**Conclusions:** The formation of an enterprise is impossible without investment activity. Competent management of investment activities contributes to the achievement of the firm's results, that is, to achieve the set goals with minimal investment costs. Any activity consists in the need for appropriate investments or financial investments in programs for further development. Approval of this type of decision is the most difficult function of management activity, since the amount of necessary investment is large enough and material losses are possible while implementing investment programs.

**Key words:** investments, financial resources, forecasting, enterprise policy, economic growth.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа отражает значимость стабильного экономического роста в сложившихся современных условиях развития российской экономики. Определяющее значение для решения такого рода задачи имеют инвестиции.

В настоящее время растет потребность в научно-методических материалах и практических рекомендациях по построению инвестиционной деятельности предприятий в условиях ограниченности финансовых средств [2].

Анализ проводимой инвестиционной работы предприятия актуален и способствует обеспечению эффективности и продуктивности деятельности предприятия, за счет увеличения его показателей конкурентоспособности на местном и национальном рынке.

Каждая фирма в процессе работы сталкивается с необходимостью привлечения ресурсов для своего последующего становления. Конкретика в ведении политики инвестиционной деятельности фирмы приводит к ее продуктивному росту.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При принятии управленческих решений в данном вопросе возникают следующие сложности:

1. Риск, связанный с принятием тех или иных решений по инвестированию.
2. Ограниченность финансовых ресурсов, которые доступны для инвестирования.
3. Множественность доступных проектов.

Структура инвестиций по главным направлениям совершенствования зависит от стадий, на которых находится организация. На начальном этапе инвестиции направляются на создание объекта. В случае заинтересованности рынка в данном продукте, инвестиции обращаются на расширение производства. По мере роста износа основных фондов возникает потребность в их техническом перевооружении. При замене имеющихся производственных мощностей решение может быть согласовано достаточно легко, поскольку руководство организации четко представляет, в каком размере и с какими характеристиками требуются новые основные средства. Если речь идет об инвестициях, связанных с расширением основной деятельности, задача усложняется [1].

Довольно часто решения принимаются, когда существуют альтернативные или взаимно независимые проекты. Тогда следует сделать выбор одного или нескольких проектов, опираясь на следующие критерии:

- 1) краткость срока окупаемости затрат;
- 2) отсутствие более выгодных альтернатив;
- 3) высокая рентабельность с учетом дисконтирования;
- 4) минимизация риска потерь от инфляции;
- 5) небольшая по отношению к стоимости инвестиционного портфеля сумма инвестиций.

Риск выступает неотъемлемой частью инвестиционной деятельности, так как высшая степень неопределенности в получении прогнозируемых результатов является воплощением инвестиционных программ. Например, неплатежеспособность в значительной мере связана с невыполнением договорных обязательств и со снижением уровня ликвидности оборотных средств.

Несбалансированность потоков собственного и заемного инвестированного капитала, а также потока поступлений и выплат по инвестиционному проекту означает наличие риска финансовой неустойчивости организации [4].

В случае несвоевременного поступления инвестиционных ресурсов из самостоятельных источников высока опасность недофинансирования, связанная с ростом цены на капитал, необходимого для реализации данного проекта, что ведет к риску финансового обеспечения проекта.

Соотношение между собственными и заемными инвестициями формирует показатель финансовой устойчивости. Ключевая задача – сокращение расходов, которые связаны с инвестированием. Устойчивое финансовое состояние гарантировано в случае, если предприятие эффективно функционирует, способно при незначительном изменении внешних или внутренних факторов сохранять баланс между значениями активов и пассивов.

В современных условиях налоговый риск оказывает значительное воздействие на инвестиционные процессы ввиду непредсказуемости налоговой политики.

Возможность обесценения прогнозируемых доходов от выбранного инвестиционного проекта и ростом капитальных затрат в номинальном исчислении вызывает такой вид риска, как инфляционный. В современной экономике инфляционный риск носит постоянный характер и может быть отнесен к большинству операций, связанных с реализацией проекта.

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ результативности инвестиций дает предприятию возможность свободного выбора такого варианта распределения расходов в пространстве и времени, который в последующем может дать наибольшую прибыль или доход на вложенный им капитал [3]. Таким образом, при реализации инвестиционной деятельности следует комплексно анализировать проблему управления инвестиционным процессом. Сотрудникам следует проводить более детальное изучение инвестиционных проектов, исследовать внешние и внутренние риски при принятии инвестиционных решений.

### Список литературы

- [1] Абушахманова Ю.В. Экономический кризис: эволюция, действительность, прогнозы // Молодой ученый. 2014. № 4. 446 с.
- [2] Бердникова Л.Ф., Бердников А.А. Стратегический анализ финансового состояния организации: сущность и методика // Карельский научный журнал. 2014. № 3. С. 43–45.
- [3] Водопьянова Д.В., Уродовских В.Н. Аналитический обзор методов прогнозирования вероятности банкротства предприятий // Концепт. 2015. № 11. С. 6.
- [4] Шульгина Л.В., Глеков П.А. Принцип устойчивого развития предприятий в условиях финансового кризиса: уточнение понятий // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2012. № 10. С. 5–9.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Сангов Х.С.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия.  
khushdil.sangov@mail.ru.

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Ежегодный рост тарифов на электроэнергию и снижение надёжности электроснабжения, вызванное физическим износом электрических сетей, заставляет отдаленных и труднодоступных потребителей развивать собственное энергетическое хозяйство на основе источников возобновляемой энергетики. При этом в предлагаемой статье рассматривается несколько способов организации электроснабжения отдаленных потребителей за счёт установки гибридных ветроэнергетических установок (ВЭУ) с накопителем электроэнергии. Целью исследования является проектирование систем электроснабжения на базе ВЭУ с учётом местных требований по организации электроснабжения автономных потребителей.

**Материалы и методы:** Для реализации функциональных схем была использована программа КОМПАС-3D. Затем были проведены анализ и сравнительная оценка различных структурных схем энергоснабжения автономных потребителей от ВЭУ малой мощности с точки зрения надёжности и бесперебойности.

**Результаты:** В результате проведенной работы доказано, что наиболее эффективной с точки зрения безопасности электроснабжения в условиях автономии является эксплуатация систем гарантированного электроснабжения, которые базируются на нескольких ВЭУ малых мощностей.

**Выводы:** Воплощение схемных решений энергоснабжения частных потребителей и малых производственных предприятий позволит разрешить дефицит электроэнергии и мощности малых отдаленных поселений, поспособствует развитию сельского хозяйства и частного предпринимательства, повысит уровень саморегулирования и независимости конечного потребителя.

**Ключевые слова:** электроснабжение, ветроэнергетическая установка, автономные потребители, надёжность, бесперебойность.

## DESIGNING POWER SUPPLY OF SYSTEMS ON THE BASIS OF WIND TURBINES

K. Sangov

National Research University "MPEI"  
Moscow, Russia.  
khushdil.sangov@mail.ru

## Abstract

**Background:** The annual increase in electricity tariffs and the reduction of the reliability of electricity supply, caused by the physical wear and tear of electrical networks, forces remote and hard-to-reach consumers to develop their own energy economy based on renewable energy sources. At the same time, the proposed paper considers several ways to organize power supply for autonomous consumers by installing hybrid wind turbine with an energy storage. The purpose of the investigation is to design power supply systems based on the wind turbine, taking into account local requirements for the organization of power supply for autonomous consumers.

**Materials and methods:** For implementation the functional schemes, the KOMPAS-3D program was used. Then, an analysis and a comparative evaluation of various structural schemes of power supply of autonomous consumers from low-powered wind turbines was conducted in terms of reliability and continuity.

**Results:** As a result of this paper carried out, it has been proved that the most effective from the point of view of uninterrupted power supply in conditions of autonomy is the operation of guaranteed power supply systems, which are based on several wind turbine with small capacities.

**Conclusion:** The implementation of circuit solutions for power supply to private consumers and small manufacturing enterprises will allow to solve the shortage of electricity and capacity of small remote settlements, promote the development of agriculture and private entrepreneurship, increase the level of self-regulation and independence of the final consumer.

**Key words:** electrical power supply, wind turbine, autonomous consumers, reliability, continuity.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема надёжного и качественного электроснабжения удалённых, малонаселённых и труднодоступных регионов остается острой в социальном, техническом и экономическом аспектах. Электрообеспечение таких потребителей в ряде случаев может быть осуществлено либо за счёт централизованного электроснабжения, либо путём создания автономных систем электроснабжения с использованием ресурсов возобновляемой энергетики [1]. Однако электроснабжение отдалённых от централизованной сети потребителей в условиях больших расстояний до горных и высокогорных территорий при помощи ЛЭП является экономически неэффективным. Кроме того, электрификация удалённых населённых пунктов от централизованных электрических сетей не обеспечивает необходимого качества электроэнергии (соответственно ГОСТ 32144-2013), основными показателями которого являются: отрицательное  $\delta U_{(-)}$  и положительное  $\delta U_{(+)}$  отклонения напряжения; коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ; суммарный коэффициент гармонической составляющей напряжения  $K_U$ ; коэффициент несимметрии напряжения по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательности; кратковременная  $P_{st}$  и длительная  $P_{lt}$  доза фликера, длительность провала  $\Delta t_n$  и прерывание  $\Delta t_{пр}$  напряжения и т. п. В этом случае возобновляемые источники энергии (ВИЭ) могут являться единственно возможным источником получения электроэнергии, либо резервным источником. При этом менее капиталоемким направлением является ветроэнергетика [2]. Для электроснабжения удалённых потребителей актуальными являются ветроэнергетические установки малой мощности (до 100 кВт) [3]. Рассмотрим принципиально возможные варианты схем электроснабжения на основе ВЭУ малой и средней мощности.

## II. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭНЕГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ ВЭУ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Основной целью при осуществлении энергоснабжения как поселения в целом, так и каждой семьи в частности, является обеспечение их развития в условиях изолированной работы от централизованной сети электроснабжения, поэтому возможны два подхода в обеспечении энергетической безопасности удалённых поселений [4–6]:

### 1. Автономная работа ВЭУ и ВЭС.

#### 1.1. Энергоснабжение одного частного дома (семьи) от ВЭУ.

В функциональной схеме, представленной на рис. 1, к шине общего присоединения (ШОП) постоянного тока подключены ветроэнергетическая установка (ВЭУ) и резервный источник – аккумуляторная батарея (АБ). ВЭУ выполнена на асинхронном генераторе (АГ) с ёмкостным возбуждением (БВ и БК – соответственно блоки конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности нагрузки). Автономный инвертор (АИ) обеспечивает потребителей электроэнергией переменного тока промышленной частоты.

Для ВЭУ малой мощности (до 5 кВт) электроэнергия, вырабатываемая ветроагрегатом в виде переменного тока, после выпрямления через двунаправленный конвертер

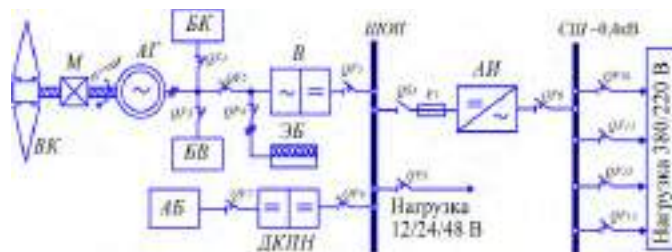


Рис. 1 – Функциональная электрическая схема энергоснабжения частного дома: ВК – ветроколесо; М – мультипликатор; В – выпрямитель; ЭБ – электробойлер; QF – автоматический выключатель; QS – рубильник; F – предохранитель

постоянного напряжения (ДКПН) поступает в аккумуляторную батарею. Функция регулировки заряда аккумуляторной батареи возлагается на блок автоматики. Подключение теплонагревательных элементов (электробойлера) осуществляется, если аккумуляторная батарея полностью заряжена. При этом тепловая энергия может аккумулироваться в виде горячей воды внутри помещений. Электрические нагрузки подключаются как на постоянном токе 12/24 или 48 В, так и на переменном токе 380/220В, 50 Гц через инвертор.

### 1.2. Энергоснабжение несколько домовладений и малых производственных предприятий с возможностью секционирования нагрузки.

На рис. 2 представлена функциональная схема автономной ВЭУ средней мощности от 5 до 100 кВт. В этой схеме АГ ветроэнергетической установки является источником напряжения переменного тока повышенной частоты. Блок автоматического регулирования напряжения (АРН) выполняет функцию стабилизации напряжения и частоты на выводах генератора в онлайн режиме при изменении нагрузки [7]. Для средних мощностей в составе автономных ВЭУ необходим резервный дизель-генератор. При этом обычно не предусматривается параллельная работа асинхронного генератора ветроагрегата и синхронного генератора дизельного агрегата. Параллельную работу можно осуществлять с помощью довольно сложной системы автоматического управления, которая существенно удорожает весь энергокомплекс и поэтому применяется на больших мощностях.

В энергокомплексе автономного электроснабжения, схема которого представлена на рис. 2, работа резервного дизель генератора предусматривается на периоде штиля и энергетических затиший, когда скорость ветра ниже начальной скорости работы ветроагрегата. В этот период ветроагрегат принудительно отключается от нагрузки

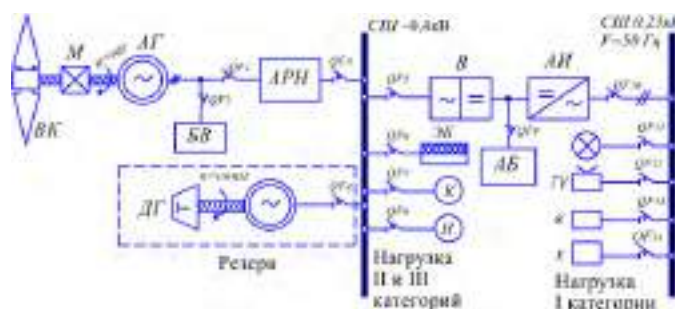


Рис. 2 – Функциональная схема автономной ВЭУ средней мощности 5–100 кВт: ДГ – дизель-генератор; К – компрессор; Н – насос; TV – телевизор; К – компьютер; Х – холодильник

и к нагрузке подключается дизель-генератор. В этой схеме также предусмотрено секционирование нагрузок по категориям. Технологические нагрузки второй и третьей категорий могут работать с перерывами, а электропитание нагрузок первой категории осуществляется по буферной схеме с аккумуляторной батареей и инвертором.

### 1.3. Энергоснабжение нескольких домовладений (семей).

Функциональная электрическая схема, представленная на рис. 3, необходима при электроснабжении группы домов. Для удовлетворения энергетических потребностей используется ВЭС малой мощности (до 50 кВт). Особенностью схемы является наличие общих выпрямителя, инвертора и группы аккумуляторных батарей, что позволяет удешевить схему электроснабжения. Для параллельной работы рекомендуется выбрать ВЭУ равной мощности, в противном случае нагрузка должна распределяться пропорционально мощностям ВЭУ, входящим в ВЭС.

### 2. Параллельная работа ВЭУ (ВЭС) с энергосистемой большой мощности.

#### 2.1. Энергоснабжение одного частного дома.

Функциональная схема энергоснабжения одной семьи при параллельной работе ВЭУ (ВЭС) с энергосистемой большой мощности представлена на рис. 4. Отличием данной схемы от схемы, представленной на рис. 1, является наличие устройства автоматического ввода резерва, при этом в качестве такового может выступать как централизованная электрическая сеть, так и ВЭУ. Последний вариант необходим в том случае, если качество электроэнергии не соответствует ГОСТ 32144-2013 или подача электроэнергии по тем или иным причинам прекращена.

Если в качестве резерва используется централизованная сеть электроснабжения, то при его вводе питание от ВЭУ прекращается, когда уровень заряда аккумуляторной батареи становится ниже контрольного значения (20 %), и питание от ВЭУ возобновляется, когда уровень заряда батареи достигает или превышает 50 %. Излишки электроэнергии при полном заряде аккумуляторной батареи утилизируются благодаря балластной нагрузке.

#### 2.2. Электроснабжение группы домовладений (семей).

Функциональная схема энергоснабжения нескольких семей представлена на рис. 5. Каждая из ВЭУ, работающих параллельно, подключается сетевыми выпрямителем и инвертором. Синхронизация с сетью ветрогенераторов осуществляется автоматически с помощью блока автоматики. На стороне низкого напряжения трансформатора устанавливается двусторонний счётчик электроэнергии для определения электропотребления из централизованной сети электроснабжения за вычетом количества электроэнергии, производимой посредством ВЭС.

В составе маломощных ВЭУ, из-за невозможности поддержания синхронной скорости вращения, эффективным считается применения только асинхронных генераторов, которые напрямую подключаются к сети. От правильного выбора конденсаторных батарей для ВЭУ на базе АГ зависят потери в сети и возможность поддержания величины напряжения на необходимом уровне.

### 2.3. Комбинированные ветро-солнечные системы электроснабжения нескольких домовладений (семей).

В большинстве случаев приход солнечной радиации и наличие ветра не всегда бывают одновременно, они находятся в противофазе. В зимнее время скорость ветра достаточно велика, а летом среднемесячное значение солнечного излучения в ясный день максимально. Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения частного домовладения, уменьшения необходимой мощности ветроагрегата, солнечной батареи и ёмкости аккумуляторной батареи, улучшения режимов работы автономной системы целесообразно использование комбинированной ветро-солнечной системы электроснабжения автономных потребителей.

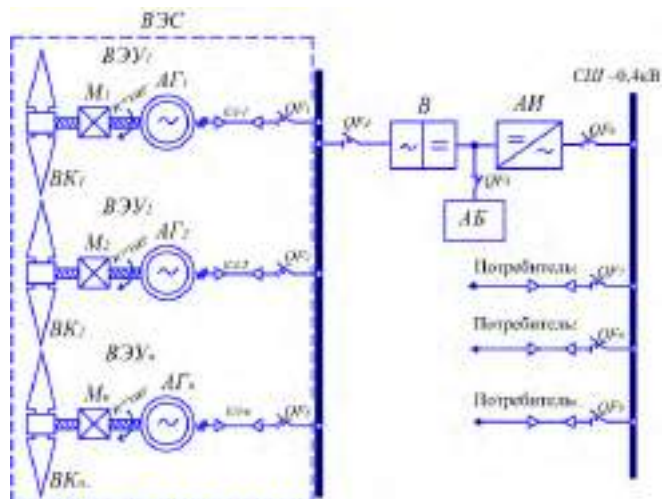


Рис. 3 – Функциональная электрическая схема энергоснабжения нескольких частных домовладений: СИУ – сборные шины

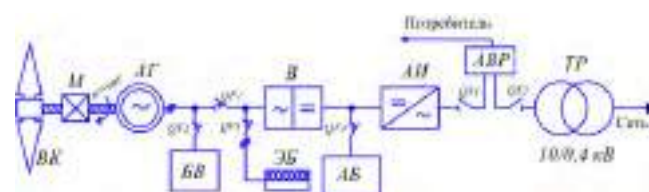


Рис. 4 – Функциональная электрическая схема энергоснабжения частного дома: АВР – автоматический ввод резерва; ТР – трансформатор

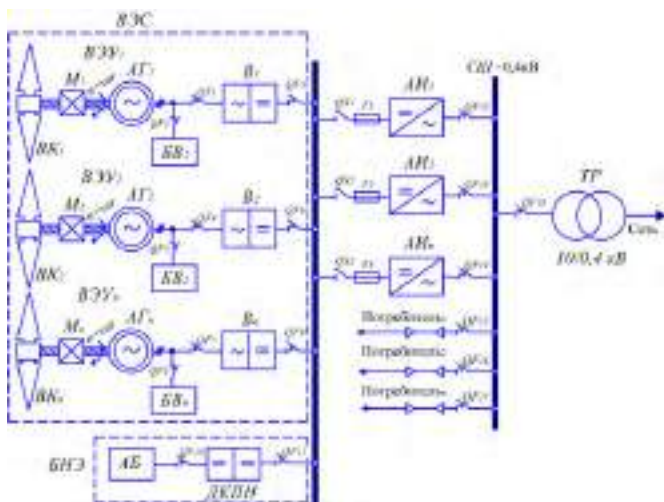


Рис. 5 – Функциональная электрическая схема энергоснабжения группы домовладений



Комбинированная схема ветро-солнечной электростанции приведена на рис. 6. Эта система в основном предназначена для круглогодичного обеспечения электроэнергией жилых и производственных объектов в сельском хозяйстве. В их составе входят: ветроэнергетическая установка; солнечная батарея; контроллер заряда АБ; инвертор 12/24/220 В.

Как правило, в составе ветро-солнечной системы необходимо предусматривать резервные источники электроэнергии АБ. Поэтому каждый из режимов работы (ВЭУ-СФЭУ, ВЭУ-АБ или СФЭУ-АБ) должен обеспечивать пиковую нагрузку [8].

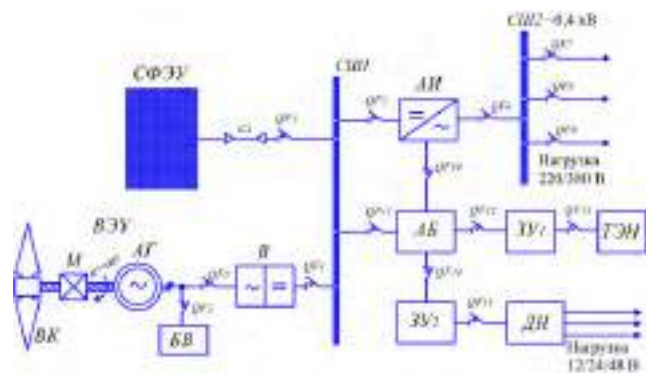


Рис. 6 – Функциональная схема ветро-солнечной электростанции

Ветро-солнечная электростанция работает следующим образом. ВЭУ генерирует трёхфазное напряжение, вырабатываемое асинхронным генератором АГ, напряжение через выпрямитель прикладывается к шине постоянного тока СШ1 солнечной фотоэлектрической установки СФЭУ. АИ преобразует напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока, соответствующее качеству, необходимому для нагрузки, подключаемой к шине переменного тока СШ2.

В это же время происходит заряд аккумуляторной батареи АБ. Защитное устройство ЗУ1 регулирует зарядное напряжение и осуществляет защиту аккумуляторной батареи АБ от перезаряда.

Избыток энергии в режиме ВЭУ–СФЭУ идёт на нагрев воды в бойлере или воздуха в помещении, используя для этого водяной или воздушный нагреватели (ТЭН). Делитель напряжения ДН преобразует напряжение постоянного тока, поступающего от АБ через защитное устройство ЗУ2, в напряжения 12, 24 или 48 В.

В случае шторма СФЭУ АБ осуществляет питание нагрузки переменного и постоянного тока через автономный инвертор АИ и делитель напряжения ДН. В этом случае ВЭУ отключена от шины СШ1.

Для предотвращения перезаряда АБ применяется защитное устройство ЗУ2. Как только напряжение на АБ приближается к опасному уровню перезаряда защитное устройство ЗУ2 отключает нагрузку постоянного тока. Защиту АБ от перезаряда в цепи переменного тока осуществляет АИ.

Ёмкость АБ так же делается избыточной и определяется исходя из необходимого времени работы в периоды безветрия и пасмурной погоды. Целесообразно в составе ветро-солнечной системы использовать герметичные необслуживаемые аккумуляторы АГМ, не требующие периодического добавления электролита и не выделяющие вредных газов. Срок службы АБ данного типа составляет 5–7 лет в зависимости от режима эксплуатации.

### III. Выводы

Целью предлагаемой статьи является обоснование нескольких способов энергоснабжения отдаленных потребителей за счёт использования энергии ветра. В работе предлагается альтернативный вариант обеспечения бесперебойного электроснабжения автономных потребителей за счёт использования дизельных электростанций, а также солнечных фотоэлектрических станций. Следует отметить, что в условиях эксплуатации ВЭУ для максимизации использования энергетического потенциала ветра наиболее перспективным является применение балластной нагрузки. Наиболее эффективной с точки зрения безопасности электроснабжения в условиях автономии является эксплуатация систем гарантированного электроснабжения, которые базируются на нескольких ВЭУ малой мощности. Реализация схемных решений энергоснабжения частных потребителей и малых производственных предприятий позволит разрешить дефицит электроэнергии и мощности сельскому хозяйству и частного предпринимательства, повысит уровень саморегулирования и независимости конечного потребителя.

### Список литературы

- [1] Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. 2012. № 3(4). С. 103–108.
- [2] Сулов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 5. С. 131–142.
- [3] Шерязов С.К., Шелубаев М.В. Разработка метода определения параметров ветропарка // Вестник Крас ГАУ. 2014. № 10. С.182–187.
- [4] Кудрин Б.И., Грозных В.А. Проектирование систем электроснабжения на базе установок альтернативной энергетики // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника, теплофизика и теплоэнергетика, энергосбережение в технике и технологиях): сб. тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп: в 3 т. 2011. Т. 2. С. 16–21.
- [5] Ветроэлектрические станции: монография / Квитко А.В [и др.]. Краснодар: КубГАУ, 2017. 192 с.
- [6] Елистратов В.В., Кузнецов М.В., Лыков С.Е. Ветроэнергоустановки. Автономные ветроустановки и комплексы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. 100 с.
- [7] K. Charafeddine, K. Sangov, S. Tsyruk. Automatic Voltage Regulation and Stability Analysis of Three-phase Self-excited Induction Generator for Wind Energy // IEEE -IT-DREPS Conference. Amman, Jordan, 2017. P. 153–158.
- [8] Григораш О.В. Корзенков П.Г. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии // Научный журнал. 2013. № 93(09). 13 с.

# СОВРЕМЕННАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА: МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Сангов Х.С.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия.  
khushdil.sangov@mail.ru.

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Надёжное и устойчивое обеспечение электроэнергией относится к вопросам национальной безопасности любого государства и является необходимым условием его экономического развития. Современная ветроэнергетика, обеспечивая значительный прирост в электроэнергетике, даже при современном состоянии энергосистемы полностью может обеспечивать надёжное энергоснабжение и качество электрической энергии. В предлагаемой статье анализируется мировой потенциал ветроэнергетики и влияние на него современных технологий. Также рассматриваются тенденции развития оффшорной ветроэнергетики стран, которые активно занимаются разработкой и строительством ветровых станций в мире.

**Материалы и методы:** 1. Анализ статистических данных по использованию ветроустановок в мире за последнее время, доступных в исследованиях специализированных организаций. 2. Сравнительная оценка структурных схем наиболее распространённых ветровых установок.

**Результаты:** Проведен анализ мирового потенциала мощности ветроэнергетики, а также представлена диаграмма роста мощности ВЭС в мире за период 2000–2017 гг. (прогноз на 2020 г.).

**Выводы:** Исходя из проведённого анализа, можно прийти к выводу, что в мире прослеживается тенденция децентрализации систем электроснабжения там, где это экономически выгодно. Дальнейшее развитие ветроэнергетики связано с увеличением мощности единичной ВЭУ и решением проблем стабильности централизованной системы электроснабжения в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, оффшорная ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, установленная мощность, энергосистема.

## MODERN WIND ENERGY: WORLD TRENDS AND PROSPECTS FOR ITS DEVELOPMENT

K. Sangov

National Research University “MPEI”  
Moscow, Russia.  
khushdil.sangov@mail.ru.

## Abstract

**Background:** Reliable and sustainable power supply refers to the national security of any state and is a required condition for its economic development. Modern wind energy is growing significantly in the electric power industry, and with the current state of the power system, can fully provide power quality and reliability of power supply. In this case, the world potential of wind energy and the influence of modern technologies on it have been analyzed in this paper. Also, the tendencies of offshore wind energy development in the main countries, which are actively engaged in the development and construction of wind power plants in the world, have been considered in this study.

**Materials and methods:** 1. Analysis of statistical data on the use of wind power in the world in recent years is available in the researches of specialized organizations. 2. A comparative evaluation of the structural diagrams of the most common wind installations.

**Results:** As a result of the statistical analysis, the world potential of wind power, as well as a diagram representing the percentage of annual growth in the capacity of the wind energy systems (WES) in the world for the period 2000–2017 (Forecast for 2020).

**Conclusions:** Based on the analysis given in the paper, we can proceed to the conclusion that in the world there is a tendency for the decentralized generating systems where it is economically profitable. Further development of wind energy is associated with the increase in the installed capacity of wind turbine unit and solving the problems of stability of a centralized power system with a high penetration level of renewable energy sources (RES).

**Key words:** wind energy, offshore wind energy, wind power plant, installed power, power system.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В мировой экономике, начиная с 2010 г., прогнозируется интенсивное снижение потребления углеводородных источников энергии, которое будет компенсироваться за счёт возобновляемых источников энергии (ВИЭ), доля которых в общем энергобалансе к 2040 г. достигнет 50 % [1]. Директивой Европейского парламента и Совета по стимулированию использования энергии из возобновляемых источников, которая вступила в силу в июне 2009 г., предусматривается доведение к 2020 г. доли энергии от возобновляемых источников до 20 %. Европейский Союз обозначил общие цели по развитию ветроэнергетики – достижение 12 % в производстве электроэнергии в 2020 г. [2]. Мировой ресурс ветровой энергии огромен. В конце 70-х гг. прошлого века, в результате энергетического кризиса, началось возрождение ветроэнергетики в Европе и США. В настоящее время ветроэнергетика является одной из наиболее динамичных отраслей с многомиллиардным оборотом капитала [3, 4].

## II. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ

В 2017 г. суммарная установленная мощность всех ветроэлектрических станций (ВЭС) в мире достигла 539,3 ГВт, после 486,6 ГВт в 2016 г. (рис. 1). Рынок новых ветротурбин увеличился по сравнению с предыдущим годом, составив 52,55 ГВт по сравнению с 51,40 ГВт в 2016 г. В целом годовой темп роста составил 10,8 %, что чуть меньше по сравнению с 2016 г. (рис. 2). В 2017 г. в общей сложности 106 стран использовали энергию ветра для производства электроэнергии [5].

Годовая выработка электроэнергии всеми ветроэнергетическими установками (ВЭУ), установленными в мире на конец 2017 г., составила 450 млрд кВт·ч или 2 % от всей выработки. Работа ВЭС предотвратила выброс в атмосферу более 626 млн т CO<sub>2</sub>. Денежный оборот в ветроэнергетическом секторе в 2017 г. составлял 107,2 млрд долл. США, что на 12 % меньше по сравнению с 2016 г. В мире за 2010–2017 гг. количество работников ветроэнергетической отрасли удвоилось и составило более 1 млн человек.

Мировыми лидерами с наибольшей установленной мощностью ВЭС на конец 2017 г. являются: Китай – 19 500 МВт (37 %), США – 6 894 МВт (13,2 %), Германия – 6 145 МВт (11,7 %), Индия – 4 600 МВт (8,7 %), Турция – 0,9 ГВт (1,7 %) (рис. 3).

Европейский сектор ветроэнергетики добавил 16,8 ГВт, из которых 15,7 ГВт пришлось на страны Евросоюза. Лидерами в области ветроэнергетики в Европе являются Германия, Великобритания, прибавившие за 2016 г. по 6,6 и 4,3 ГВт, соответственно.

В Латинской Америке рост также понизился по сравнению с предыдущим годом, было добавлено только 2,6 ГВт новых мощностей, из которых 2 ГВт пришлось на Бразилию.

В Северной Америке наблюдалось сокращение ввода новых мощностей, было добавлено лишь 7,8 ГВт, из которых 7 ГВт пришлось на США. По данным Американской ассоциации ветряной энергии в 2017 г. ВЭС удовлетворяли потребности США в электроэнергии на 5,5 %. Лидерами среди штатов по объёму электроэнергии, добываемой из ВЭС, стали: Айова – 36,3 % электричества штата, Канзас – 30%, Южная Дакота – 29 %. Крупнейшим

штатом США по установленной мощности ВЭС является Техас, где в 2017 г. были введены ВЭС общей мощностью 1 790 МВт. Правительством США планируется увеличить мощность национальной ветроэнергетики для обеспечения 10 % потребностей в электроэнергии в 2020 г. (сегодня около 6 %).

В объединённом Африканском и Тихоокеанском регионе только две страны показали заметный рост: ЮАР 621 МВт и Австралия 245 МВт.

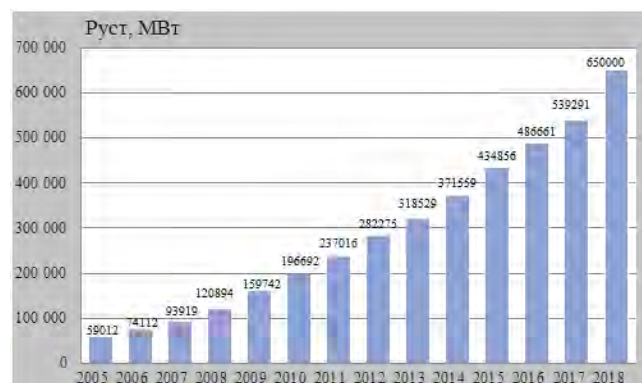


Рис. 1 – Общая установленная мощность ВЭС в мире за 2005–2017 гг. (прогноз на 2018 г.)

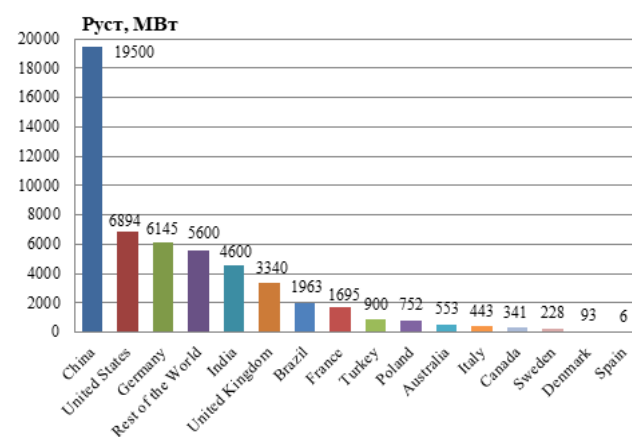


Рис. 2 – Годовой процент роста мощности ВЭС в мире за 2000–2017 гг.



Рис. 3 – Рост мощности ВЭС в первых пятнадцати странах и всего мира в 2017 г.

Россия обладает самым высоким в мире ветроэнергетическим потенциалом, но общая установленная мощность ВЭУ в 100–3000 раз меньше, чем в ведущих промышленно развитых странах, а также в развивающихся странах. По современным оценкам, в 2017 г. установленная мощ-

ность промышленных ВЭС, работающих в России, не превышала 10,9 МВт или всего 0,01 % от установленной мощности электростанций энергосистемы. Согласно [6] к 2020 г. предполагается повысить долю ВИЭ в производстве электроэнергии до 2 %. По прогнозу Института энергетической стратегии к 2030 г. общая установленная мощность ВИЭ в России должна составить 18,2 ГВт, в том числе ВЭС – 5 ГВт. Основными производителями ВЭУ в России являются следующие компании: «Гос – МКБ Радуга» (ВЭУ мощностью от 2 до 16 кВт); ЗАО НПО «Ветротехника» (ВЭУ мощностью от 4 до 315 кВт); группа компаний Сайнмет (ВЭУ SW2/5 мощностью 2 кВт) и др.

Таким образом, по итогам 2017 г. в лидеры по общей мощности ветроэнергетики в мире вышли: Китай – 188,2 ГВт (35 %), США – 89 ГВт (17 %) и Германия – 56,1 ГВт (10 %).

### III. РАЗВИТИЕ ОФФШОРНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ

Мощность оффшорной ветроэнергетики в 2017 г. продолжила расти, было введено 4 331 МВт, общая установленная мощность оффшорных ветряных установок составила 18 814 МВт (рис. 4). Оффшорные ветропарки существуют в семнадцати государствах: в одиннадцати европейских странах, а также в Китае, Вьетнаме, Японии, Южной Кореи, Тайване и США [7]. Доля оффшорных мощностей в 2017 г. поднялась до 23 %.

По данным Европейской ветроэнергетической ассоциации к концу 2017 г. в Европе на 17 оффшорных ВЭС были установлены и присоединены к энергосети 560 оффшорных ветротурбин. Общая установленная мощность оффшорной ветроэнергетики с помощью 4 149 турбин в 11 странах Евросоюза к концу 2017 г. составила 15 780 МВт. Тройку лидеров возглавляет Великобритания, где общая мощность оффшорной ветроэнергетики к концу 2017 г. составила 1 679 МВт, что соответствует 53,3 % доли рынка Европы, Германия – 1 247 МВт (39,6%) и Бельгия – 165 МВт (5,2 %).

Позиции передовых стран в оффшорной ветроэнергетике приведены в таблице.

УСТАНОВЛЕННАЯ ОФФШОРНАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ В СТРАНАХ ЕВРОПЫ К КОНЦУ 2017 Г.

Страна	Кол-во		Уст. мощность, МВт	Уст. мощность ветротурбин, введенных в 2017 г., МВт
	ВЭС	турбин		
Великобритания	31	1 753	6 835	1 679
Германия	23	1 169	5 355	1 247
Дания	12	506	1 266	–5
Нидерланды	7	365	1 118	0
Бельгия	6	232	877	165
Швеция	5	86	202	0
Финляндия	3	28	92	60
Ирландия	2	7	25	0
Испания	1	1	5	0
Норвегия	1	1	2	0
Франция	1	1	2	2
Всего	92	4 149	15 870	3 148

В Китае доля оффшорных мощностей в 2017 г. поднялась до 1161 МВт (100 новых ветротурбин). Общая установленная мощность оффшорных ВЭС достигла 2788 МВт, после 1627 МВт в 2016 г. К 2020 г. правительство Китая планирует установить 30 ГВт оффшорных мощностей вдоль своего побережья.

США обладают отличным потенциалом оффшорной ветроэнергетики, и многие проекты сейчас находятся на стадии разработки. Дорожную карту по оффшорной ветроэнергетике разрабатывает Индия, изучает свой потенциал и Бразилия.

### IV. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С середины 80-х годов прошлого века в мире сменилось примерно 8 поколений ВЭУ с горизонтальной осью вращения (основной тип ВЭУ). Каждое последующее поколение отличается от предыдущих большей единичной установленной мощностью (от 10 до 8000 кВт), более высокой степенью автоматизации, решением технических (плавный пуск, потребление или выдача мощности, стабилизация напряжения) и экологических проблем [8]. На рис. 5 указаны ведущие фирмы, на долю которых в 2017 г. пришлось 68,6 % от объема мировых поставок.

В составе современных ВЭУ преимущественно используется асинхронные генераторы (АГ) двойного питания фирмы «Vestas» или синхронные (СГ) фирмы «Enercon», а также других фирм (рис. 6) [9]. Важно отметить, что ВЭУ могут по заданному алгоритму выдавать или потреблять реактивную мощность, так как уровни напряжений в различных узлах энергосистемы в основном обусловлены ее балансом.

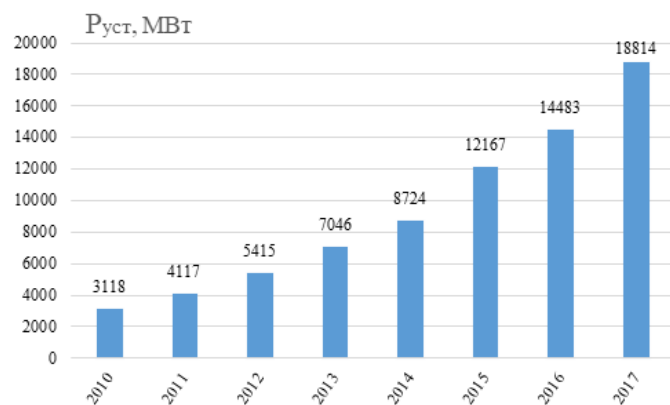


Рис. 4 – Динамика развития оффшорных ВЭС в мире за 2010–2017 гг.

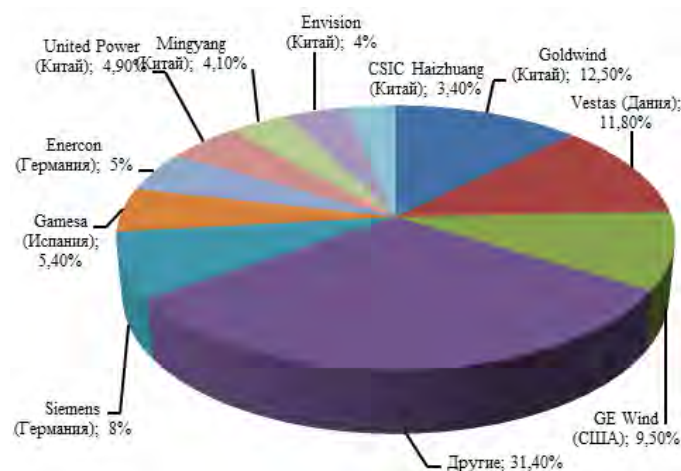


Рис. 5 – Рыночные доли 10 мировых лидеров-производителей ВЭУ в конце 2017 г.

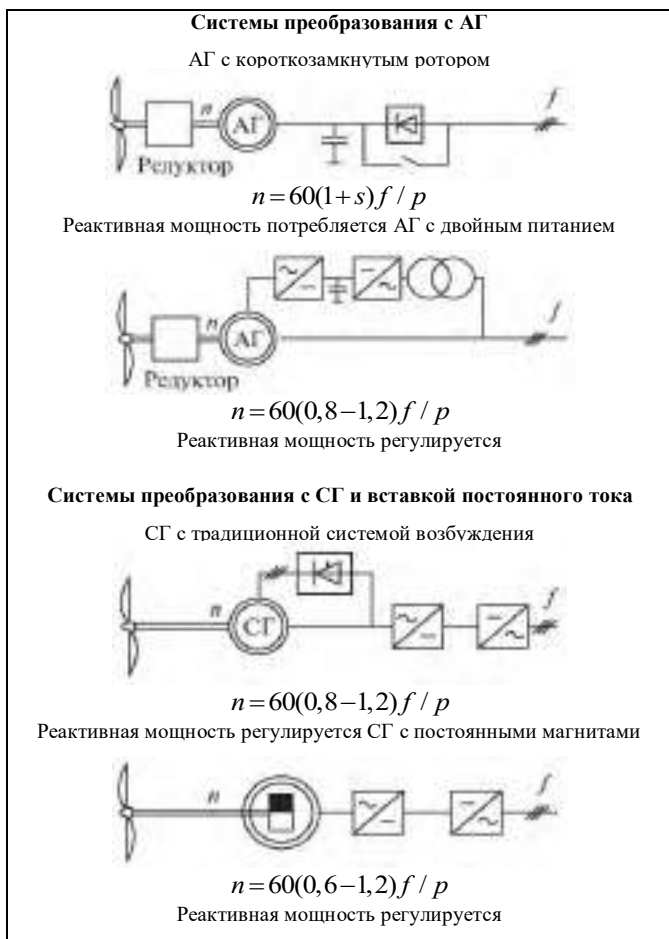


Рис. 6 – Характеристика ветротурбины Vestas типа V80-2.0

В последние годы страны ЕС и США делают ставку на серийное производство ВЭУ мощностью 660, 850, 1800 и 2000 кВт, предназначенных для параллельной работы с централизованной сетью электроснабжения в составе ВЭС. Например, известная датская фирма «Vestas» выпускает ВЭУ следующих мощностей: 1,8, 2,0, 2,6, 3,3 и 8 МВт [10]. Ниже приведены технические данные производимых ею ВЭУ типа V80-2.0 (рис. 7):

Номинальная мощность $P_{ном}$ , МВт.....	2
Высота на уровне ступицы, м.....	80
Скорость, м/с:	
начальная $V_{нач}$ .....	4,0
номинальная $V_{ном}$ .....	14
конечная $V_{кон}$ .....	25
Диаметр ротора, м.....	80
Площадь ометаемой поверхности, м <sup>2</sup> .....	5027

Следует отметить, что форма кривой зависимости выдаваемой мощности от скорости ветра для всех ВЭУ одинакова. Различие состоит в значениях начальной  $V_{нач}$ , номинальной  $V_{ном}$  и конечной  $V_{кон}$  (при которой ВЭУ отключается от сети) скоростей ветра.

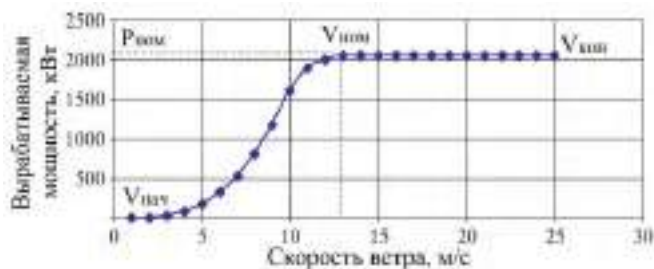


Рис. 7 – Характеристика ветротурбины Vestas типа V80-2.0

## V. ВЫВОДЫ

1. В 2017 г. установленная мощность всех ВЭУ в мире достигла 539 291 МВт, из которых 52 630 МВт были запущены в 2016 г. Темп роста ветроэнергетики в мире в 2017 г. составил 10,8 %.
2. Китай занял первое место в мире по суммарной установленной мощности ВЭУ, обогнав США и остается центром международной ветроэнергетической промышленности.
3. Германия сохраняет первое место в Европе по общей установленной мощности ВЭУ, имея на своём счету 56 164 МВт.
4. На долю Азии пришлось больше всего новых ВЭУ (46,4 %), на втором месте Европа (32,0 %), на третьем – Северная Америка (14,8 %).

## Список литературы

- [1] Антуфьев И.А. Будущее энергетики – Высотные ветроэлектростанции // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 9-й Междунар. науч.-техн. конф. М., 2014. С. 214–225.
- [2] Фортон В.Е., Попель О.С. Возобновляемые источники энергии в мире и в России // Пути повышения энергетической и экономической эффективности: матер. 1-го Междунар. форума «Возобновляемая энергетика». М., 2013. С. 12–22.
- [3] Николаев В.Г., Ганага С.В., Перминов Э.М. Состояние и перспективы развития мировой и отечественной ветроэнергетики. Ч. 1. Мировая ветроэнергетика. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. 124 с.
- [4] Грибов С.В. Современное состояние малой ветроэнергетики // Новое в Российской Электроэнергетике. М.: Изд-во «Энерго-пресс», 2017. № 7. С. 58–74.
- [5] World Wind Energy Association – Statistics 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wwindea.org/2017-statistics/> (дата обращения: 10.02.2018).
- [6] Безруких П.П., Безруких П.П. Ветроэнергетика: справ.-метод. изд. // Под общ. ред. П.П. Безруких. М.: «Интехэнерго-Издат», 2014. 304 с.
- [7] The European offshore wind industry // Key trends and statistics – 2016/ Published in January 2017. P. 36.
- [8] История ветроэнергетики. Справочно-информационный центр [Электронный ресурс]. URL: <https://gisee.ru/articles/windenergy/24528/> (дата обращения 15.02.2018 г.).
- [9] Белей В.Ф., Харцфельд Э., Пихоцки Я. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и варианты их решения // Промышленная Энергетика. 2014. № 8. С. 56–61.
- [10] Vestas Wind Systems A/S: офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vestas.com/> (дата обращения 25.01.2018).

# НЕЙРОМАРКЕТИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ

Сафина Э.И., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.  
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»  
Казань, Россия

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Каким образом нейромаркетинг воздействует на человеческие эмоции, определяется выбор в пользу того или иного продукта? В данной работе будет изучена природа возникновения нового поля исследования человеческого спроса, которое набирает популярность у маркетологов нашего времени. Информация, использованная в статье, представляет собой анализ сводных данных по направлению нейромаркетинга.

**Материалы и методы:** Методы магнитно-резонансной томографии, органы чувств человека.

**Результаты:** Получен анализ сводных данных развития нейроэкономического направления, возникшего на стыке нескольких наук: нейробиологии, психологии и экономики.

**Выводы:** Рассмотрены методики изучения эмоциональных процессов на уровне потребительских возможностей. Выявлены инструменты воздействия на человеческий разум в пользу высокого спроса продукции.

**Ключевые слова:** нейромаркетинг, метод, спрос, потребитель, рынок, инструмент воздействия.

## NEUROMARKETING AS A DEMAND MANAGEMENT TOOL

E. Safina, N. Yudina, S. Livshits, T. Dunaeva  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
elzafasaho@rambler.ru

## Abstract

**Background:** How does neuroeconomics affect human emotions, determining the choice in favor of a particular product. In this paper, the nature of the emergence of a new field of research of human demand, which is gaining popularity among marketers of our time, will be studied. The information used in the article is an analysis of summary data on the direction of neuroeconomics and neuromarketing.

**Materials and method:** Methods of electroencephalography, magnetic resonance imaging, skin-galvanic reflexes, eye tracking.

**Results:** The analysis of summary data on the development of the neuroeconomic orientation emerged at the junction of several sciences: neurobiology, psychology and economics.

**Conclusions:** Methods of studying emotional processes at the level of consumer possibilities are considered. The instruments of influence on the human mind in favor of high product demand are revealed.

**Key words:** neuromarketing, method, demand, consumer, market, instrument of influence.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Инструменты управления спросом совершенствуются, используя научные знания и наработки наряду с физиологическими потребностями человека. Экономисты, желающие совершить революцию в области экономики, стали активно интересоваться мозгом человека, а именно, что влияет на принятие тех или иных решений при выборе определенного продукта.

Нейроэкономика зарождалась постепенно и точной отправной точки не имеет, однако начало было положено в 1980-х годах во время актуализации концепции поведенческой экономики, позаимствовавшей идеи из психологии в целях разъяснения механизма индивидуального принятия решений. В конце 1990-х годов профессором Джерри Залтманом была разработана общая методика

нейромаркетинга и запатентована технология ZMET (Zaltman Metaphor Elicitation Method). В этой методике использовались наборы картинок, вызывающие у клиента положительный эмоциональный отклик. После чего данные интерпретировались в ходе бесед с психологом или же путем анализа снимков головного мозга. В 1996 году ведущий нейробиолог из Нью-Йоркского университета опубликовал ставшую потом известной книгу «Эмоциональный мозг: загадочные основы эмоциональной жизни», в которой объясняется то, как мозг обнаруживает риски, в том числе экономические, и реагирует на них. На стыке 90-х и 2000-х годов ученые стали активно использовать МРТ в качестве инструмента исследования человеческого мозга во время решения различных экономических задач. Таким образом, в Американской экономической ассоциации и Всемирном экономическом форуме в Давосе

стали мелькать вопросы об участии в принятии экономических решений физиологической составляющей. При выступлении с докладами экономисты стали использовать в своих материалах не формулы, а снимки полушарий мозга [3].

## II. НЕЙРОМАРКЕТИНГ И РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПОТРЕБИТЕЛЯ

Бытует мнение, что нейромаркетинг является сильнейшим механизмом управления умами потребителей и противостоять его влиянию почти невозможно. Приверженцы нейромаркетинга уверяют в том, что наука пустила корни глубоко в подсознание человека и не оставила места для принятия здравомыслящих решений при покупке товаров.

Нейромаркетологи полагают, что потребители не могут совершить осознанный выбор при покупке товаров. По их мнению, только оборудование для исследования способно определить происходящие процессы в мозге человека при совершении выбора до того, как его мысль пробьется в сознание.

Многие производители, используя методы нейромаркетинга, надеются оформить свой продукт тем лучшим, сделать или же купить «полезную» рекламу для увеличения объема и спроса, вытеснив тем самым конкурентов. Однако это не всегда работает.

«Если потребитель не настроен покупать данный продукт или бренд, значит, у него отсутствует причина для покупки, а нейромаркетинг никак не связан с мотивацией потребителя. Нейромаркетинг, в теории, может сделать так, что продукт или какая-то его особенность вызовет некую реакцию (предположим, понравится). При этом сам продукт как не был нужен, так и остался ненужным покупателю», – уверен Виктор Тамберг, автор книги «Бренд. Боевая машина бизнеса» [4].

## III. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ЗНАНИЙ

Достоинства методик, основанных на нейротехнологиях, вызывают множество споров. Однако по мнению специалистов исследовательской компании Millward Brown, вопрос об использовании нейротехнологий является снятым. Вопрос трактуется несколько иначе: «Каким образом нужно использовать достижения в нейроэкономике, чтобы это принесло максимальную пользу?». Именно поэтому специалистам, изучающим нейроэкономические процессы, видится заманчивым освоение методов эффективного манипулирования подсознательной деятельностью мозга

для того, чтобы необходимые реакции зафиксировались в сознании как можно крепче [2].

Одним из направлений нейромаркетинга является визуальный мерчендайзинг (влияние при помощи цвета и картинок), звуковое построение и аромаркетинг. Мартин Линдстром, знаменитый маркетинговый консультант, уверен в том, что грамотный маркетинг, вызывающий рефлексию со стороны органов чувств, а именно: обоняния, осязания, тактильных ощущений, визуализации и восприятия звуковых эффектов, способен завоевать преданность и одержать победу в борьбе за потребителя.

Имея представление в области биохимических эмоциональных реакций потребителей, маркетологи могут эффективно воздействовать на все пять органов чувств человека, применяя позитивные раздражители в виде запахов, музыки, цвета, выкладки товара.

Исследования в данной области доказали вышеперечисленные доводы, эмоциональные товарные презентации приводят к повышенной активизации нейронов, чем обычные товарные презентации. Замечено, что эмоциональные послания потребители воспринимают лучше, чем рациональные [1].

Российские потребители подвержены воздействию нейромаркетинга гораздо больше, нежели европейцы. От аудиосопровождения зарубежные ритейлеры прогнозируют рост продаж примерно на 10 %, в то время как украинские и российские продавцы надеются поднять продажи минимум на треть. К примеру, в Европе правильно подобранный аромат в торговом зале повышает продажи на 6–15 %. В нашей же стране объемы продаж кофе при помощи распространения кофейного аромата на одной из автозаправочных станций возросли на 40 %.

Методы нейромаркетинга были встречены в нашем обществе не совсем положительно, однако не стоит отрицать тот факт, что нейромаркетинг справляется с поставленными задачами вполне приемлемо, а именно дает ответ на вопрос, какие товары необходимы покупателю [4].

## Список литературы

- [1] Барден Ф. Взлом маркетинга. М.: Манн, Иванов, Фербер, 2018. С. 115–127.
- [2] Канеман Д. Думай медленно, решай быстро М.: АСТ, 2016. С. 234–246.
- [3] URL: <https://sciencepop.ru/nejroekonomika-nuzhny-li-mozgu-dengi/>
- [4] URL: [https://adview.ru/cat\\_marketing-ru/ispolzovanie-nejromarketinga-dlya-velicheniya-obema-prodazh/](https://adview.ru/cat_marketing-ru/ispolzovanie-nejromarketinga-dlya-velicheniya-obema-prodazh/)

# РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ РОЗНИЧНОГО РЫНКА

Селиванов Н.Н.  
Филиал АО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана  
Казань, Россия  
Kolyam6a@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В настоящее время доля электростанций промышленных предприятий составляет 2 % от суммарной установленной мощности электростанций ОЗ РДУ Татарстана, что не оказывает существенного влияния на электроэнергетический режим. Развитие электростанций розничного рынка повлечет за собой рост влияния на электроэнергетический режим, что может привести к негативным последствиям.

**Материалы и методы:** Изучение существующего законодательства в сфере обращения электроэнергии на оптовом и розничном рынках электроэнергии.

**Результаты:** Проведен анализ работы электростанций розничного рынка параллельно с ЕЭС, проанализировано законодательство с сфере регулирования оптового и розничного рынков электроэнергии.

**Выводы:** Развитие электростанций розничного рынка может привести к негативным последствиям для ЕЭС.

**Ключевые слова:** электростанция розничного рынка, оптовый рынок, розничный рынок, резервы третичного регулирования, диспетчерское управление.

# DEVELOPMENT OF POWER STATIONS OF THE RETAIL MARKET

N. Selivanov  
Affiliate "SO UPS", JSC RDC Tatarstan  
Kazan, Russia  
Kolyam6a@yandex.ru

## Abstract

**Background:** At present, the share of power plants of industrial enterprises is 2% of the total installed capacity of power stations of the OT of the RDU of Tatarstan, which does not have a significant impact on the electric power regime. The development of power stations in the retail market will entail an increase in the influence on the regime, which may lead to negative consequences.

**Materials and Methods:** Examination of existing legislation in the sphere of electricity circulation in the wholesale and retail electricity markets.

**Results:** The analysis of work of power stations of the retail market in parallel with the EEC was carried out, the legislation with sphere of regulation of the wholesale and retail markets of the electric power.

**Conclusions:** The development of power stations in the retail market can lead to negative consequences for the EEC.

**Key words:** retail power station, wholesale market, retail market, tertiary regulation reserves, dispatching management.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности приводит к необходимости строительства новых генерирующих мощностей для покрытия растущего спроса на электроэнергию. Ввиду ряда преимуществ крупные потребители все чаще рассматривают целесообразность строительства собственного источника энергии в дополнение к существующему питанию от ЕЭС России.

## II. РТР ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕЖИМА

В настоящее время электростанции розничного рынка занимают 2 % от общей установленной мощности ОЗ РДУ Татарстана, что не оказывает существенного влияния на электроэнергетический режим. Увеличение мощности агрегатов соответственно усилит влияние на режим.

В соответствии со СТО 59012820.27.010.007-2016 от 15 декабря 2016 г. [3] для исключения длительного превышения максимального допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении должна быть обеспечена достаточность объемов резервов третичного регулирования (далее – РТР), определяемая по самому сильному нормативному возмущению. На примере Казанского энерго-района необходимо поддерживать резервы для покрытия возможного отключения ТГ-7 Казанской ТЭЦ-3. Объемы РТР формируются за счет генерирующих мощностей участников оптового рынка.

## III. ОПТОВЫЙ И РОЗНИЧНЫЙ РЫНКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Участие в оптовом рынке для собственников генерирующего оборудования регламентировано правилами оптового рынка. Ниже представлены одни из основных требований к участникам оптового рынка:



- участие в общем первичном регулировании частоты;
- предоставление диапазона регулирования реактивной мощности;
- оснащение системой связи;
- работа в соответствии с заданным Системным оператором режимом работы.

При невыполнении, в том числе частичном, указанных требований в отношении генерирующего объекта определяются объемы недопоставки мощности с учетом установленных правилами оптового рынка штрафных коэффициентов в соответствии с едиными требованиями, действующими на оптовом рынке. Приведенные требования не распространяются на участников розничного рынка.

Розничные генераторы в случае возникновения (угрозы возникновения) аварийного электроэнергетического режима в энергосистеме должны корректировать график нагрузки и осуществлять загрузку (разгрузку) генерирующего оборудования [1]. Но в случае невыполнения требований диспетчера не предусмотрено штрафных санкций в части определения объема недопоставки мощности и расчета штрафного коэффициента. Кроме того, нагрузка электростанции промышленного предприятия зависит от технологии основного производства в следствие чего диапазон нагрузок отсутствует. В таком случае с точки зрения диспетчеризации электростанция становится неуправляемой.

Для участия на розничном рынке установленная мощность единицы генерирующего оборудования должна быть ниже 25 МВт, в противном случае необходимо одновременное выполнение следующих условий:

- в качестве топлива используется сырье, получаемое от промышленного производства, принадлежащего субъекту;
- генерирующее оборудование используется преимущественно для покрытия собственных нужд промышленного производства;
- генерирующее оборудование технологически связано с производством, т. е. работа производства невозможна или ограничена при отключении генерирующего оборудования;
- объем производства электроэнергии не превышает объем потребления более чем на 25 МВт·ч в среднем по календарному году.

Либо:

- генерирующее оборудование используется преимущественно для покрытия собственных нужд промышленного производства;

- генерирующее оборудование технологически связано с производством, т. е. работа производства невозможна или ограничена при отключении генерирующего оборудования;
- объем производства электроэнергии не превышает объем потребления более чем на 25 МВт·ч в среднем по календарному году;
- электростанция должна покрывать не менее 60 % объема потребления производства, остальную часть за счет внешних источников [2].

#### IV. Выводы

Основываясь на существующем законодательстве, предположим, что агрегат установленной мощностью 500 МВт при соблюдении условий, указанных в предыдущем пункте, имеет право работать на розничном рынке, тем самым уходит от возможных штрафных санкций. По условиям РТР необходимо поддерживать резерв для покрытия возможного отключения данного агрегата средствами участников оптового рынка. В случае аварийного режима фактически исключается возможность управления агрегатом (ввиду отсутствия диапазона регулирования). Нет возможности грамотно спланировать ремонты генерирующего и электросетевого оборудования.

#### А. Итоги

В связи со стихийным переходом крупных потребителей на собственные источники возможно:

- падение спроса на электроэнергию на ОРЭМ (переход участников на розничный рынок);
- снижение КИУМ для участников ОРЭМ ввиду необходимости поддержания заданного РТР (работа на параметрах ниже номинальных);
- невозможность корректного долгосрочного планирования электроэнергетических режимов;
- снижение суммарного диапазона регулирования.

#### Список литературы

- [1] О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442.
- [2] Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: постановление правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172.
- [3] СТО 59012820.27.010.007-2016 от 15.12.2016 «Резервы активной мощности Единой энергетической системы России. Определение объемов активной мощности при краткосрочном планировании».

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Сибгатуллин Р.А., Жиленков А.А.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
Lexmarck@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Распределённая генерация является одним из наиболее перспективных направлений развития топливно-энергетического комплекса в данный момент. Однако её участие в выработке электроэнергии в России пока очень незначительно. В соответствии с этим есть необходимость определения, в первую очередь, видов энергетических установок, которые необходимо бы было использовать при развитии распределённой генерации.

**Материалы и методы:** Мониторинг, анализ, описание.

**Результаты:** Были проанализированы основные виды энергетических установок, применение которых имеет место в условиях России.

**Выводы:** Существуют определённые виды энергоустановок, которые подходят для применения в настоящее время – когенерационные установки. Они обладают рядом положительных качеств. Также есть множество плюсов от внедрения распределённой генерации в целом. Найдены современные энергоустановки – топливные элементы, которые ранее практически не использовались в бытовом секторе, но в ближайшее время вероятность их активного внедрения очень высока.

**Ключевые слова:** газопоршневая установка, газотурбинная установка, топливный элемент, распределённая генерация.

## POWER STATIONS FOR APPLICATION IN THE DISTRIBUTED GENERATION

R. Sibgatullin, A. Zhilenkov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
Lexmarck@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The distributed oscillation is one of the most perspective directions of development of fuel and energy complex at present. However its participation in power production in Russia is so far very insignificant. According to it there is a need of definition first of all of types of power stations which would need to be used at development of the distributed oscillation.

**Materials and methods:** monitoring, analysis, description.

**Results:** Main types of power stations which application takes place in the conditions of Russia were analysed.

**Conclusions:** There are particular types of power stations which are suitable for application in the presents time – the cogeneration installations. They have a number of merits. Also there are sets of pluses from introduction of the distributed oscillation in general. The modern power stations - combustion cells which were practically not used earlier in the household sector are found, but in the nearest future the probability of their fissile introduction is very high.

**Key words:** gas-piston installation, gas-turbine installation, combustion cell, the distributed oscillation.

### I. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Стареющее оборудование электрических станций и сетей, рост потребителей электрической и тепловой энергии, развитие новых технологий в области интеллектуальных технологий в энергетике приводят к активному изучению и внедрению распределённой генерации в России и в мире.

Распределённая генерация решает следующие проблемы:

1. Увеличение надежности энергоснабжения, поддержание должных уровней напряжения и снижение риска потери устойчивости.
2. Снижение потерь в сетях и перетоков реактивной мощности.
3. Предсказуемые затраты на энергоснабжение.

Наиболее популярное направление – возобновляемые источники энергии. Однако в условиях России их применение зачастую нецелесообразно из-за отсутствия во многих районах климатических условий, позволяющих работать источникам возобновляемой энергии в оптимальном режиме и с максимальной эффективностью. В частности, в Республике Татарстан лишь небольшая территория (Верхний Услон, Рыбная Слобода, Камское Устье и др.) обладает надлежащим ветроэнергетическим потенциалом. А условий для использования солнечной и геотермальной энергии практически нет.

### II. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Применение малой генерации непосредственно связано с наличием доступных энергоресурсов и по возможности специальной инфраструктуры (трубопроводы, распределительные станции).

Основным топливом для работы энергетических установок в России является природный газ. На него переходит большинство электростанций, его используют все современные энергоустановки, такие, как газотурбинные и парогазовые, а также газопоршневые установки. Поэтому целесообразно рассматривать ГТУ, ГПУ и ПГУ в качестве главной генерирующей силы.

Применение редуцированных паротурбинных установок, теплофикационных установок (мини-ТЭЦ) на основе газотурбинных, парогазовых и газопоршневых установок дал возможность предприятиям относительно недорого обеспечить собственную выработку электроэнергии и отказаться (частично или полностью) от услуг электросетей. Такие станции выполняют те же задачи, что и традиционные станции – как правило, производство тепла и электричества. Далее следует распределение и снабжение уже выработанной энергии по точкам потребления. Нередко станции находятся непосредственно в составе предприятия, что позволяет экономить на транспортировке того же электричества. Причем это необязательно должны быть задачи базового энергообеспечения для поддержания работоспособности объекта. В зависимости от типа мини-ТЭЦ может выполнять второстепенные функции инженерного обслуживания, к примеру, обеспечивая холодными воздушными потоками вентиляционные дымоходы. Необязательно для таких станций и постоянное снабжение энергией. Их нередко подключают только в качестве аварийного резервного источника, когда центральная магистраль по тем или иным причинам не справляется со своими функциями.

Также ГПУ и ГТУ могут работать на различных видах энергетических ресурсов. Например, на одном пивоваренном заводе было установлено 3 ГПУ по 0,2 МВт фирмы Tedom, работающих на биогазе – побочном продукте процесса переработки воды. А на металлургическом заводе были установлены три турбоагрегата по 50 МВт, работающие на попутном (доменном) газе.

### III. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В 1839 г. Уильям Гроув обнаружил, что процесс электролиза обратим, т. е. водород и кислород можно объединять в молекулы воды без горения, но с выделением тепла и электрического тока. Это открытие дало начало развитию топливных элементов – электрохимических генераторов.

На данный момент технологии использования топливных элементов развиваются в нескольких направлениях. Это создание стационарных электростанций (централизованных и децентрализованных), энергетических установок для транспортных средств и источников питания различных устройств.

Компаниями GreenGenв Китае (250 МВт) и FutureGen в США (275 МВт) разработаны первые пилотные проекты электростанций на основе топливных элементов. Себестоимость составит \$2–2,5 за килограмм водорода:

1. При использовании водорода не возникает эмиссии углекислого газа.
2. Высокая эффективность.
3. Одновременное производство электроэнергии и тепла.
4. Водород может быть получен различными способами.

Затем предполагается снижение цены до \$1,50 с учетом хранения и доставки.

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Малая энергетика, конечно, не сможет полностью заменить большую. Однако с ее внедрением стало возможным решение многих проблем:

1. Снимается необходимость реконструкции и строительства новой сетевой инфраструктуры.
2. Наличие источников напряжения в непосредственной близости от нагрузки увеличивает надежность энергоснабжения, способствует поддержанию должных уровней напряжения в сети и снижает риск потери устойчивости.
3. Снижаются потери в сетях и перетоки реактивной мощности.
4. Предсказуемость затрат на энергоснабжение.
5. Повышается надежность энергоснабжения для владельца собственного источника электроэнергии, ведь большинство перерывов в энергоснабжении связано с нештатными ситуациями в сетевом хозяйстве.
6. Возможность расширения производства на предприятии, так как нет необходимости ждать развития инфраструктуры поставщиками электроэнергии.

### Список литературы

- [1] Длугосельский В.И., Зубков А.С. Эффективность использования в теплофикации газотурбинных и парогазовых технологий // Теплоэнергетика. 2000. № 12. С. 3–6.
- [2] Барков В.М. Когенераторные технологии: возможности и перспективы // «ЭСКО» электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». 2004. № 7.
- [3] Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 280 с.

# ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ ЭКСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА В КИТАЙ

Смирнов К.С.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук  
Иркутск, Россия  
k.smirnov@isem.irk.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Предлагаемые в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке экспортные проекты связаны со значительной неопределенностью будущих условий развития электроэнергетики регионов. В этих условиях принятие того или иного решения подвержено риску, поэтому задача минимизации рисков, изучения различных факторов, влияющих на устойчивость принимаемых решений в рассматриваемых условиях, является очень важной.

**Материалы и методы:** Расчеты и исследования базируются на основных положениях системного подхода в энергетике, моделях и методах математического программирования.

**Результаты:** Даны рекомендации по выбору наиболее предпочтительного проекта экспорта электроэнергии из Восточной Сибири и Дальнего Востока в Китай. Разработан методический подход для оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии.

**Выводы:** Разработанный модельный инструментарий и методический подход может применяться для оценки эффективности проектов экспорта электроэнергии при разработке программ и схем развития электроэнергетики регионов.

**Ключевые слова:** сравнительная эффективность, проекты экспорта электроэнергии, генерирующие мощности, методический подход.

## ASSESSMENT OF THE COMPARATIVE EFFICIENCY OF ELECTRICITY EXPORT PROJECTS FROM EASTERN SIBERIA AND THE FAR EAST TO CHINA

K. Smirnov

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Irkutsk, Russia  
k.smirnov@isem.irk.ru

## Abstract

**Background:** Export projects proposed in Eastern Siberia and the Far East are associated with considerable uncertainty in the future conditions for the development of the electric power industry in the regions. The decisions to be made in these conditions are subject to risk. Therefore, the problem of risk minimization and study of different factors that affect the stability of the decisions is of great importance.

**Materials and methods:** Calculations and studies are based on the main provisions of the system approach in energy, models and methods of mathematical programming.

**Results:** Recommendations are given for choosing the most preferable project for the export of electricity from Eastern Siberia and the Far East to China. A methodological approach has been developed to assess the comparative effectiveness of electricity export projects.

**Conclusions:** The developed model toolkit and methodical approach can be used to assess the efficiency of electricity export projects when developing programs and schemes for the development of the electric power industry in the regions.

**Key words:** comparative efficiency, electricity export projects, generating capacities, methodical approach.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Межгосударственная интеграция и кооперация России со странами Северо-Восточной Азии (СВА) в области электроэнергетики является одной из составляющих Восточной энергетической политики нашей страны.

Эта кооперация предполагает развитие межгосударственных электрических связей восточных районов России с соседними странами: Монголией, Китайской Народной Республикой, Республикой Корея, Японией, Корейской Народно-Демократической республикой.

Сооружаемые для этого трансграничные линии электропередачи могут использоваться как для экспорта электроэнергии из России, так и для объединения электроэнергетических систем (ЭЭС) указанных стран на совместную работу.

В настоящее время развитие межгосударственных электрических связей, несмотря на широкие возможности их реализации, отстает от других направлений сотрудничества России со странами СВА в области энергетики.

В перспективе развитие этих связей предполагается, в первую очередь, за счет проектов широкомасштабного экспорта электроэнергии из Восточной Сибири и Дальнего Востока в Китайскую Народную Республику.

Осуществление крупномасштабных экспортных проектов связано с решением ряда сложных задач. Для принятия обоснованных решений в этом направлении необходимо проведение детального и всестороннего анализа условий реализации и исследования возможных последствий таких шагов. Должна быть дана комплексная оценка стоимости ожидаемых затрат на реализацию новых проектов и тарифов на экспортируемую электроэнергию, возможностей и условий привлечения финансовых ресурсов для реализации проектов.

Теоретические и практические вопросы в области исследования эффективности экспорта электроэнергии и создания межгосударственных электрических связей рассматривались в работах отечественных ученых: Л.С. Беляева [1], С.В. Подковальникова, В.А. Савельева, И.М. Волькенау [2], Л.Д. Хабачева [2, 3], Н.И. Воропая, В.В. Ершевича, Ю.Н. Руденко [4] и др. К данной проблеме проявляли интерес и зарубежные ученые: J.Y. Yoon, D.W. Park [5], K.H. Chung, B.H. Kim [6] и др.

Исследованию энергетических проблем в условиях неоднозначности исходной информации посвящены работы Л.А. Мелентьева [7–9], А.А. Макарова [9–11], Л.С. Беляева [1, 12, 13], А.Н. Зейлигера [2, 3], Б.Г. Санеева [14, 15], Ю.Д. Кононова [16], В.А. Смирнова [17], Л.М. Шевчук [18], С.А. Смоляк [19] и др.

Проведенный автором обзор работ показывает, что вопросам прогнозирования развития региональных электроэнергетических систем (ЭЭС) и проектам экспорта электроэнергии в условиях неоднозначности исходной информации уделено большое внимание как в работах отечественных, так и зарубежных ученых. В то же время недостаточно изученной является очень важная в методическом и особенно в практическом плане проблема, связанная с оценкой сравнительной эффективности и выбором наиболее предпочтительных проектов экспортных проектов, вписываемых в ЭЭС региона в долгосрочной перспективе.

## II. ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Реализация методического подхода предполагает выполнение следующих шагов (рисунок):

1. Проведение анализа энергетических рынков электроэнергии стран импортеров российской электроэнергии и определение возможной ниши для российской электроэнергии.
2. Выявление потенциальных возможностей российской электроэнергетики для экспорта электроэнергии с использованием модели ТЭК страны (расход топлива на электростанциях, замыкающие затраты (цены на топливо), внешние перетоки электроэнергии, уровни электропотребления, объем экспорта электроэнергии).
3. Оценка системной эффективности экспортных проектов.
  - 3.1. Построение оптимизационной модели развития ЭЭС региона с поочередным включением в нее каждого из рассматриваемых проектов сооружения экспортных электростанций и линий электропередачи в регионе.
  - 3.2. Многофакторное исследование развития электроэнергетики региона с применением матрицы рисков.
  - 3.3. Выбор предпочтительных экспортных проектов с применением критериев теории игр
4. Оценка коммерческой эффективности экспортных проектов с использованием имитационной производственно-финансовой модели.
  - 4.1. Оценка коммерческой эффективности экспортных проектов с использованием имитационной производственно-финансовой модели
  - 4.2. Выбор наиболее эффективного экспортного проекта

- 3.3. С применением критериев теории игр осуществляется выбор наиболее эффективных проектов сооружения экспортных электростанций в регионе. Условия такого выбора зависят от вида используемого критерия теории игр. Применение формальных критериев теории игр позволяет выявить проекты неразличимых с точки зрения применяемых критериев. Такие проекты принято считать равноэкономичными. Существование равноэкономичных проектов обуславливает принципиальную невозможность полной формализации процесса принятия решений в условиях неопределенности развития ЭЭС региона.



Принципиальная схема методического подхода для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития ЭЭС региона

4. Оценка коммерческой эффективности экспортных проектов (в качестве основного критерия коммерческой эффективности на этом этапе рассматривается минимальный тариф на экспортную электроэнергию в местах перехода границы).
- 4.1. Построение имитационной производственно-финансовой модели для оценки коммерческой эффективности отобранных на третьем этапе экспортных проектов.
- 4.2. Выбирается вариант более предпочтительный с точки зрения коммерческой эффективности.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с предложенным методическим подходом представлена оценка сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в Китай на примере Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Доминирующую роль в структуре потребления энергоносителей в Китае играет уголь, самый экологически вредный в плане высокого содержания золы и серы. Он является главным источником загрязнения воздуха в стране. Несмотря на развитие ТЭС на газе доля установленной мощности на угле в структуре ТЭС прогнозируется к 2030 г. достаточно высокой – 86–93 %. В связи с этим Китай будет вынужден в больших количествах закупать электроэнергию из соседних стран, для энергообеспечения растущих потребностей в стране и снижения загрязнения воздуха.

Рассматриваются шесть возможных проектов экспорта электроэнергии [20–22], которые поочередно вписываются в модель развития электроэнергетической системы региона:

- Проект 1 – КЭС на ковыктинском газе на юге Иркутской области.
- Проект 2 – КЭС на канско-ачинском угле (КАУ) в Красноярском крае.
- Проект 3 – КЭС на угле в Республике Бурятия и Забайкальском крае (Олонь-Шибирская КЭС; Новая Харанорская КЭС).
- Проект 4 – КЭС на мугунском угле в Иркутской области.
- Проект 5 – Ургальская КЭС (Хабаровская энергосистема) и Эльгинская КЭС (Южно-Якутский энергорайон).
- Проект 6 – Средне-Учурская и Учурская ГЭС.

Для оценки эффективности проектов экспорта электроэнергии используется разработанная автором статическая, оптимизационная, многоузловая модель развития электроэнергетики региона.

В соответствии с предлагаемым методическим подходом строится матрица рисков. На основании полученной матрицы рисков производится выбор проектов экспорта электроэнергии, наиболее предпочтительных с точки зрения принятых в работе критериев теории игр (Лапласа, Сэвиджа).

Исследования показали, что совместное применение формальных критериев теории игр позволяет выявить четыре проекта экспорта электроэнергии, которые с точки зрения применяемых критериев можно считать равноэкономичными.

Равноэкономичность выбранных выше экспортных проектов не делает окончательный выбор решения произвольным. Обязательное требование к выбираемому проекту – его практическая реализуемость.

В работе дается оценка коммерческой эффективности отобранных на третьем этапе четырех экспортных проектов и из их числа отбирается окончательный, который предлагается реализовать с учетом использования имитационной производственно-финансовой модели, разработанной автором.

При выборе окончательного проекта сооружения экспортных электростанций предпочтение отдается проекту, обеспечивающему минимальный тариф на экспортную электроэнергию в местах перехода границы экспортных линий электропередачи с Китаем. Тариф определяется как минимально приемлемая для экспортера (России) цена на электроэнергию (без учета акцизов и пошлин), которая компенсирует все эксплуатационные издержки, включая плату за выбросы CO<sub>2</sub>, инвестиционные затраты и обеспечивает получение приемлемой прибыли на вложенный капитал.

При расчетах минимальных тарифов приняты следующие исходные посылки:

- расчетный период срока службы экспортной ЛЭП ±500 кВ – 25 лет;
- внутренняя норма доходности – 15%;
- источники финансирования – акционерный капитал;
- ставки налогов приняты по действующей в Российской Федерации системе налогообложения: налог на прибыль – 20 %;
- срок окупаемости ЛЭП – 15 лет;

Результаты расчетов экспортных тарифов на границе с Китаем приведены в таблице.

ТАРИФ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ НА ГРАНИЦЕ С КИТАЕМ, ц/кВт·ч

Показатель	Проект			
	1	4	5	6
Тариф на границе	7,9	10,1	9,3	8,0

Из таблицы видно, что проект сооружения экспортной КЭС на ковыктинском газе (на юге Иркутской области) с передачей электроэнергии по линии постоянного тока до границы с Китаем является более предпочтительным (по принятому критерию) по сравнению с остальными проектами.

Важно отметить, что использованные при расчетах технико-экономические показатели электростанций и линий электропередач характеризуются большой неопределенностью и поэтому к полученным количественным оценкам надо относиться как к предварительным. Тем не менее, полученные тарифы дают представление о сравнительной

коммерческой эффективности и рискованности предлагаемых схем экспорта электроэнергии, позволяют судить о предельных значениях тарифов при переговорах об экспорте электроэнергии в Китай.

#### IV. Выводы

1. Разработан методический подход для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития ЭЭС региона, позволяющий:
  - а) провести анализ энергетических рынков электроэнергии стран импортеров российской электроэнергии и определить возможную нишу для российской электроэнергии;
  - б) выявить потенциальные возможности российской электроэнергетики для экспорта электроэнергии с использованием модели ТЭК страны;
  - в) с использованием разработанной автором оптимизационной модели определить оптимальный состав энергетических объектов развития ЭЭС региона, необходимый для ее приспособления к различным внешним условиям и намечаемым экспортным проектам, и связанные с этим суммарные приведенные затраты;
  - г) на основе полученной информации построить матрицу затрат и матрицу экономических рисков и с помощью принятых критериев теории игр (Лапласа, Сэвиджа) сделать выбор наиболее эффективных (неразличимых с точки зрения принятых критериев) экспортных проектов;
  - д) с использованием разработанной автором имитационной производственно-финансовой модели дать оценку коммерческой эффективности экспортных проектов.
2. Проведена оценка системной эффективности шести экспортных проектов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке для экспорта электроэнергии в Китай: Ковыктинская КЭС на газе на юге Иркутской области; КЭС на канско-ачинском угле в Красноярском крае; КЭС на угле в Республике Бурятия и Забайкальском крае (Олонь-Шибирская КЭС; Новая Харанорская КЭС); КЭС на мугунском угле в Иркутской области, Ургальская КЭС (Хабаровская энергосистема) и Эльгинская КЭС (Южно-Якутский энергорайон), Средне-Учурская и Учурская ГЭС.
3. Дана оценка коммерческой эффективности (реализуемости) выбранных экспортных проектов. При этом предпочтение отдается проекту, обеспечивающему минимальный тариф на экспортную электроэнергию.

#### Список литературы

- [1] Беляев Л.С., Подковальников С.В., Савельев В.А., Чудинова Л.Ю. Эффективность межгосударственных электрических связей. Новосибирск: Наука, 2008. 239 с.
- [2] Волькенуа И.М., Зейлигер А.Н., Хабачев Л.Д. Экономика формирования электроэнергетических систем. М.: Энергия, 1981. 320 с.
- [3] Зейлигер А.Н., Малкин П.А., Хабачев Л.Д. Вопросы обоснования развития межрегиональных и межгосударственных сетевых связей // Энергетическое строительство. 1994. № 3. С. 2–4.
- [4] Воропай Н.И., Ершевич В.В., Руденко Ю.Н. Развитие межнациональных энергообъединений – путь к созданию мировой электроэнергетической системы. Иркутск, 1995. 28 с. (Препринт СЭИ СО РАН, 1995; № 10).
- [5] Yoon J.Y., Park D.W. Economic Analysis Methodology of Power System Interconnections considering conventional economic benefits and environmental effects URL: [http://www.icee-con.org/papers/2002/papers/VolNo.1/1\\_pso/ps050.pdf](http://www.icee-con.org/papers/2002/papers/VolNo.1/1_pso/ps050.pdf) (дата обращения: 10.10.2012).
- [6] Chung K.-H., Kim B. H. Economic Feasibility on the Interconnected Electric Power Systems in North-East Asia URL: <http://www.jeet.or.kr/lkpsweb/pub/pubfpfile.aspx?ppseq=367> (дата обращения: 25.09.2012).
- [7] Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1983. 456 с.
- [8] Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1982. 319 с.
- [9] Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск: Наука, 1973. 276 с.
- [10] Методы и модели согласования иерархических решений / под ред. А.А. Макарова. Новосибирск: Наука, 1979. 240 с.
- [11] Методические основы разработки перспектив развития электроэнергетики / А.А. Макаров [и др.]. М.: ИНЭИ РАН, 2007. 103 с.
- [12] Исследование эффективности межгосударственных электрических связей в Северо-Восточной Азии с применением математического моделирования / Л.С. Беляев [и др.] // Изв. РАН. Энергетика. 2000. № 5. С. 55–65.
- [13] Системный подход при управлении развитием электроэнергетики / Л.С. Беляев [и др.] / под ред. Л.С. Беляева, Ю.Н. Руденко. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.
- [14] Макарова А.С., Соколов А.Д., Санеев Б.Г. Метод согласования двухуровневой иерархии линейных моделей в условиях неопределенности // Иерархия в больших системах энергетики. Иркутск: СЭИ СО РАН СССР, 1978. Т. 2. С. 173–191.
- [15] Санеев Б.Г. Энергетическая кооперация России и стран Северо-Восточной Азии // Регион: экономика и социология. 2004. № 1. С. 136–144.
- [16] Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Оценка конкурентоспособности электростанций // Электрические станции. 2009. № 6. С. 22–26.
- [17] Смирнов В.А. Проблемы повышения гибкости в энергетике. М.: Наука, 1989.
- [18] Шевчук Л.М., Лукьянов А.С., Кудрявцев А.А. Риск-анализ в задачах стратегического планирования для крупных энергетических компаний // Изв. РАН. Энергетика. 2000. № 2. С. 52–64.
- [19] Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности (теория ожидаемого эффекта). М.: Наука, 2002. 182 с.
- [20] Лагерев А.В., Ханаева В.Н., Смирнов К.С. Приоритеты и перспективы развития электроэнергетики Восточной Сибири // Энергетик. 2011. № 8. С. 2–7.
- [21] Лагерев А.В., Ханаева В.Н., Смирнов К.С. Об обеспечении возможного экспорта электроэнергии из России в Китай // Энергетик. 2009. № 11. С. 4–6.
- [22] Лагерев А.В., Ханаева В.Н., Смирнов К.С. Перспективы развития электроэнергетики Дальнего Востока // Энергетик. 2011. № 11. С. 17–21.

# ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОБЪЕКТОВ КОГЕНЕРАЦИИ

Смирнова С.В.  
Филиал АО «СО ЕЭС» Тульское РДУ  
Тула, Россия  
smirnovasv@tula.so-ups.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Важной предпосылкой для развития когенерации в РФ является большое количество котельных суммарной мощностью около 450 тыс. Гкал/ч, из которых примерно 75 % – газовые, пригодные для преобразования в мини-ТЭЦ. При этом базой для когенерации может служить лишь половина из них, так как из-за падения промышленного производства котельные существенно недогружены, более 55 % основных фондов котельных изношены и требуют незамедлительной замены. В городе Тула в период с 2018 по 2023 год предполагается реконструкция восьми котельных суммарной установленной мощностью 54,2 Гкал с увеличением мощности до 85,3 Гкал. Использование когенерационных установок для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии значительно повысит коэффициент полезного действия и коэффициент использования топлива котельной.

**Материалы и методы:** Проведен анализ целесообразности интеграции когенерационных установок для параллельной выработки электрической и тепловой энергии на базе котельных города Тулы, реконструируемых с 2019 по 2023 г.

**Результаты:** Определен объем выработки электрической энергии когенерационными установками при параллельной выработке с тепловой энергией и срок окупаемости когенерационных установок при установке их на реконструируемые котельные города Тула.

**Выводы:** Наиболее эффективная работа когенерационной установки достигается путем использования максимальной тепловой и электрической мощностей, поэтому применение комбинированной выработки целесообразно при наличии потребителя с постоянной круглогодичной потребностью в электрической и тепловой энергии, например промышленные предприятия. Бытовой сектор имеет пиковый график потребления, поэтому для покрытия их потребности в электроэнергии и тепле в базовой части тепловой нагрузки котельной рационально использовать КГУ, а пиковые нагрузки будут покрываться водогрейными котлами.

**Ключевые слова:** энергетика, когенерация, энергоэффективность.

## ORGANIZATION OF HEAT SUPPLY OF CONSUMERS FOR THE ACCOUNT OF OBJECTS OF COGENERATION

S. Smirnova  
System Operator of the Unified Power System  
Tula, Russian Federation  
smirnovasv@tula.so-ups.ru

## Abstract

**Background:** An important prerequisite for the development of cogeneration in the Russian Federation is a large number of boilers with a total capacity of about 450 thousand Gcal/h of which about 75 % – gas – suitable for conversion to mini combined heat and power unit. At the same time, only half of them can serve as a base for cogeneration, because due to the fall in industrial production, boiler houses are substantially under-utilized, more than 55% of the boiler capital assets are worn out and require immediate replacement. In the city of Tula in the period from 2018 to 2023, it is planned to reconstruct eight boiler houses with a total installed capacity of 54.2 Gcal with an increase in power to 85.3 Gcal. The use of cogeneration plants for combined generation of electrical energy and heat will significantly increase the efficiency and fuel efficiency of the boiler house.

**Materials and methods:** Analysis of the benefits from the installation of cogeneration equipment in the boiler houses of the city of Tula. Reconstruction of boiler houses will be held between 2019 and 2023.

**Results:** The volume of electric energy received by cogeneration equipment is determined. The payback period of cogeneration equipment installed in the reconstructed boiler houses of the city of Tula was determined.

**Conclusions:** The most efficient operation of the cogeneration plant is achieved through the use of maximum heat and electric power, so the use of combined production is advisable in the presence of a consumer with a constant year-round need for electrical and thermal energy, for example, industrial enterprises. The household sector has a peak consumption schedule, so to cover their electricity and heat demand in the basic part of the boiler's heat load, it is rational to use cogeneration equipment, and peak loads will cover hot water boilers.

**Key words:** energy, cogeneration, energy efficiency.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность вопроса развития распределенной генерации – источников электрической и/или тепловой энергии, которые располагаются в непосредственной близости к потребителям, – неизменно растет, что является отражением общемировой тенденции. Об этом свидетельствует как увеличение импорта в Россию оборудования малой генерации, так и неравномерное распределение энергодефицитных объектов. При этом сохраняется тенденция увеличения стоимости электроэнергии, а также тарифные диспропорции, обусловленные незавершенностью формирования мер государственного управления и стимулирования развития малой энергетики. Сохраняется потребность в замещении изношенных мощностей, которые на настоящий момент превышают 60 % эксплуатирующегося оборудования, а также рост потребления энергии при ограниченной пропускной способности сетей [1].

Одной из разновидностью распределенной генерации является когенерация.

Название «когенерация» произошло от слов «комбинированная генерация», то есть это процесс, при котором одновременно вырабатывается электроэнергия и тепло.

При использовании эффекта когенерации существенно возрастает общий коэффициент использования топлива, что в значительной степени сокращает затраты на топливо.

Когенерационная установка (далее – КГУ) состоит из силового агрегата, электрического генератора, теплообменника и системы управления.

Применение электростанций с технологией когенерации в мегаполисах позволяет эффективно дополнять рынок энергоснабжения без реконструкции сетей. При этом значительно улучшается качество электрической и тепловой энергий. Автономная работа когенераторной установки позволяет обеспечить потребителей электроэнергией с устойчивыми параметрами по частоте и по напряжению, тепловой энергией со стабильными параметрами по температуре.

Потенциальными объектами для применения КГУ в России выступают промышленные производства, больницы, объекты жилищной сферы, газоперекачивающие станции, компрессорные станции, котельные и т. д.

В результате внедрения когенераторных электростанций возможно решение проблемы обеспечения потребителей недорогим теплом и электроэнергией без дополнительного, затратного, строительства новых линий электропередачи и теплотрасс.

Приближенность источников к потребителям позволит значительно снизить потери при передаче энергии и улучшить ее качество, а значит и повысить коэффициент использования энергии топлива.

## II. КОТЕЛЬНЫЕ ГОРОДА ТУЛА, РЕКОНСТРУИРУЕМЫЕ в 2019–2023 гг.

В городе Тула имеется более ста котельных, работающих на газе, из них 8 котельных будут реконструированы по плану до 2023 г.

По своей мощности и типу оборудования котельные подходят для преобразования в мини-ТЭЦ на базе газопоршневых установок (ГПУ).

ГПУ предназначены для производства электричества и дешевой тепловой энергии (рис. 1).



Рис. 1 – Внешний вид ГПУ

Среди типов силовых агрегатов ГПУ отличает простота, надежность конструкции и самый высокий электрический КПД, который при работе на российском природном газе составляет примерно 41–44 % (значение параметра зависит от фирмы-изготовителя ГПУ).

Соотношение выдачи двух видов энергий при работе газопоршневой электростанции на номинальном режиме составляет 1:1, т. е. на 1 МВт установленной электрической мощности можно получать 1 МВт тепловой энергии. При необходимости возможно получение и промышленного пара.

В газопоршневых электростанциях отбор тепловой энергии происходит от масляного радиатора, а также от системы охлаждения двигателя. Температура выхлопных газов на выходе из двигателя ГПУ около  $390 \pm 30^\circ \text{C}$ . Такая температура на выходе позволяет отдавать достаточно высокие объемы тепловой энергии.

ГПУ широко представлены однотопливными дизельными двигателями единичной электрической мощностью от 0,05 до 17–20 МВт, работающими на дизельном топливе, мазуте, сырой нефти.

Существуют ГПУ, работающие на двух видах топлива: природный газ и дизельное топливо. Это позволяет значительно повысить безопасность и надежность автономного энергоснабжения. Дизельное топливо, мазут или сырая нефть могут использоваться как второе топливо.

Минимальное давление подачи топливного газа на входе в газопоршневую станцию, во избежание дерейтинга, варьируется от 0,05 до 5,5 бар в зависимости от мощности и фирмы-изготовителя ГПЭС.

Способность ГПУ работать с низким давлением газа выгодно отличает их от микротурбин и газовых турбин, для работы которых необходим мощный, дорогостоящий компрессор, в свою очередь сам потребляющий значительные количества энергии и топлива.

Стоимость капитального ремонта ГПУ составляет приблизительно 30 % от первоначальных затрат на приобретение силового оборудования. Такой ремонт нужен через 7–8 лет непрерывной эксплуатации.

Перечень реконструируемых котельных с установленной мощностью до и после реконструкции приведен в табл. I (P1 и P2 – соответственно мощности до и после реконструкции).

Текущий вариант реконструкции предполагает установку чисто теплового оборудования [2], которое в значительной степени уступает по своей энергоэффективности когенерационным установкам, которые находят широкое применение в энергоснабжении промышленных предприятий.

Большая энергоэффективность КГУ обуславливается совместной выработкой электроэнергии и тепла, а также тем, что полученную тепловую и электрическую энергию не нужно передавать на большие расстояния, так как генерирующая установка территориально расположена рядом с потребителем.

Таблица I – Перечень реконструируемых котельных города Тула с установленной мощностью до и после реконструкции

№	Наименование	Год реконструкции	P1, Гкал	P2, Гкал
1	Котельная «Дм. Ульянова, 23»	2022	2,58	2,06
2	Котельная «Психиатрическая больница»	2022	5,02	3,87
3	Котельная «Кв. Н»	2019	6,28	20,64
4	Котельная «Платоновский лес»	2019	2,45	6,45
5	Котельная «Кв. 31»	2019	7,8	25,8
6	Котельная «п. II Западный»	2022	8,09	6,88
7	Котельная «ДСУ-1»	2023	2,65	1,55
8	Котельная «Ю. Фучика»	2019	19,3	18,06

На котельных малой мощности (менее 3 мВт) целесообразна установка микротурбин (рис. 2).



Рис. 2 – Внешний вид микротурбинной установки ТА-100RCHP

Микротурбина – это электростанция с очень низким уровнем вредных выбросов, не требующая больших расходов на эксплуатацию и обслуживание. Минимальная электрическая мощность микротурбины – 30 кВт.

Микротурбины легко объединяются в кластер – единую энергетическую систему. Кластер из микротурбин позволяет вырабатывать значительную мощность – до 10 МВт. Микротурбинные установки безупречно приспособлены для работы с неравномерными нагрузками. При снижении электрической нагрузки в ночное время микротурбины способны в течение длительного времени работать с мощностью 1 %, без какого-либо снижения ресурса эксплуатации. Эта инновационная особенность позволила применять микротурбины для автономного энергоснабжения жилых домов, торговых центров, офисных сооружений, бассейнов, больниц, предприятий общественного питания. Также легко микротурбина справляется и с пиковыми нагрузками [3].

Микротурбины надежно работают с топливом широкого спектра: природный газ с любым давлением, биогаз, попутный нефтяной газ с высоким содержанием серы, дизельное топливо, сжиженный газ – пропан, другие виды топлива.

### III. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ЗАМЕНЫ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ГПУ

При оценке общего потенциала реконструируемых котельных, средняя тепловая мощность одной котельной составила 13,6 Гкал/ч, следовательно, на ней можно установить шесть немецких ГПА Deutz TBG620V12K×6 электрической мощностью 1,022 МВт. Общая электрическая мощность всех восьми котельных с ГПА в среднем составит 49,056 МВт/ч.

Для сравнения было оценено электропотребление нескольких городов исходя из среднего объема потребления электроэнергии на душу населения без учёта промышленности. Таким образом, электрической мощности восьми котельных с КГУ будет достаточно для покрытия потребности в электроэнергии 80 % такого города, как Тула, или полностью покрыть потребность в электроэнергии такого города, как Калуга, или трех городов, таких как Новомосковск. Данные по потреблению электроэнергии сравнимых городов приведены в табл. II.

Таблица II – Суточное потребление электроэнергии населением трех городов

Город	Численность населения	Среднее потребление электроэнергии на человека в сутки, кВт·ч	Потребление электроэнергии населением в сутки, мВт·ч
Тула	485 221	3	1456
Калуга	125 647		377
Новомосковск	341 892		1026

Для определения примерного срока окупаемости оборудования необходимо знать стоимость используемых КГУ, выдаваемую ими электрическую мощность, посчитать получаемую электроэнергию из расчета того, что КГУ будут работать на максимум нагрузки в течение года (так как при меньшей нагрузке значительно сокращается КПД КГУ).

Так как анализируемые реконструируемые котельные большей частью ориентированы на выдачу электрической и тепловой энергии бытовому сектору, имеющему пиковый график нагрузки, то КГУ будет нести базовую нагрузку потребления, что соответствует порядка 45 % от пиковой нагрузки. Пиковые нагрузки в течение года будут покрываться за счет водогрейных котлов.

Расчет проводился с использованием газопоршневых агрегатов (ГПА) фирмы Deutz. Удельная цена ГПА составляет порядка 1 300 долл. США/кВт или 80,6 тыс. руб./кВт. Таким образом, из расчетов следует, что цена покупки когенерационного оборудования на реконструируемые котельные составит около 3 млрд руб.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расчете примерного срока окупаемости установки КГУ на реконструируемых котельных города Тулы были использованы данные по тепловой энергии с учетом положительной динамики роста цен на продажу тепла [2].

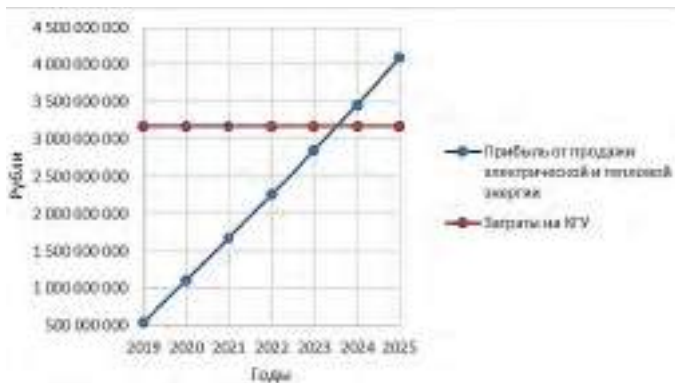


Рис. 3 – График срока окупаемости КГУ

Для приблизительного расчета прибыли от продажи электрической энергии были использованы усредненные величины цен на продаваемую электроэнергию одной из электростанций города Тула.

В соответствии с расчетом приблизительный срок окупаемости КГУ на базе реконструируемых котельных составляет менее 6 лет (рис. 3). С учетом технического обслуживания оборудования, издержек на уплату налогов и прочих расходов срок окупаемости увеличится на 2–3 года.

Подводя итоги, следует отметить, что развитие когенерации будет способствовать снижению потребностей во вводах новых генерирующих мощностей на крупных ТЭС, сокращению объемов нового электросетевого строительства, уменьшению потерь в электрических сетях. КГУ имеют преимущества в части сроков сооружения и заблаговременности инвестиций по сравнению с крупными ТЭС [4]. Массовое внедрение КГУ позволит, как отмечалось, улучшить условия прохождения в электроэнергетической системе зимних максимумов электрической нагрузки.

Следует отметить, что низкая достоверность и противоречивость информации о перспективных значениях удельных капиталовложений и эксплуатационных расходов в мини-ТЭЦ, цен на приобретаемое топливо и реализуемую электрическую и тепловую энергию, непостоянство нормативно-правовой базы обуславливают существенную неопределенность оценок экономической эффективности реализации инвестиционных проектов реконструкции котельных в мини-ТЭЦ и высокие риски при принятии соответствующих решений.

В дальнейшей перспективе рост и развитие когенерации будут стимулировать потребность в большом количестве ГПУ и ГТУ малой и средней мощности. Для реализации программы по применению КГУ в энергетике может быть востребовано (ориентировочно) 20 тыс. микротурбин единичной мощностью до 200–300 кВт, порядка 6 тыс. ГПУ мощностью 1–8 МВт и примерно 2 тыс. ГТУ мощностью 6–16 МВт. В денежном выражении емкость рынка КГУ в стране превышает 1,8 трлн руб. или 180 млрд руб. в год при реализации программы реконструкции газовых котельных и превращения их в мини-ТЭЦ за 10 лет [5]. Реализация программы реконструкции котельных в мини-ТЭЦ, ориентированная на применение отечественного оборудования, может обеспечить получение значительных мультипликативных эффектов в смежных отраслях экономики страны, в том числе станет толчком к существенному развитию отечественного энергомашиностроения.

#### Список литературы

- [1] Наукovedение: интернет-журнал [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/>
- [2] Актуализация схемы теплоснабжения муниципального образования город Тула на период до 2034 года.
- [3] Новая Генерация [Официальный сайт]. URL: <http://www.manbw.ru/>
- [4] ГК «РосЭнергоИнжиниринг» [Официальный сайт]. URL: <http://www.ros-energy.ru/>
- [5] Научная электронная библиотека «eLIBRARY.RU» [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/>

# МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Снегирев Д.А., Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И., Дубайлова В.В.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия  
den\_snegirev@mail.ru, s.a.eroshenko@urfu.ru, a.i.khaliasmaa@urfu.ru, lera35110@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Работа крупных солнечных электростанций параллельно с энергосистемой вызывает трудности при решении задач планирования электроэнергетических режимов. Основной причиной их является резкопеременный и непостоянный характер солнечной энергии. Обеспечение возможности прогнозирования выработки солнечных электростанций на соответствующем горизонте краткосрочного прогнозирования позволит обеспечить экономическую эффективность интеграции фотоэлектростанций в ЕЭС России.

**Материалы и методы:** В качестве объекта исследования рассмотрена находящаяся в промышленной эксплуатации солнечная электростанция. При разработке алгоритмов использованы методы математического моделирования.

**Результаты:** Определены характеристики для оценки точности прогноза параметров солнечного излучения. Выбран оптимальный состав наиболее значимых признаков, учитываемых при краткосрочном прогнозировании. Получена оценка точности моделей краткосрочного прогнозирования.

**Выводы:** Разработана регрессионная модель для реализации краткосрочного прогнозирования по ретроспективной информации для оценки параметров солнечного излучения «на сутки вперед». Результаты верификации на реальных данных позволяют судить о применимости предложенных моделей в условиях промышленной эксплуатации.

**Ключевые слова:** прогнозирование выработки электроэнергии, солнечные электростанции, краткосрочное прогнозирование, возобновляемые источники энергии.

## SHORT-TERM PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS GENERATION FORECASTING MODELS

D. Snegirev, S. Eroshenko, A. Khalyasmaa, V. Dubailova  
Autonomous Educational Institution of Higher Education  
“Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin”  
Ekaterinburg, Russian Federation  
den\_snegirev@mail.ru, s.a.eroshenko@urfu.ru, a.i.khaliasmaa@urfu.ru, lera35110@gmail.com

## Abstract

**Background:** The synchronous operation of large solar power plants as part of the power system introduces significant challenges in terms of electric power regimes planning. The most concerning issue is the sharply variable and unstable nature of solar energy. Ensuring the possibility of forecasting the production of solar power plants on the appropriate prediction horizon of short-term forecasting will provide the economic efficiency of photovoltaic plants integration in the UPS of Russia.

**Materials and Methods:** Industrial solar power plant is considered as an object of investigation. Mathematical modeling techniques are used for developing algorithms.

**Results:** Metrics were determined to estimate the accuracy of the solar radiation parameters forecast. The optimal composition of the most substantial factors is chosen for short-term forecasting. The accuracy estimation of short-term forecasting algorithms was received.

**Conclusions:** A regression model has been developed to implement short-term forecasting based on retrospective information for estimating solar radiation parameters “for the day ahead” forecasting. The results of the verification on real data allow deciding on the applicability of the proposed methods in industrial operation.

**Key words:** forecasting of electricity generation, solar power plants, short-term forecasting, renewable energy sources.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрические солнечные электростанции (СЭС) занимают все более высокую долю в составе генерирующего оборудования по всему миру, растут и установленная мощность такого рода станций в ЕЭС России. Обеспечение работы крупных солнечных электростанций параллельно с энергосистемой требует решения задачи прогнозирования выработки при планировании электроэнергетических режимов. Точное прогнозирование позволяет достигнуть

экономически эффективной работы СЭС при определении плановых объемов производства для нужд ОРЭМ. Кроме того, за счет снижения суммарной неопределенности при составлении прогнозных балансов обеспечивается снижение дополнительных расходов на обеспечение резервов мощности.

Поскольку выходная мощность фотоэлектростанций напрямую связана с энергией солнечного излучения, доходящей до поверхности земли, прогнозирование этой

величины также в равной степени важно для обеспечения интеграции СЭС в состав энергосистемы. Из-за хаотичной природы атмосферных условий точное прогнозирование солнечной энергии может быть крайне сложным [1, 2].

## II. ОСОБЕННОСТИ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

### А. Выбор прогнозируемого параметра

Для оценки изменения плотности потока солнечного излучения при его прохождении через атмосферу земли используется коэффициент прозрачности  $\bar{k}_T$  [3, 4]:

$$\bar{k}_T = \frac{\bar{G}}{\bar{G}_0}, \quad (1)$$

где  $\bar{k}_T$  – коэффициент прозрачности, о. е. (значения находятся в диапазоне от 0 до 1);  $\bar{G}$  – измеренная плотность потока энергии солнечного излучения у поверхности земли, падающего на горизонтальную поверхность, кВт/м<sup>2</sup>;  $\bar{G}_0$  – расчетная плотность потока энергии солнечного излучения на границе атмосферы (здесь и далее верхнее подчеркивание величины означает усредненное значение в рамках заданного временного шага), кВт/м<sup>2</sup>.

Использование именно коэффициента прозрачности в качестве отклика при построении статистических моделей, а не плотности потока энергии солнечного излучения у поверхности земли  $\bar{G}$ , обладает рядом преимуществ. Среди них: возможность проверки достоверности измеренных значений  $\bar{G}$ , которые физически не могут превышать теоретический предел  $\bar{G}_0$ ; обеспечение нормализации прогнозируемого временного ряда, что позволяет судить о значимости рассматриваемых факторов по величине соответствующих регрессионных коэффициентов. Прогнозирование же именно параметров солнечного излучения, а не непосредственно выработки станции  $\bar{P}$ , позволяет исключить из прогнозируемой величины те составляющие, которые могут быть описаны достаточно точными физическими моделям (поведение фотоэлектрической панели и инвертора). Описываются лишь те явления, которые сложно описать физическими зависимостями (поглощение солнечного излучения озоном, пылью, молекулами воздуха, водяного пара, облачным покровом, а также отражение части излучения в космическое пространство).

### В. Объект исследования и состав исходных данных

В качестве объекта исследования выбрана СЭС Заводская, расположенная в Астраханской области (46°23'55" с. ш. 48°30'56" в. д.), установленная мощность составляет 15 МВт. Электростанция расположена в 1-й ценовой зоне, осуществляет поставку электроэнергии на ОРЭМ с 1 сентября 2017 г.

Для верификации моделей прогнозирования были рассмотрены данные за определенный промежуток времени: с 3 октября 2017 г. по 18 декабря 2017 г. (всего 1848 наблюдений). Состав и источники этих данных представлены в табл. I.

Исходная выборка наблюдений включала как дневные, так и ночные часы. При построении модели прогнозирования коэффициента прозрачности эти данные должны быть подвергнуты фильтрации согласно следующим критериям:

$$\bar{\alpha} > 0; \quad (2)$$

$$0 < \bar{k}_T \leq 1. \quad (3)$$

Таблица I – ПЕРЕЧЕНЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Источник	Данные	Обозначения	Единицы измерения
Дорасчет по локальным измерениям $\bar{G}$	Коэффициент прозрачности	$\bar{k}_T$	о. е.
Расчет	Угол высоты Солнца	$\bar{\alpha}$	град
Метеопровайдер	Облачность	$cc$	о. е.
Локальные измерения	Температура воздуха	$T_a$	°C
Метеопровайдер	Влажность воздуха	$RH$	о. е.
Локальные измерения	Скорость ветра	$WS$	м/с

Выражение (2) призвано отфильтровать выборку наблюдений от тех, которые относятся к ночному времени суток. Выражение (3) призвано очистить выборку от заведомо ложных значений  $\bar{k}_T$ , которые возникают как в результате возможных неточных пиранометрических измерений  $\bar{G}$ , так и в результате несовершенства исходной модели расчета  $\bar{G}_0$ .

## III. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ОШИБКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для анализа моделей краткосрочного прогнозирования коэффициента прозрачности предлагаются два основных критерия: средняя абсолютная ошибка в процентах  $MAPE$  и нормализованный корень из среднеквадратичной ошибки  $NRMSE$  [5].

Было установлено, что для статистической оценки значимости и сравнительного анализа эффективности моделей прогнозирования солнечной энергии использование критериев оценки ошибки  $MAPE$  и  $NRMSE$  в традиционном виде, как при анализе временных рядов, невозможно. При работе с наблюдениями коэффициента прозрачности в качестве стационарной величины, относительно которой будут рассчитываться критерии ошибки, предлагается максимально возможное теоретическое значение коэффициента прозрачности, при котором солнечное излучение на поверхности земли  $\bar{G}$  равно солнечному излучению на границе атмосферы  $\bar{G}_0$ , т. е.  $k_T^{\max} = 1$ .

Таким образом, выражения для расчета критериев ошибки  $MAPE$  и  $NRMSE$  принимают вид:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\bar{k}_{T_i}^{\text{факт}} - \bar{k}_{T_i}^{\text{пр}}}{\bar{k}_T^{\max}} \right| \cdot 100 \%, \quad (4)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{k}_{T_i}^{\text{факт}} - \bar{k}_{T_i}^{\text{пр}})^2}{\bar{k}_T^{\max}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $MAPE$  – средняя абсолютная ошибка, %;  $N$  – количество рассматриваемых наблюдений;  $i$  – номер наблюдения;  $\bar{k}_{T_i}^{\text{факт}}$  – фактическое значение коэффициента прозрачности  $i$ -го наблюдения, о. е.;  $\bar{k}_{T_i}^{\text{пр}}$  – спрогнозированное значение коэффициента прозрачности  $i$ -го наблюдения, о. е.;  $\bar{k}_T^{\max}$  – максимальное теоретическое значение коэффициента прозрачности, о. е.

#### IV. МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

##### A. Методика простояния математической модели

При построении математической модели для определения связи между некоторой характеристикой наблюдаемого явления (отклик) и величинами (признаками), которые обуславливают, объясняют изменения, используется регрессионный анализ [6, 7].

Переменная  $\bar{k}_T$  в данном случае будет являться зависимой переменной, а в качестве влияющих переменных могут быть использованы как сами величины, представленные в табл. I, так и их комбинации. В табл. II представлены все предикторы с кратким обоснованием их использования.

Таблица II – ПРЕДИКТОРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В СОСТАВЕ МОДЕЛЕЙ

Источник	Данные
Свободный член	Учитывает совокупность факторов, которые оказывают влияние на коэффициент прозрачности, но не рассмотрены в рамках моделей
$cc$ и $\sin \bar{\alpha}$	Комбинация признаков моделирует положение облачного покрова относительно направления падения излучения
$cc$	Моделирует влияние облачности на поведение солнечного излучения в облачном покрове
$\sin \bar{\alpha}$	Моделирует периодическое поведение коэффициента прозрачности в течение суток
$T_a$	Моделирует влияние динамики изменения температуры на пропускную способность атмосферы
$RH$	Учитывает влияние водяного пара в составе атмосферы на поведение солнечного излучения
$WS$	Учитывает влияние движения воздушных масс на поведение солнечного излучения

В качестве референсной модели для сравнительного анализа была использована линейная регрессионная модель следующего вида [8]:

$$\bar{k}_T = b_1 + b_2 \cdot cc, \quad (6)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – регрессионные коэффициенты.

Результаты анализа развития исходной модели прогнозирования коэффициента прозрачности представлены в табл. III. Наиболее точной моделью оказалась та, которая использует наибольшее число признаков. При этом велика вероятность, что такого рода модель при расчете коэффициентов регрессии может составить несовместную или плохо обусловленную систему линейных уравнений.

Анализ развития референской модели в табл. III позволяет определить наиболее оптимальную модель по соотношению количество признаков/снижение ошибки:

$$\begin{aligned} \bar{k}_T = & b_1 + b_2 \cdot cc \cdot \sin \bar{\alpha} + b_3 \cdot cc^2 \cdot \sin \bar{\alpha} + b_4 \cdot cc + b_5 \cdot cc^2 + \\ & + b_6 \cdot \sin \bar{\alpha} + b_7 \cdot (\sin \bar{\alpha})^2 + b_8 \cdot cc \cdot (\sin \bar{\alpha})^2 + \\ & + b_9 \cdot cc^2 \cdot (\sin \bar{\alpha})^2 + b_{10} \cdot cc^3 + b_{11} \cdot (\sin \bar{\alpha})^3 + b_{12} \cdot RH. \quad (7) \end{aligned}$$

##### B. Методы корректировки выборки для повышения точности прогнозирования

Для повышения точности прогноза возможно использование эмпирической кластеризации выборки по диапазонам угловой высоты Солнца  $\bar{\alpha}$ . Для каждого диапазона рассчитываются свои коэффициенты регрессии, затем внутри этого диапазона рассчитываются прогнозные значения коэффициента прозрачности. В качестве рекомендуемых условий с целью избегания чрезмерной подгонки используемой функции к входным данным при разделении выборки предлагается:

1. Последовательное разделение доступного диапазона на равные доли.

2. При достижении меньшего, чем одна четвертая (около 200 в рассматриваемой выборке), количества наблюдений в подвыборке, при делении на равные доли, дальнейшее деление подвыборки останавливается.

Блок-схема данных условий приведена на рис. 1. Результаты эмпирической кластеризации для оптимальной модели представлены в табл. III.

Таблица III – АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИСХОДНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

№	Характеристики моделей	Критерии оценки ошибки		Снижение ошибки		Кол-во признаков
		MAPE, %	NRMSE, %	$\Delta$ MAPE, %	$\Delta$ NRMSE, %	
1	Референсная модель	14,912	18,479	–	–	2
2	Дополнительный учет различных комбинации произведений $cc$ , $\sin \bar{\alpha}$	13,986	17,144	0,926	1,335	3
3	Дополнительный учет $\sin \alpha$	12,438	16,031	1,548	1,113	4
4	Дополнительный учет $cc^2$ , $(\sin \bar{\alpha})^2$	12,242	15,943	0,196	0,088	6
5	Дополнительный учет комбинаций произведений $cc$ , $(\sin \bar{\alpha})$ , $cc^2$ , $(\sin \bar{\alpha})^2$	12,092	15,768	0,150	0,175	9
6	Дополнительный учет $cc^3$ , $(\sin \bar{\alpha})^3$	11,782	15,454	0,310	0,314	11
7	Дополнительный учет комбинаций произведений $cc$ , $(\sin \bar{\alpha})$ , $cc^2$ , $(\sin \bar{\alpha})^2$ , $cc^3$ , $(\sin \bar{\alpha})^3$	11,766	15,414	0,016	0,040	16
8	Дополнительный учет $cc^4$ , $(\sin \bar{\alpha})^4$	11,752	15,371	0,014	0,043	18
9	Дополнительный учет $e^{cc \cdot \sin \bar{\alpha}}$	11,724	15,356	0,028	0,015	19
10	Дополнительный учет $T_a$	11,719	15,356	0,005	0,000	20
11	Дополнительный учет $RH$	11,477	15,080	0,247	0,276	21
12	Дополнительный учет $WS$	11,703	15,324	0,021	0,032	22
13	Эмпирическая кластеризация модели оптимальной модели: $0^\circ-5^\circ$ ( $N = 158$ ), $5^\circ-10^\circ$ ( $N = 73$ ), $10^\circ-15^\circ$ ( $N = 115$ ), $15^\circ-20^\circ$ ( $N = 151$ ), $20^\circ-25^\circ$ ( $N = 143$ ), $20^\circ-25^\circ$ ( $N = 143$ ), $25^\circ-30^\circ$ ( $N = 82$ ), $30^\circ-40^\circ$ ( $N = 70$ ).	10,990	14,555	0,713	0,769	13

## В. Выводы

Результаты верификации предложенных моделей позволяют судить об их применимости для краткосрочного прогнозирования коэффициента прозрачности, а значит и выработки СЭС.

Дальнейшее повышение точности прогноза возможно при использовании более интеллектуальных математических методов, таких как искусственные нейронные сети, бустинг, генетические алгоритмы и т. д.

Также корректировка ошибок краткосрочного прогноза может быть осуществлена в рамках оперативного прогноза за счет использования данных текущих измерений, что позволит обеспечить эффективную работу СЭС на балансирующем рынке.

## Список литературы

- [1] Особенности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными электростанциями / Д.А. Снегирев [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: науч. тр. VIII Междунар. молод. науч.-техн. конф. Самара, 2017. Т. 3. С. 139–142.
- [2] Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И., Снегирев Д.А. Подходы к прогнозированию плотности потока энергии солнечного излучения для СЭС // Энергоэксперт. 2017. № 5. С. 28–31.
- [3] Functional assessment system of solar power plant energy production / D.A. Snegirev [et al.] // International Conference on Energy and Environment (CIEM). Bucharest, 2017. P. 349–353.
- [4] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. University of Wisconsin-Madison, 2013. 928 c.
- [5] J. Zhang et al. Metrics for evaluating the accuracy of solar power forecasting, in Proceedings of 3<sup>rd</sup> International workshop on integration of solar power into power systems. London, 2013. P. 1–8.
- [6] Снегирев Д.А., Ерошенко С.А., Валиев Р.Т., Хальясмаа А.И. Возможности алгоритмической реализации краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2017). СПб., 2017. № 1. С. 33–36.
- [7] Algorithmic realization of short-term solar power plant output forecasting / D.A. Snegirev [et al.] // IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). Bucharest, 2017. P. 349–353.
- [8] W.D. Turner, Abdulaziz Mujahid. The Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using a Cloud Cover Model Developed at Blytheville, Arkansas // Journal of Climate and applied meteorology. 1984. № 23. С. 781–786.



Рис. 1 – Блок-схема эмпирической кластеризации по диапазонам  $\alpha$

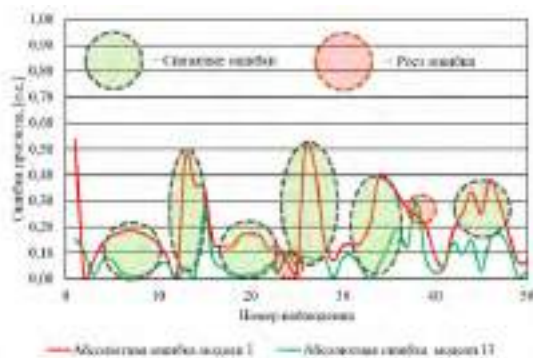


Рис. 2 – Сравнение абсолютных ошибок моделей 1 и 13 с 7:00 3 октября 2017 г. до 18:00 6 октября 2017 г.

На рис. 2 отображено, как за счет учета дополнительных признаков и их комбинаций, а также использования эмпирической кластеризации, снижается ошибка в определении коэффициента прозрачности. При этом возникают и ситуации, приводящие к незначительному росту абсолютной ошибки.

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ИЗОЛИРОВАННОЙ МИКРОСЕТИ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Солдусова Е.О.<sup>1</sup>, Проничев А.В.<sup>1</sup>, Шишков Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Самара, Россия

<sup>2</sup>филиал ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске

Новокуйбышевск, Россия

esoldusova@inbox.ru, teyoma@bk.ru, e.m.shishkov@ieee.org

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Одним из перспективных направлений для поиска решений задач управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в электроэнергетических системах является применение технологий распределённого реестра – Blockchain, что обусловлено повышением доступности возобновляемых источников энергии. В настоящее время в РФ ввиду законодательных ограничений, налагаемых на операции на розничном и оптовых рынках электроэнергии, применение технологии Blockchain затруднено для энергосистем, работающих параллельно с региональными или объединёнными энергосистемами, однако основанные на технологиях распределённого реестра принципы функционирования рынка электрической энергии возможно применить в рамках небольших изолированных энергосистем – микрогридов. На данный момент 2/3 территории Российской Федерации находится в зоне децентрализованного и автономного электроснабжения. На ней проживают около 25 млн человек.

**Материалы и методы:** Математическое моделирование и расчет электрических режимов микрогрида были произведены в ПК RastrWin3 с целью учета потерь в электроэнергетической системе. Были написаны программы для программируемого реле ОВЕН в среде OWEN Logic, которые реализуют автоматизированное управление режимом микросети.

**Выводы:** Использование распределённой генерации в малых изолированных энергосистемах является экономически оправданным: срок окупаемости устройств распределённой генерации значительно меньше срока их эксплуатации. Увеличение числа участников микрогрида приводит к значительному снижению установленной мощности генерации, и, следовательно, её стоимости. Для организации взаиморасчётов между собственниками объектов малой генерации в микрогриде возможно применение технологии распределённого реестра. Рассматриваемая система взаиморасчётов хорошо масштабируется и может быть применена не только в рамках микрогрида, но и при объединении нескольких микрогридов в единую сеть.

**Ключевые слова:** блокчейн, микрогрид, солнечная энергетика, распределённая генерация.

# CONTROL SYSTEM FOR STATES OF ISOLATED MICROGRID WITH DISTRIBUTED GENERATION

Elena Soldusova<sup>1</sup>, Artem Pronichev<sup>1</sup>, Evgeniy Shishkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Novokuybyshevsk Branch of Samara State Technical University

Novokuybyshevsk, Russian Federation

esoldusova@inbox.ru, teyoma@bk.ru, e.m.shishkov@ieee.org

## Abstract

**Background:** One of the promising directions for finding solutions to the problems of regimes management and commercial electricity accounting in electric power systems is the application of distributed ledger technologies - Blockchain, which is due to increased availability of renewable energy sources. Currently, in the Russian Federation, the use of Blockchain technology is difficult for electric power systems operating in parallel with regional or unified power system due to the legislative restrictions imposed on operations in the retail and wholesale market for electrical energy. However, based on the distributed ledger technologies, the principles of the functioning of the electric energy market can be applied within the framework of small isolated electricity systems - microgrids. 2/3 of the territory of the Russian Federation is in the zone of decentralized and self-generated power supply at the moment. It is home to about 25 million people.

**Materials and Methods:** Mathematical modeling and calculation of the microgrid electric regimes were performed in the RastrWin3 program with the aim of accounting for losses in the electric power system. The management program for the isolated power system was compiled in the OWEN Logic software.

**Conclusions:** The use of distributed generation is economically justified in small isolated electricity system: the payback period of distributed generation devices is much less than their lifetime. Increasing the number of participants in microgrid leads to a significant decrease in the installed generation power, and, consequently, its cost. For the organization of mutual settlements between the owners of small generation facilities in microgrids, it is possible to use distributed registry technology. It is possible to use Blockchain technology to organize mutual settlements between owners of small generation facilities in microgrid.

**Key words:** blockchain, microgrid, photovoltaics, distributed generation.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика – одна из самых наукоемких и технологичных отраслей промышленности. Одним из перспективных направлений для поиска решений задач управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в электроэнергетических системах является применение технологий распределённого реестра – Blockchain, что обусловлено повышением доступности возобновляемых источников энергии, объединяемых в системы с распределённой генерацией [1].

В данной работе предлагается использование автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain, для учёта переданной и потреблённой в каждом узле сети электроэнергии посредством системы самоисполняемых контрактов, а также осуществляющего функции автоматизированного управления режимами микрогрида.

Целью настоящей работы является обоснование и реализация принципов управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в микрогридах с помощью автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain. Управление режимом в данном случае направлено на сокращение необходимых резервов мощности с учётом требуемого уровня надёжности электроснабжения и качества электроэнергии. При этом рыночный механизм в рамках микросети организован на основе подходов [2, 3].

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ

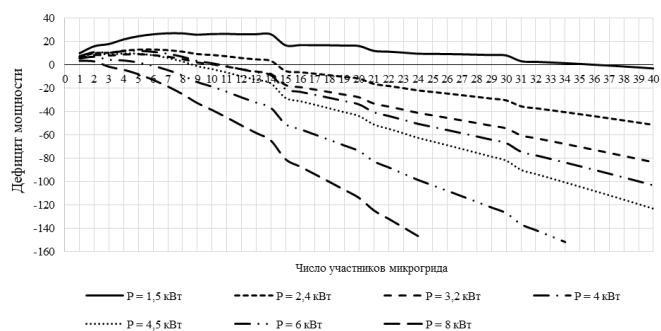
Расчет режима работы рассматриваемой системы был произведен в программе RastrWin3 с целью учета потерь в электроэнергетической системе.

Схема электроснабжения 0,4 кВ состоит из некоторого числа узлов нагрузки и одного балансирующего узла. Каждый узел – это дом с собственной генерацией в виде небольшой солнечной электростанции в комбинации с аккумуляторными батареями. В качестве балансирующего узла в реальной системе может выступать вторичная обмотка трансформатора 6(10)/0,4 кВ либо дизель-генераторная установка (ДГУ).

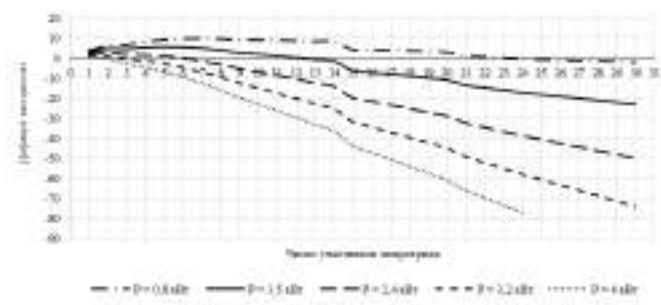
На рис. 1, а представлен график зависимости дефицита мощности (разницы между потребляемой и вырабатываемой мощностями) от числа участников микрогрида для коттеджного поселка. Установленная мощность каждого дома равна 14 кВт. Для расчетов использовались 7 вариантов солнечных станций: 1,5 кВт; 2,4 кВт; 3,2 кВт; 4 кВт; 4,5 кВт; 6 кВт; 8 кВт.

Расчет потребляемой мощности производился по методике, аналогичной методике расчета мощности силовых трансформаторов 10/0,4. В данной методике используются следующие коэффициенты: коэффициент спроса, который отвечает за то, что каждый отдельный дом не будет потреблять мощность, равную установленной, и коэффициент одновременности, который отвечает за то, что все дома в микросети не будут одновременно потреблять мощность, равную их установленной. Значения этих коэффициентов определяются количеством участников микрогрида. Из рисунка видно, что при 37 участниках в системе достаточно приобрести солнечную станцию 1,5 кВт, что позволит снизить установленную мощность станции одного участника микрогрида в 9,3 раза.

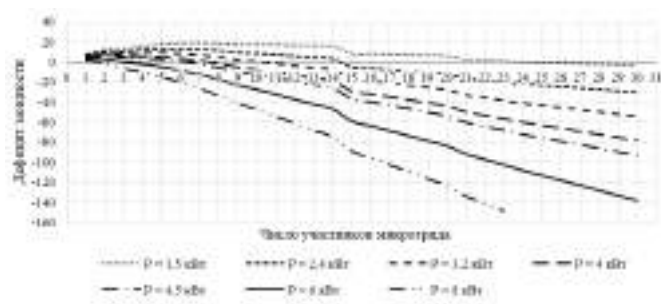
Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонда содействия инновациям) (№ 38581).



а



б



в

Рис. 1 – График зависимости дефицита мощности от числа участников микрогрида для коттеджного (а) и дачного (б) поселков и многоквартирного дома

На рис. 1, б представлен график зависимости дефицита мощности от числа участников микрогрида для дачного поселка. Установленная мощность каждого дома равна 5 кВт. Для расчетов использовались 5 вариантов солнечных станций: 0,8 кВт; 1,5 кВт; 2,4 кВт; 3,2 и 4 кВт.

Из рис. 1, б видно, что при 24 участниках в системе достаточно приобрести солнечную станцию 0,8 кВт, что позволит снизить установленную мощность станции одного участника микрогрида в 7,5 раз.

График зависимости дефицита мощности от числа участников микрогрида для многоквартирного дома представлен на рис. 1, в. Установленная мощность каждого дома равна 12 кВт. Из рисунка видно, что при 24 участниках в системе достаточно приобрести солнечную станцию 1,5 кВт, что позволит снизить установленную мощность станции одного участника микрогрида в 8 раз.

По созданному ранее алгоритму [4] были написаны программы для программируемого реле ОВЕН в ПО OWEN Logic. Программы для головного и ведомых устройств (рис. 2) реализуют автоматизированное управление режимом



# ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Гусев Ю.П., Субботин П.В.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

SoobbotinPV@mpei.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Опубликовано большое количество работ, посвященных разработке новых и совершенствованию существующих технических устройств на базе силовой электроники, обеспечивающих улучшение показателей качества электроэнергии. Наиболее обсуждаемым является применение систем накопления электроэнергии (СНЭ), заявленный функционал которых обеспечивает решение комплекса практических задач при распределении электроэнергии. В данном докладе рассматривается вопрос применения СНЭ с целью симметрирования нагрузки и компенсации реактивной мощности.

**Материалы и методы:** Принятые исходные данные базируются на параметрах распределительных сетей, полученных статистическими методами анализа. При расчете несимметрии трехфазных токов использовались известные методы расчета несимметричных режимов электрических сетей.

**Результаты:** Рассмотрен вопрос применения СНЭ с целью симметрирования нагрузок и компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях. На основании расчета параметров традиционных симметрирующих устройств на базе конденсаторов разработаны рекомендации по выбору номинальной мощности преобразователя СНЭ.

**Выводы:** Применение СНЭ является эффективным решением для симметрирования нагрузки в четырехпроводных сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью. Мощности преобразователя СНЭ, выбранного из условия оптимизации графика нагрузки на шинах трансформаторной подстанции (ТП), достаточно для симметрирования нагрузки соизмеримой мощности.

**Ключевые слова:** система накопления электроэнергии, распределительная сеть, трансформаторная подстанция, качество электроэнергии.

## APPLICATION BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR LOAD BALANCING AND REACTIVE POWER COMPENSATION

Y. Gusev, P. Subbotin

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Moscow, Russian Federation

SoobbotinPV@mpei.ru

## Abstract

**Background:** A large number of works on the development of new and improvement of existing technical devices based on power electronics, that increase the quality of electrical energy have been published. The application of battery energy storage systems (BESS), the declared functionality of which provides a solution to a set of practical objectives in the distribution of electricity, is the most discussed. In this report, the application of BESS in order to load balancing and reactive power compensation is considered.

**Materials and Methods:** The received initial data are based on the parameters of electric power distribution networks obtained by statistical methods of analysis. When calculating the asymmetry of three-phase currents, known methods for calculating the asymmetric modes of electrical networks were used.

**Results:** The application of BESS for the purpose of load balancing and reactive power compensation in electric power distribution networks has been considered. Based on the calculation of the parameters of traditional balancing devices based on capacitor banks, recommendations have been developed on the choice of the nominal power of converter BESS.

**Conclusions:** The use of BESS is an effective solution for balancing the load in four-wire networks of 0.4 kV with a solidly grounded neutral. The power of the BESS converter, selected from the condition of optimizing the load diagram at the electric buses transformer substation (TS), is sufficient to balance the load of commensurate power.

**Key words:** battery energy storage system; electric power distribution network; transformer substation; electric power quality.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К наиболее перспективным и эффективным техническим устройствам улучшения показателей качества электроэнергии относят многофункциональные устройства, построенные на базе современной силовой электроники по принципу активного фильтра, позволяющие обеспечивать качество электрической энергии по нескольким параметрам одновременно [1].

Примером таких устройств являются системы накопления электроэнергии, состоящие из реверсивного инвертора и накопительного элемента (аккумуляторной батареи). Для устранения несимметрии токов в трехфазных сетях с глухозаземленной нейтралью, СНЭ способны генерировать токи обратной и нулевой последовательности в противофазе току обратной последовательности нагрузки и току нулевой последовательности, протекающему в нейтральном проводе.

## II. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Несимметричным режимом работы трехфазной системы называется режим, при котором условия работы фаз неодинаковы. При несимметричной нагрузке в трехфазных сетях появляются токи обратной и нулевой последовательности, что приводит к возникновению несимметрии напряжения, перегрузке фазных проводов, росту потерь мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) и, что особенно важно, ограничивает возможность подключения к таким сетям высокотехнологичного современного оборудования, снижает его производительность и срок службы, увеличивает риск выпуска бракованной продукции.

Так же, как и при компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник тока, для компенсации токов несимметрии не требуется активная мощность, так как мощность небаланса является реактивной [1].

Обычно для симметрирования токов нагрузки в сети 0,4 кВ в распределительных сетях 6–10 кВ с трансформаторами 6–10/0,4 кВ со схемой соединения «треугольник (или звезда) – звезда с нулем» применяются батареи конденсаторов (БК), соединенные по схеме треугольника с различными значениями емкостей [2], которые осуществляют частичную или полную компенсацию тока обратной последовательности.

Однако подключение СНЭ, работающих по принципу активного фильтра, к шинам 0,4 кВ ТП позволяет принципиально изменить подход к симметрированию нагрузки и компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях.

## III. СНИЖЕНИЕ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ

Для определения требуемых параметров СНЭ, необходимых для симметрирования нагрузки и компенсации реактивной мощности, выполнено сравнение требуемой

мощности традиционных симметрирующих устройств (батарей конденсаторов), подключаемых к ЛЭП 10 кВ, и мощности СНЭ, подключаемой к шинам 0,4 кВ ТП, способной генерировать такую же реактивную мощность.

На основе статистического анализа параметров оборудования одной из электросетевых компаний было выявлено, что наибольшее количество ТП имеют трансформаторы мощностью 630 кВА [3]. Дополнительно, из условия максимального выравнивания суточного графика электрических нагрузок на шинах ТП, было принято, что максимальный выходной ток преобразователя СНЭ должен соответствовать 37 % от номинального тока трансформатора подстанции 6–10/0,4 кВ.

Рассмотрен вариант подключения к шинам 0,4 кВ ТП трех однофазных нагрузок мощностью 7, 12 и 17 % от номинальной мощности трансформатора на линейные напряжения *AB*, *BC* и *CA*, что в сумме (36 %) примерно соответствует принятой номинальной мощности СНЭ.

Используя методику расчета БК [4], определен ток несимметричной нагрузки обратной последовательности, который на стороне высшего напряжения трансформатора составит 5,6 А. Начальная фаза тока обратной последовательности будет равна 71,6°. Тогда требуемая реактивная мощность БК для полного симметрирования нагрузки составит 128,8 кВАр.

В итоге для симметрирования нагрузки на ТП с трансформатором мощностью 630 кВт требуемая реактивная мощность составит 128,8 квар. Тогда преобразователю СНЭ, мощностью 233,1 кВА, на выходе требуется поддерживать коэффициент мощности, равный 0,83. При этом работа инверторных преобразователей, как правило, допускается с коэффициентом мощности нагрузки до 0,4 о. е.

## IV. ВЫВОДЫ

Мощности преобразователя СНЭ, выбранного из условия оптимизации графика нагрузки на шинах ТП, достаточно для симметрирования нагрузки соизмеримой мощности за счет генерации требуемой реактивной мощности.

При этом за счет возможности компенсации тока нулевой последовательности появляется возможность эффективного симметрирования нагрузок в четырехпроводных сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью.

## Список литературы

- [1] Справочник по силовой электронике / Ю.К. Розанов [и др.]; под ред. Ю.К. Розанова. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 472 с.
- [2] Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 320 с.
- [3] Гусев Ю.П., Субботин П.В. Влияние накопителей электроэнергии на пропускную способность распределительных сетей напряжением 6–10 кВ // Электричество. 2018. № 1. С. 13–18.
- [4] Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСЕРВИСНОГО КОНТРАКТА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Тупикина А.А.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»  
Новосибирск, Россия  
tupikina@corp.nstu.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Энергосервисный контракт (ЭСК) является одним из перспективных инструментов повышения энергоэффективности российских предприятий, однако характеризуется большим количеством рисков, возникающих в процессе его реализации. При этом эффективность реализации ЭСК для каждой из его сторон зависит от набора исходных параметров, выбор значений которых может быть причиной конфликта интересов заказчика и энергосервисной компании. Таким образом, целью работы является разработка модели оценки экономической эффективности энергосервисного контракта, которая позволяла бы осуществлять подбор наиболее значимых параметров контракта с учетом интересов его сторон.

**Материалы и методы:** Модель построена с использованием методов оценки экономической эффективности, апробация проведена по материалам бизнес-плана проекта повышения энергоэффективности.

**Результаты:** Определены составляющие денежного потока, генерируемого в рамках контракта для заказчика и энергосервисной компании. Предложена целевая функция оптимизации основных параметров ЭСК: срока реализации, цены контракта, распределения инвестиций между сторонами. Произведена апробация полученной модели на примере ЭСК, реализованного на энергопредприятии Сибирского Федерального округа.

**Выводы:** Разработана модель оценки эффективности ЭСК, основанная на критерии NPV и учитывающая баланс интересов ее участников. На основании результатов апробации данной модели на примере реального проекта предложены рекомендации по подбору наиболее эффективных параметров контракта. Данная модель может быть использована любой из сторон контракта на этапе подготовки или оценке целесообразности заключения контракта в целом.

**Ключевые слова:** энергосбережение, энергетическая эффективность, энергосервисный контракт, инвестиционный проект, экономическая эффективность, чистый дисконтированный доход.

## SELECTING THE OPTIMUM PARAMETERS OF THE ENERGY-SERVICE CONTRACT BASED ON THE ESTIMATION OF ITS ECONOMIC EFFICIENCY

A. Tupikina

Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russia  
tupikina@corp.nstu.ru

## Abstract

**Background:** The Energy Service Contract (ESC) is one of the most promising tools for improving the energy efficiency of Russian enterprises, but is characterized by a large number of risks arising in the process of its implementation. At the same time, the effectiveness of the implementation of the ESC for each of its sides depends on a set of initial parameters, the choice of which can be the cause of a conflict of interest between the customer and the energy service company. Thus, the goal of the work is to develop a model for assessing the economic efficiency of an energy service contract, which would allow the selection of the most important parameters of the contract taking into account the interests of its parties.

**Materials and methods:** The model is constructed using methods for assessing economic efficiency, approbation was carried out based on the materials of the business plan for the energy efficiency project.

**Results:** The components of the cash flow generated under the contract for the customer and the energy service company are determined. The objective function of optimizing the main parameters of the ESC is proposed: the implementation period, the price of the contract, the distribution of investments between the parties. Approbation of the obtained model was carried out using the example of ESC, implemented at the power enterprise of the Siberian Federal District.

**Conclusions:** A model for assessing the effectiveness of the ESC was developed, based on the NPV criteria and taking into account the balance of interests of its participants. Based on the results of approbation of this model on the example of a real project, recommendations are offered on the selection of the most effective parameters of the contract. This model can be used by either party to the contract at the stage of preparation or assessing the appropriateness of concluding the contract as a whole.

**Key words:** energy saving, energy efficiency, energy service contract, investment project, economic efficiency, net present value.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Энергосервисный контракт (ЭСК) как один из инструментов повышения энергетической эффективности в России не является новым инструментом, однако развитие рынка энергосервисных услуг до сих пор происходит достаточно медленно и неравномерно. Можно назвать несколько причин такого состояния: недостаточная информированность потенциальных заказчиков и непонимание сути контракта, несовершенство законодательной и методической базы, большое количество рисков, возникающих в процессе реализации контракта [1, 2].

Тем не менее ЭСК имеет ряд преимуществ, которые делают его перспективным инструментом повышения энергоэффективности:

- разработку мероприятий в рамках контракта осуществляют профессионалы в области повышения энергоэффективности;
- энергосервисная компания (ЭСКО) может самостоятельно привлекать финансирование проекта, а возврат вложенных средств осуществляется периодическими платежами из полученной величины экономии энергоресурсов;
- имеется возможность переложить часть рисков, возникающих в процессе реализации проекта на ЭСКО.

Перечисленные особенности ЭСК позволяют рассматривать его как инвестиционный проект как с точки зрения ЭСКО, так и со стороны заказчика, так как финансирование проекта может быть разделено между сторонами контракта. Таким образом, при подготовке ЭСК важную роль играет оценка его экономической эффективности.

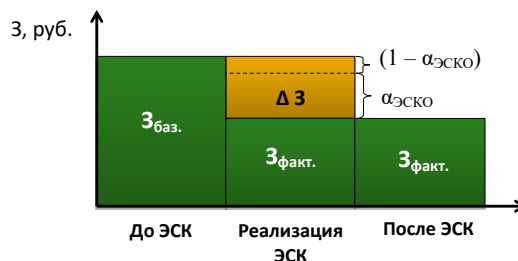
При этом, несмотря на то что энергосервисный контракт представляет собой вид взаимовыгодного сотрудничества, у каждой из его сторон существуют собственные интересы, зачастую противоречащие интересам другой стороны. Например, чем больше будет срок контракта, тем большую прибыль от него получит ЭСКО, в то время как заказчик, наоборот, заинтересован в сокращении срока с целью получения средств от экономии энергоресурса в единоличное пользование. Отсюда следует, что эффективность реализации проекта в целом не всегда означает эффективность для каждого из участников ЭСК.

Целью данного исследования является разработка модели оценки экономической эффективности энергосервисного контракта, которая позволяла бы осуществлять подбор наиболее значимых параметров контракта с учетом интересов его сторон.

## II. Модель оценки эффективности ЭСК

В качестве оптимизируемых параметров энергосервисного контракта целесообразно выделить те параметры, величина которых может представлять определенный конфликт интересов сторон контракта:

1. Цена контракта  $\alpha_{\text{ЭСКО}}$  (%) – заявленная в контракте доля экономии энергетического ресурса в денежном выражении, которая отчуждается в пользу ЭСКО (рисунком).
2. Энергосервисный контракт может предусматривать частичное или полное финансирование за счет заказчика:



Распределение экономии между заказчиком и ЭСКО в процессе реализации энергосервисного контракта

$$\text{Распределение первоначальных вложений между заказчиком и ЭСКО} = \frac{d_{\text{ЭСКО}}}{1 - d_{\text{ЭСКО}}} \cdot 100 \%$$

3. Срок контракта  $T$  (лет) должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечить окупаемость вложений для ЭСКО. Для заказчика реализуемый проект может приносить положительные денежные потоки и по завершении контракта, поэтому срок его окупаемости в определенных случаях может быть больше.

В связи с тем, что ЭСК можно рассматривать как два отдельных, но связанных между собой оптимизируемых параметрами инвестиционных проекта, в качестве критерия оптимизации логично использовать максимум совокупного чистого дисконтированного дохода NPV, обладающего следующими возможностями:

- 1) сложения NPV отдельных проектов;
- 2) сравнения различных вариантов реализации проекта для заказчика (с привлечением ЭСКО и без);
- 3) использования представленной модели как для общей оценки эффективности проекта, так и для оценки эффективности каждой из сторон.

Целевая функция предлагаемой модели имеет вид:

$$f = NPV_{\text{ЭСКО}} + NPV_{\text{ЗАК}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $NPV_{\text{ЭСКО}}$  и  $NPV_{\text{ЗАК}}$  – чистые дисконтированные доходы ЭСКО и заказчика, рассчитываемые по формулам:

$$NPV_{\text{ЭСКО}} = -\sum_{i=1}^T \frac{d_{\text{ЭСКО}} \cdot I_t}{(1+E)^t} + \sum_{i=1}^T \frac{CF_t^{\text{ЭСКО}}}{(1+E)^t}; \quad (2)$$

$$NPV_{\text{ЗАК}} = -\sum_{i=1}^T \frac{(1-d_{\text{ЭСКО}}) \cdot I_t}{(1+E)^t} + \sum_{i=1}^T \frac{CF_t^{\text{ЗАК}}}{(1+E)^t}, \quad (3)$$

где  $I_t$  – первоначальные вложения в проект, распределенные между заказчиком и ЭСКО в соответствии с долей  $d_{\text{ЭСКО}}$ , руб.;  $CF_t^{\text{ЭСКО}}$  и  $CF_t^{\text{ЗАК}}$  – денежные потоки заказчика и ЭСКО, генерируемые проектом, руб.;  $T$  – срок проекта, лет;  $E$  – ставка дисконтирования.

Уравнения ограничений модели являются следствием нецелесообразности для любой из сторон при отрицательном значении NPV:

$$\begin{aligned} NPV_{\text{ЭСКО}}(\alpha_{\text{ЭСКО}}, d_{\text{ЭСКО}}, T) &\geq 0; \\ NPV_{\text{ЗАК}}(\alpha_{\text{ЭСКО}}, d_{\text{ЭСКО}}, T) &\geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Ниже представлена общая структура денежных потоков заказчика и ЭСКО, возникающих в процессе реализации энергосервисного контракта.

Для ЭСКО денежный поток представлен следующими величинами:

1. Платежи из полученной экономии в денежном выражении, поступающие от заказчика в соответствии с ценой контракта.
2. Эксплуатационные расходы по проекту, лежащие на ЭСКО.
3. Непредвиденные расходы.
4. Проценты по кредитам.
5. Налог на прибыль и другие налоги, которые связаны непосредственно с реализуемым проектом.

В свою очередь, денежный поток заказчика:

1. Доля экономии ТЭР в денежном выражении, которая остается у заказчика в соответствии с ценой контракта.
2. Эффекты, возникающие у заказчика в процессе реализации проекта помимо экономии энергоресурса, например: чистая прибыль от увеличения объема выпуска продукции в связи с повышением производительности оборудования, учитывающая дополнительный доход, эксплуатационные расходы и налог на прибыль; экологический эффект (снижение платежей за вредные выбросы); изменения в потреблении других энергоресурсов, не рассматриваемых проектом, произошедшие вследствие его реализации.
3. Проценты по кредитам.
4. Если срок амортизации оборудования превышает срок действия контракта, для заказчика необходимо также учитывать остаточную стоимость созданных в ходе проекта активов, переданных на его баланс по завершении контракта.

Оптимизация выбранных параметров осуществляется методом перебора вариантов их сочетаний и может быть представлена в различных видах в зависимости от их количества:

1. В виде таблицы значений функции  $f(NPV_{ЭСКО}, NPV_{ЗАК})$ , если выбран один единственный параметр оптимизации.
2. В виде матрицы значений функции  $f(NPV_{ЭСКО}, NPV_{ЗАК})$ , если выбрано два параметра оптимизации.
3. В виде набора матриц значений функции  $f(NPV_{ЭСКО}, NPV_{ЗАК})$ , если выбрано три параметра оптимизации. Тогда один из них может быть задан как целевой, а в случае получения неудовлетворительных результатов скорректирован.

### III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА ЗАМЕНЫ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Апробация предложенной модели была проведена на примере проекта модернизации тепловой сети одной из ТЭЦ Западной Сибири.

Высокая степень износа оборудования и недостаток средств для инвестирования в его восстановление является одной из основных проблем энергетической отрасли России. При этом топливно-энергетический комплекс страны обладает существенным потенциалом энергосбережения (по различным оценкам от 130 до 160 млн т.у.т. или более трети всего потенциала РФ [3]).

Для энергокомпаний, в состав которых входят ТЭЦ, проблема изношенности тепловых сетей усугубляется ограничениями, которые накладывает существующая система тарифообразования на возможность включения затрат на их восстановление в регулируемый тариф на тепловую энергию. Именно поэтому привлечение ЭСКО в качестве источника финансирования данных мероприятий является одним из возможных выходов.

Рассматриваемый проект предполагает замену тепловой изоляции трубопровода ТЭЦ и характеризуется следующими основными параметрами: первоначальные вложения  $I_0$  составляют 70,6 млн руб.; финансирование осуществляется целиком за счет ЭСКО согласно исходному бизнес-плану, т. е.  $d_{ЭСКО} = 100\%$ ; срок реализации проекта – 5 лет; цена контракта – 80 %.

С учетом особенностей реализации рассматриваемого проекта, денежные потоки энергокомпании-заказчика и ЭСКО рассчитывают по формулам:

$$CF_t^{ЭСКО} = \alpha_{ЭСКО} (\Delta Q_{баз} - \Delta Q_{норм}) s_t^{топ} - ПК_t - И, \quad (5)$$

$$CF_t^{ЗАК} = s_t^{топ} (1 - \alpha_{ЭСКО}) (\Delta Q_{баз} - \Delta Q_{норм}), \quad (6)$$

где  $\Delta Q_{баз}$  и  $\Delta Q_{норм}$  – фактические потери через изоляцию трубопровода в базовом периоде и нормативные потери, уровня которых планируется достичь в отчетном, Гкал;  $s_t^{топ}$  – топливная составляющая себестоимости энергии, рассчитанная с учетом индексов роста цен на энергоресурсы и структуры топливного баланса ТЭЦ;  $ПК_t$  – проценты по кредиту, взятому ЭСКО на реализацию контракта (приняты на уровне 10 %);  $И_{об}$  – затраты на ежегодные энергетические обследования, предусмотренные требованиями контракта и оцененные на основании объекта-аналога (проведения испытаний на другом участке тепловых сетей той же компании).

Ставка дисконтирования  $E$  по проекту принята равной норме доходности инвестированного капитала в сфере теплоснабжения, установленной приказом ФСТ России от 16 декабря 2013 г. № 1618-э [4] на уровне 10,96 %.

По результатам расчета NPV заказчика и ЭСКО при исходных параметрах контракта можно сделать вывод, что контракт при таком сочетании параметров не может быть заключен:  $NPV_{ЭСКО} < 0$ , т. е. не выполняется одно из ограничений модели, значение целевой функции также отрицательное. Отсюда следует, что необходима корректировка исходных параметров проекта с целью повышения его экономической эффективности. Результаты расчетов для исходного проекта, а также приемлемые варианты корректировки его параметров представлены в таблице.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Вариант	Исходный	1	2	3.1	3.2
$T$ , лет	5	10	10	8	7
$d_{ЭСКО}$ , %	100	100	100	85	85
$\alpha_{ЭСКО}$ , %	80	80	89	80	85
$NPV_{ЭСКО}$ , млн руб.	-29,65	3,14	16,45	3,38	1,23
$NPV_{ЗАК}$ , млн руб.	16,27	29,57	16,26	13,83	5,68
$f$ , млн руб.	-13,38	32,71	32,71	17,21	6,91

По результатам оптимизации исходных параметров проекта можно рассмотреть следующие варианты их корректировки:

1. Увеличение срока контракта до 10 лет с сохранением исходного распределения инвестиций и цены контракта.
2. Увеличение срока контракта до 10 лет с изменением цены контракта и сохранением исходного распределения инвестиций.
3. Перераспределение инвестиций между ЭСКО и заказчиком (в качестве источника финансирования проекта заказчиком рассматривалась возможность использования средства из ремонтного фонда в размере 10,6 млн руб.). В данном варианте было рассмотрено несколько сочетаний параметров со следующими результатами:
  - 3.1. При сохранении цены контракта на уровне 80 % минимальный срок контракта, обеспечивающий ЭСКО возврат вложенных средств, составляет 8 лет.
  - 3.2. Минимальный срок контракта, при котором совокупный эффект принимает положительное значение, – 7 лет. При таком варианте минимальная цена контракта должна составлять 85 %.

Таким образом, с точки зрения максимизации совокупного эффекта участников контракта, наиболее предпочтительным является 2-й вариант. Данный вариант характеризуется также практически равными значениями NPV заказчика и ЭСКО, что соответствует позиционированию ЭСК как взаимовыгодного сотрудничества. При этом NPV заказчика в данном варианте наиболее близок к исходному.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная модель подбора основных параметров энергосервисного контракта на основании максимизации совокупного NPV его сторон позволяет решать следующие задачи:

1. Определение оптимальных параметров контракта при заключении договора энергосервиса.
2. Определение начальных параметров контракта заказчиком с целью их включения в конкурсные условия (при выборе ЭСКО посредством тендера).
3. Оценка целесообразности заключения контракта энергосервисной компанией при заданных исходных параметрах.

Достоинством данной модели является возможность не только максимизации совокупного эффекта, но и сохранение баланса интересов заказчика и ЭСКО.

Дальнейшее развитие данного исследования предполагает апробацию полученной модели на примере контрактов с различными особенностями (типом ресурса, отраслью заказчика и т. д.).

#### Список литературы

- [1] Туликов А.В. Рынок энергосервисных услуг в России: смутные перспективы или инструмент роста? // Энергосбережение. 2015. № 3. С. 8–11.
- [2] Иванов Г.Н. Энергосервисные контракты – применение в российской практике // Энергосовет. 2011. № 2(15). URL: [http://www.energsovet.ru/bul\\_stat.php?idd=150](http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=150) (дата обращения: 20.05.2017).
- [3] Бушуев В.В. Энергоэффективность как фактор устойчивого развития экономики РФ (на примере ЭС-2030) // Эффективное распределение и использование газа: Междунар. конф. / Институт энергетической стратегии; Минэнерго России; Союз нефтегазопромышленников России – 2009.
- [4] Об утверждении минимальной нормы доходности для расчета тарифов в сфере теплоснабжения с применением метода обеспечения доходности инвестированного капитала на долгосрочный период регулирования с началом долгосрочного периода регулирования в 2014 году: приказ Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) от 16 декабря 2013 г. № 1618-э.



# СОВМЕСТНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ И РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ НИМИ НА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Тыквинский А.М.

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»  
Новочеркасск, Россия  
Tykvinsky.Alex@inbox.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Солнечная электростанция является источником относительно дешевой электрической энергии, однако неправильный выбор угла наклона солнечных модулей приводит к недоиспользованию установленной мощности. В то же время традиционные методики предполагают раздельное определение угла наклона солнечных модулей и расстояния между ними, что, как показывают расчеты, приводит к неоправданному увеличению площади занимаемого участка земли и, как следствие, к излишним капитальным затратам. Таким образом, тариф на отпускаемую электроэнергию оказывается завышенным. Поэтому в целях получения максимальной выработки электрической энергии солнечной электростанцией необходимо определить критерии оптимальности совместного выбора угла наклона солнечных модулей и расстояния между ними в составе солнечной электростанции.

**Материалы и методы:** Солнечный модуль, источник света, электроизмерительные приборы, статистические данные по выработке мощности Бугульчанской СЭС.

**Результаты:** Получено уравнение, описывающее зависимость максимума выдаваемой мощности солнечного модуля от температуры окружающей среды и мощности потока солнечного излучения. Доказана универсальность полученного уравнения на примере применения его к расчету выдачи мощности Бугульчанской СЭС при известном графике освещенности. Разработана упрощенная методика прогнозирования выдачи мощности солнечной электростанции. Выявлены показатели, являющиеся определяющими при выборе угла наклона солнечного модуля.

**Выводы:** Предложена методика совместного выбора оптимального угла наклона солнечных модулей совместно с расстоянием между ними, при котором обеспечиваются максимальный КПД и годовая выработка электроэнергии при сокращенных затратах на земельный отвод.

**Ключевые слова:** солнечный модуль, нагрузочная характеристика, солнечная электростанция, угол наклона солнечного модуля, критерий оптимальности.

## THE TECHNIQUE OF JOINT OPTIMUM TILT ANGLE AND INTER ARRAY SPACE SELECTION OF SOLAR MODULES ON SOLAR POWER PLANT

A. Tykvinsky

Platov South Russian State Polytechnic University  
Novocherkassk  
Tykvinsky.Alex@inbox.ru

## Abstract

**Background:** Solar power plant is a source of a relatively cheap electric power. Although a false solar module tilt angle selection leads to a non-full solar power plant capacity power usage. Common techniques suppose a separate solar module tilt angle selection and inter array space calculation. The analysis shows that this leads to increasing of an occupied space and investments growth. As a result utilities have to increase the tariff. Thus it is needed to define an optimum solar module tilt angle and inter array space selection criteria.

**Materials and methods:** Solar module, light source, electric measure devices, statistic data about power output of solar power plant Bugul'chanskaya.

**Results:** The research has allowed to get an equation that gives an accurate enough description of a relation between solar module power output, solar irradiation value and ambient. Implemented calculation of Bugul'chanskaya solar power plant output by means of received equation has proved its versatility. The result analysis has shown an optimum criteria of solar module tilt angle and inter array space selection.

**Conclusions:** Solar module optimal tilt angle and inter array space selection technique has been proposed. The Solar power plant geometry defined by means of mentioned technique provides maximum efficiency, power output and reduced investments.

**Key words:** solar module, load characteristic, solar power plant, solar module tilt angle, optimum criteria, inter array space.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная электростанция (СЭС) является источником относительно дешевой электрической энергии, однако неправильный выбор угла наклона солнечных модулей (СМ) и расстояния между ними приводит к недоиспользованию установленной мощности, а также к излишним капитальным затратам на землеотвод под строительство, что вынуждает завышать тариф на отпускаемую электроэнергию. Поэтому в целях получения максимальной выработки электрической энергии солнечной электростанцией необходимо определить критерии оптимальности выбора указанных параметров [1].

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Исследование проведено на примере СМ номинальной мощностью 30 Вт, напряжением 16 В. Для моделирования изменяющейся нагрузки использовался реостат с максимальным сопротивлением 40 Ом. Солнце имитировалось при помощи галогенной лампы мощностью 6 кВт. Для получения зависимости мощности, выдаваемой СМ, от мощности потока солнечного излучения снималась вольтамперная характеристика при разном уровне освещенности, температура при этом поддерживалась постоянной. Зависимость мощности, выдаваемой СМ, от температуры снималась при постоянстве освещенности. Результаты проведенных исследований и схема лабораторных испытаний представлены на рис. 1–3.

Из рис. 1, б и в видно, что мощность, выдаваемая СМ, прямо пропорциональна освещенности и обратно пропорциональна температуре окружающей среды [2, 3]. Однако при аппроксимации вышеупомянутых зависимостей следует учитывать насыщение *p-n* перехода, т. е. образование потенциального барьера на границе *p* и *n* областей, из-за чего СМ не может выдать мощность, большую, чем номинальная [4]. Самой простой функцией, с помощью которой можно учесть указанное явление, является гиперболический тангенс:

$$P_{\text{СМmax}}(G, \theta) = P_0 \cdot \text{th} \left( \frac{G}{G_0} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{dP}{d\theta} \cdot (\theta_0 - \theta_{\text{окр.ср}}) \right], \quad (1)$$

где  $G$  – текущее значение освещенности, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_0$  – базисное значение освещенности, 1000 Вт/м<sup>2</sup>;  $P_0$  – номинальная мощность СМ, Вт;  $\frac{dP}{d\theta}$  – температурный коэффициент мощности;  $\theta_0$  и  $\theta_{\text{окр.ср}}$  – базисная температура и температура окружающей среды, соответственно, °С.

Достоверность полученного уравнения (1) подтверждена путем расчета выдачи мощности СМ при известном уровне освещенности. Более того, как показывает расчет, выполненный на основании данных, предоставленных Системным оператором Единой энергетической системы (СО ЕЭС) по выдаче мощности Бугульчанской СЭС, уравнение (1) универсальное в плане его применимости для расчета выдачи мощности СЭС.

## III. РАСЧЕТ ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Перед выбором оптимального угла наклона солнечного модуля по отношению к горизонту нужно рассчитать на 365 дней вперед величину прямого солнечного излучения, попадающего на земную поверхность в точке с заданными координатами (широтой и долготой) [5–7]. Причем расчет

ведется для момента времени, когда солнце находится в зените, т. е. на максимальной угловой высоте по отношению к горизонту, когда часовой угол равен нулю:

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \cos \delta), \\ \theta = 90 - \alpha, \\ AM = \frac{1}{\cos \theta}, \\ G_D = 1,353 \cdot 0,7^{AM^{0,678}}, \end{cases} \quad (2)$$

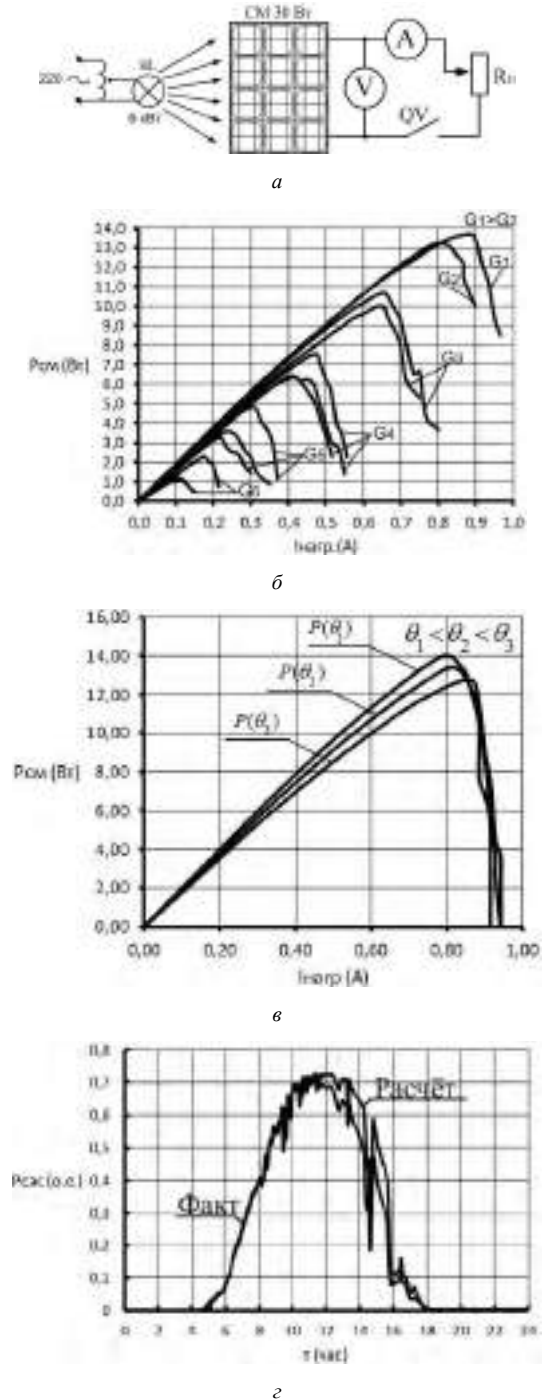


Рис. 1 – Получение характеристик СМ: а – схема испытаний; б, в – нагрузочные характеристики СМ соответственно при снижающейся освещенности и нарастающей температуре окружающей среды; г – график выдачи мощности Бугульчанской СЭС (расчет был произведен по формуле (1))

где  $\alpha$  – угловая высота солнца над горизонтом, град.;  $\varphi$  – географическая широта рассматриваемой точки местности, град.;  $\delta$  – склонение солнца, град.;  $AM$  – атмосферная масса;  $\theta$  – угол наклона солнца по отношению к горизонту, град.;  $G_D$  – величина прямого солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>.

Однако при выборе оптимального угла наклона СМ необходимо также знать величину суммарного прямого излучения, поступившего на поверхность земли в течение дня [8]. В первом приближении типовой график освещенности представляет собой полуэллипс (рис. 2), поэтому выработанную за день мощность можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{cases} T_B = 12 - \frac{1}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) - \frac{TC}{60}, \\ T_3 = 12 + \frac{1}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) - \frac{TC}{60}, \\ T_{СВС} = T_B - T_3, \\ P_{СЭС.Σ} = P_{СЭС \max} \cdot \frac{\pi \cdot T_{СВС}}{4}. \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_B$ ,  $T_3$ ,  $T_{СВС}$  – соответственно время восхода, захода солнца и продолжительность светлого времени суток, ч;  $TC$  – временной коэффициент;  $P_{СЭС \max}$  – максимальная выдача мощности СЭС, рассчитываемая по выражению (1).

#### IV. КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Под критериями оптимальности будем понимать экстремумы некоторых расчетных параметров, определяющих техническую и экономическую эффективность эксплуатации СЭС.

Техническая эффективность эксплуатации СЭС определяется КПД, а экономическая эффективность – числом часов использования установленной мощности и годовым отпуском электроэнергии. При расчетах следует также учитывать максимальную длину тени, отбрасываемой СМ. Дело в том, что если расстояние между рядами солнечных модулей, работающих в составе СЭС, будет меньше максимальной длины отбрасываемой ими тени, то во всей фотоэлектрической системе будут иметь место потери мощности от затенения позади стоящих СМ. Более того, затенение приводит к неравномерной токовой нагрузке фотоэлектрических элементов, из которых состоит СМ, а это влечет за собой их выгорание и выход из строя самих СМ. По указанным выше причинам расстояние между соседними рядами солнечных модулей должно быть больше либо равно максимальной длине отбрасываемой тени. Но при этом следует понимать, что завышение расстояния между рядами влечет за собой дополнительные денежные затраты на землеотвод, так как площадь, занимаемая СЭС, увеличивается в несколько раз.

Таким образом, критерий оптимальности можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} W_{\Sigma} \rightarrow \max, \\ \eta \rightarrow \max, \\ T_y \rightarrow \max, \\ h_{\max} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (4)$$

где  $W_{\Sigma}$  – годовая выработка электроэнергии, млн кВт·ч;  $\eta$  – КПД СЭС, %;  $T_y$  – число часов использования установленной мощности СЭС, час;  $h_{\max}$  – максимальная длина отбрасываемой тени, м.

Расчеты показывают, что наиболее определяющими при выборе оптимального угла наклона СМ являются  $W_{\Sigma}$ ,  $T_y$  и  $h_{\max}$ , поэтому (4) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} W_{\Sigma} \rightarrow \max, \\ T_y \rightarrow \max, \\ h_{\max} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

С помощью (5) выполнен расчет оптимального угла наклона солнечных модулей для Бугульчанской СЭС, расположенной в Куюрганзинском районе с географическими координатами 54° с. ш. и 55,96° в. д. Установленная мощность упомянутой СЭС – 5 МВт. Также в расчете принимается полное отсутствие облаков.

Последовательность расчета:

1. Задаются значения углов наклона СМ в интервале от 0 до 65°.
2. Для каждого из углов по выражениям (2) и (3) производится расчет дневной выработки электроэнергии для каждого  $i$ -го дня года.
3. По выражению (5) строится зависимость  $f(T_y, \beta)$ , так как  $T_y \equiv W_{\Sigma}$ .

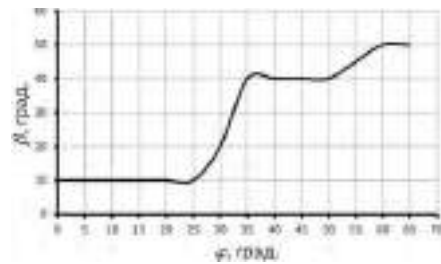
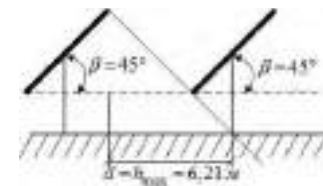
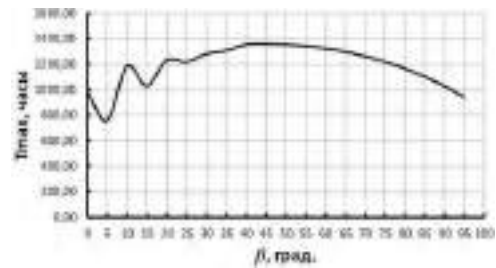


Рис. 3 – Результаты исследования: а – график функции  $f(T_y, \beta)$ ; б – профиль расположения СМ Бугульчанской СЭС; в – зависимость значения оптимального угла наклона солнечного модуля от широты местности

Расчет показал, что оптимальным для Бугульчанской СЭС является угол  $45^\circ$ . Наибольшая выдача мощности будет обеспечиваться 4 июля в 12:00 по московскому времени. Также получена зависимость оптимального угла наклона от широты местности. Результаты исследования приведены на рис. 3.

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ

Получено универсальное соотношение между выдачей мощности СЭС и основными влияющими факторами – мощностью потока солнечного излучения и температурой окружающей среды.

Выявлены критерии оптимальности выбора угла наклона СМ на солнечной электростанции.

Разработана методика выбора оптимального угла наклона солнечного модуля.

Полученная методика позволит наиболее полно использовать установленную мощность СЭС при фиксированном угле наклона, избегая тем самым необходимости сезонного регулирования и использования систем отслеживания.

#### Список литературы

- [1] International Energy Agency. Solar Energy Perspectives. OECD/IEA, 2011. 43 p.
- [2] Linda J. Vandergriff – director of «Photonics System Engineering»; «Nature and properties of light. Fundamentals of photonics. Module 1». Science applications international corporation McLean, Virginia. P. 12–13.
- [3] Manchester-Metropolitan University «Characterization of a photovoltaic module». P. 16–17.
- [4] Ting-Chung Yu, Tang-Shivan Chien. A study of the characteristics for solar modules. 23 p.
- [5] Camm E.H., Williams S.E. Solar power plant Design and Interconnection // Wind and solar Super Session. 2011. 7 p.
- [6] Short-Term Power Forecasting Model for photovoltaic plants based on historical similarity / Claudio Monteiro [et al.]. P. 2627–2063.
- [7] Linda J. Vandergriff. Nature and properties of light. Fundamentals of photonics. Mod. 1. Science applications international corporation McLean, Virginia. P. 12–13.
- [8] Peder Bacher. Short-Term Solar Power Forecasting. Kongens Lyngby, 2008. P. 9–12.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Уколова Е.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Иркутск, Россия

ukolovaevgenija@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Тенденции развития электроэнергетических систем (ЭЭС) и закономерности изменения их свойств в будущем в большей мере характеризуются трансформацией технологий у потребителей. Происходит рост доли электроприемников с новыми нагрузочными характеристиками. Наблюдается возрастание на предприятиях доли нелинейной и резко переменной нагрузки.

**Материалы и методы:** Использовался метод анализа.

**Результаты:** Рассмотрены и классифицированы традиционные и новые средства и мероприятия обеспечения качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

**Выводы:** Автоматическая реконфигурация распределительной электрической сети, а также автоматически управляемые устройства FACTS и накопители электрической энергии, являются эффективными новыми средствами обеспечения активности распределительной сети с целью удовлетворения возросших требований потребителей к надежности их электроснабжения и качеству поставляемой электроэнергии. Каждое из новых средств решает несколько различных по смыслу и содержанию задач обеспечения качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения. Проблема выбора параметров и размещения каждого из этих средств является многокритериальной.

**Ключевые слова:** автоматическая реконфигурация, активность, система электроснабжения, надежность системы электроснабжения, качество электроэнергии.

# ENSURING ELECTRICITY QUALITY AND RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Evgenia Ukolova

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Irkutsk, Russia

ukolovaevgenija@yandex.ru

## Abstract

**Background:** Trends in the development of electric power systems (EPS) and patterns of changes in their properties in the future are largely characterized by the transformation of technology in consumers. There is an increase in the share of electric receivers with new load characteristics. There is an increase in the proportion of non-linear and abrupt-change load at enterprises.

**Materials and methods:** The method of analysis was used.

**Results:** Traditional and new means and measures of ensuring reliability of electric networks and quality of the electric power are considered and classified.

**Conclusions:** Automatic reconfiguration of the distribution network, as well as automatically controlled devices FACTS and electrical energy storage devices, are effective new means of ensuring the activity of the distribution network in order to meet the increased requirements of consumers to the reliability of their electricity supply and the quality of the electricity supplied to them.

**Key words:** automatic reconfiguration, activity, power supply system, power supply system reliability, power quality.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Закономерности развития электроэнергетических систем (ЭЭС) и изменения их свойств в будущем в большей мере характеризуются трансформацией технологий у потребителей [1]. Происходит рост доли электроприемников с новыми нагрузочными характеристиками, определяемыми новыми устройствами подключения таких электроприемников к системе через блоки «выпрямители плюс стабилизаторы» и «выпрямители плюс инверторы». Имеет

место возрастание на предприятиях доли нелинейной и резкопеременной нагрузки [2]. Все в большей мере потребители используют компьютерную и цифровую технику для управления технологическими процессами [3]. Эти факторы, помимо негативного влияния на системы электроснабжения (СЭС) некоторых из них, существенно повышают требования потребителей к надежности их электроснабжения и качеству поставляемой им электроэнергии выше действующих стандартов [4, 5] и требуют расширения

состава средств, обеспечивающих возросшие требования по надежности и качеству. Одним из перспективных направлений решения обсуждаемых проблем является придание системам электроснабжения (распределительным электрическим сетям) свойства активности.

## II. ПОНЯТИЕ АКТИВНОСТИ

Понятие активности распределительных электрических сетей в интеллектуальных ЭЭС с использованием инновационных технологий подробно анализируется в [6–9]. В работе на основе обобщения этого анализа активность системы электроснабжения (распределительной электрической сети) подразумевает использование автоматических средств управления конфигурацией и параметрами системы с целью рационального (оптимального) обеспечения требований экономической эффективности нормальных, ремонтных, послеаварийных и других режимов, надежности электроснабжения потребителей, качества поставляемой потребителям электроэнергии при координации взаимодействия с активными потребителями, имеющими возможности управлять собственным электропотреблением в темпе процесса в зависимости от ценовой ситуации. При этом, в отличие от традиционных средств, реализующих однозначно заданные управляющие воздействия в отношении управления конфигурацией и параметрами СЭС, активные реконфигурация и изменения параметров системы подразумевают адаптацию управляющих воздействий к конкретной текущей ситуации. Примем это определение активной СЭС за основу при последующем рассмотрении проблемы.

## III. АНАЛИЗ СРЕДСТВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Проанализируем сначала традиционные средства обеспечения надежности электроснабжения потребителей и качества поставляемой им электроэнергии. К нормируемым традиционным показателям качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей, или приемники электрической энергии, относятся: отклонение частоты, отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия трехфазной системы напряжения [5].

Наряду с традиционными в настоящее время имеются новые средства обеспечения надежности электрических сетей и качества электроэнергии. К таким новым средствам и мероприятиям относятся, прежде всего, автоматическая реконфигурация сети, управляемые устройства FACTS и управляемые накопители электроэнергии, автоматическое выделение островов и автоматическая их синхронизация. Распространенными целями автоматической реконфигурации распределительной электрической

сети являются минимизация потерь активной мощности, повышение надежности электрической сети и ряд других.

Рассматривая реконфигурацию электрической сети, учитывая то, что эта процедура имеется в виду в качестве одной из основных в определениях активной электрической сети, а кроме того она может быть использована для решения различных задач обеспечения качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

## IV. ВЫВОДЫ

Автоматическая реконфигурация распределительной электрической сети, а также автоматически управляемые устройства FACTS и накопители электрической энергии являются эффективными новыми средствами обеспечения активности распределительной сети с целью удовлетворения возросших требований потребителей к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии. Каждое из этих средств решает несколько различных по смыслу и содержанию задач обеспечения надежности и качества электроснабжения потребителей. Из этого следует, что проблема выбора параметров и размещения каждого из этих средств (например, мест установки управляемых коммутационных аппаратов для реализации операций по реконфигурации сети) является многокритериальной. При этом, исходя из существа требований по надежности и качеству, целесообразно при формализации проблемы определить, какие из факторов необходимо рассматривать в качестве субкритериев, а какие можно представить как ограничения. Указанная структуризация проблемы требует специального детального рассмотрения.

## Список литературы

- [1] Воропай Н.И., Осак А.Б. Электроэнергетические системы будущего // Энергетическая политика. 2014. № 5. С. 60–63.
- [2] Чумаченко В.В., Вериго А.Р. Обеспечение качества электроэнергии и надежности электроснабжения крупного промышленного предприятия // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 38–43.
- [3] Черезов А.В. Целевая модель обеспечения надежности электроснабжения в современном цифровом мире // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 6–10.
- [4] Правила устройства электроустановок. М.: ЗАО «Энергосервис», 2006, 440 с.
- [5] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
- [6] Mc. Donald J. Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks // Energy Policy. 2008. Vol. 36, № 6. P. 4346–4351.
- [7] D'Adamo C. Active distribution networks: General features, present status of implementation and operation practices / C. D'Adamo [et al.] // Electra. 2009. № 246. P. 22–39.
- [8] Celli G., Giani E., Soma G.G., Pilo F. Planning of reliable active distribution systems // CIGRE 2012 Session. Paris, 2012. 8 p.
- [9] Hidalgo R., Abbey Ch., Joos G. A review of active distribution networks enabling technologies // IEEE PES 2010 General Meeting. Minneapolis, 2010. 9 p.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ХАБ КАК БАЗОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Герасимов Д.О.<sup>1</sup>, Суслов К.В.<sup>1</sup>, Уколова Ек.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН»

Иркутск, Россия

ukolovaekaterina@yandex.ru, gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Современные энергетические системы предполагают активное участие потребителя в формировании своего спроса и реализации режима функционирования системы. Этому способствует интеллектуализация оборудования, систем управления и учета энергии. Для моделирования мульти-энергетической сети возникает необходимость наглядной визуализаций структурных или алгоритмических схем.

**Материалы и методы:** При решении поставленной задачи применялась теория энергетических хабов.

**Результаты:** Рассмотрены формальный алгоритм построения мульти-энергетической системы и количественное определение различных типов энергий, возможных для преобразования друг в друга.

**Выводы:** Авторами предложена функциональная схема обобщенного канала энергопотребления, позволяющая наглядно представить внутренние связи и произвести анализ потоков распределения энергии с учетом преобразования и накопления.

**Ключевые слова:** энергетический хаб, интегрированная система энергоснабжения, преобразователи энергии, накопители энергии, оптимизация энергопотребления, microgrids, экономическая эффективность использования энергоресурсов, мульти-энергетическая система, Smart Grid, хранение энергии.

## ENERGY HUB AS THE BASIC CONCEPT OF INTEGRATED ENERGY SYSTEMS

Gerasimov D.O.<sup>1</sup>, Suslov K.V.<sup>1</sup>, Ukolova Ek.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University

<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Irkutsk, Russian Federation

ukolovaekaterina@yandex.ru, gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru

## Abstract

**Background:** Modern power systems assume active participation of the consumer in formation of the demand and realization of a mode of functioning of system. This is facilitated by the intellectualization of equipment, control systems and energy metering. To model a multi-energy network, it is necessary to visualize structural or algorithmic schemes.

**Materials and methods:** the theory of energy hubs was applied in solving the problem.

**Results:** a formal algorithm for constructing a multi-energy system and quantifying the different types of energies that can be transformed into each other is Considered.

**Conclusions:** The authors propose a functional scheme of the generalized energy consumption channel, which allows to visualize the internal connections and analyze the energy distribution flows taking into account the transformation and accumulation.

**Key words:** energy hub, integrated power supply system, energy converters, energy storage, energy consumption optimization, microgrids, energy efficiency, multi-energy system, Smart Grid, energy storage.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные энергетические системы предполагают активное участие потребителя в формировании своего спроса и реализации режима функционирования системы. Этому способствует интеллектуализация оборудования, систем управления и учета энергии, наличие телекоммуникаций и информационного обеспечения. Традиционные распределительные сети имеют некоторые недостатки,

связанные с непрерывностью производства и потребления электроэнергии, то есть невозможностью хранения электроэнергии и отсутствием ценозависимого потребления, которое могло бы вносить существенный вклад в сглаживание графика потребления.

Новые концепции оцениваются и разрабатываются для эффективной интеграции и надежной работы нагрузок в децентрализованных энергетических системах. Для этого

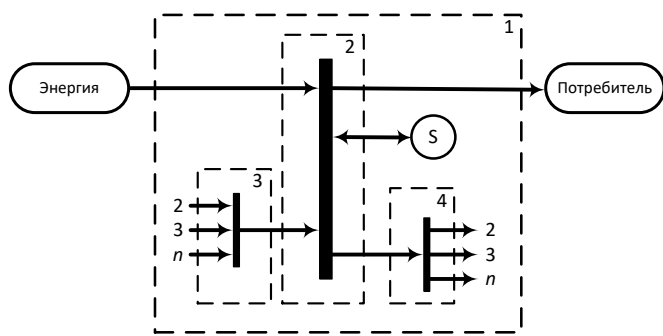


Рис. 1 – Функциональная схема обобщенного канала энергоснабжения: 1 – блок, отражающий внутренние связи каналов энергии; 2 – блок преобразования и передачи; 3 – блок суммирования энергии от преобразователей; 4 – блок преобразования различных типов энергии друг в друга; S – накопитель энергии

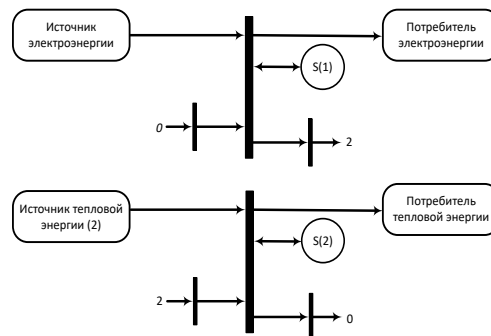


Рис. 2 – Функциональная схема электро- и теплоснабжения, представленная в виде обобщенного хаба: S(1) и S(2) – накопители электро- и теплоэнергии

разрабатываются математические модели на основе энергетических хабов. В такой системе каждый объект энергоснабжения будет являться частью мультиэнергетической системы. Интеллектуальная система предполагает интеграцию самоорганизующихся систем электро-, тепло-, газоснабжения, построенных согласно концепции мультиэнергетической системы. Данная модель была рассмотрена в статье [5]. На основе данной модели можно построить разные алгоритмы автоматического управления интегрированной системой энергоснабжения, в зависимости от ее характеристик и составляющих элементов, а также целей потребителя.

## II. СТАДИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки возможностей уменьшения затрат на энергоносители возможно применение различных моделей.

Целесообразно использовать принцип энергетического хаба, который представляет собой модель комплекса устройств, реализующего взаимодействие между производителями энергоресурсов с одной стороны и потребителями – с другой стороны.

Основными функциями хаба являются передача, преобразование и хранение энергоресурсов. В хабе энергоресурсы могут передаваться от входа к выходу без изменения формы (например, электроэнергия) или только со значительным изменением качества (например, трансформация напряжения). Кроме того, энергетические ресурсы могут быть преобразованы из одной формы в другую.

Для использования концепции мульти-энергетических систем необходимо провести анализ различных функциональных схем мульти-энергетических систем. Техническая реализация режимов энергоснабжения имеет следующие характерные черты: система передачи энергии (линии электропередачи, тепло- и газопроводы и т. п.); система преобразования энергии (трансформаторы, теплообменные аппараты); система накопления (аккумуляторы, газовые резервуары); система преобразования одного вида энергии в другой (газотурбинные установки, нагревательные котлы).

Следовательно, обобщенный канал энергоснабжения энергетического хаба должен иметь все эти функциональные блоки и учитывать особенности реальных каналов энергоносителей.

Авторами предлагается функциональная схема обобщенного канала энергоносителя для энергетического хаба (рис. 1).

При наличии нескольких энергетических каналов данная схема позволяет определить возможности технической реализации преобразователей одного вида энергии в другой, а также возможности применения накопителей данных типов энергии.

В случае невозможности технической реализации одного из каналов преобразования энергии в другой вид при моделировании, по соответствующему входу (выходу) блока 3 (4) подается ноль (рис. 1).

На рис. 2 представлена функциональная схема систем электро- и теплоснабжения в виде обобщенного хаба.

В общем случае элементами такой интегрированной энергосистемы будут являться накопители электрической и тепловой энергии и преобразователи электрической энергии в тепловую.

## III. ВЫВОДЫ

Представлена модель обобщенного канала в виде мультиэнергетической системы. Задачу по снижению затрат, вызванных максимальными значениями тарифа за электроэнергию, можно решить, используя накопители электроэнергии. Возможным решением является применение преобразователей электрической энергии в тепловую или применение накопителей.

## Список литературы

- [1] Arnold M., Andersson G. Decomposed electricity and natural gas optimal power flow. PSCC, 2008. 7 p.
- [2] Beuzekom I., Gibescu M., and Other A.N. Review of multi-energy system planning and optimization tools for sustainable urban development // IEEE Eindhoven PowerTech, 2015.
- [3] Beuzekom I., Gibescu M. and Other A.N. Optimal planning of integrated multi-energy systems // IEEE Manchester PowerTech, 2017.
- [4] Gabrielli P. Gazzani M. and Other A.N. A MILP model for the design of multi-energy systems with long-term energy storage // Computer Aided Chemical Engineering. 2017. P. 2437–2442.
- [5] Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. Имитационное моделирование мультиэнергетических систем // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017. С. 147–150.



# РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Французова А.Д., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
minskih@bk.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** С целью предупредить возможное увеличение затрат на приобретение электроэнергии, предприятия проводят оптимизацию и иные мероприятия по сокращению количества потребляемой электроэнергии. Однако подобные методы могут ограничить способность компании к ведению достойной конкурентной борьбы и привести к потере компанией конкурентных преимуществ. Таким образом, необходимо определить инструменты, которые позволят организациям повысить энергоэффективность своего производственного процесса.

**Материалы и методы:** Обзор литературных источников, метод сравнительного анализа.

**Результаты:** Наиболее эффективно проблему энергосбережения решает комплекс технических и административных мероприятий.

**Выводы:** Грамотное использование инструментов на энергообеспечивающих предприятиях приведет к выстраиванию тарифной политики, которая простимулирует поставщиков по собственной инициативе увеличивать энергоэффективность.

**Ключевые слова:** реструктуризация электроэнергетики, энергосбережение, автоматизированная система управления энергообеспечением промышленной организации, диспетчерские системы, системы технического учета.

# THE ROLE OF AUTOMATION IN THE MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AT ENTERPRISE

A. Frantsuzova, N. Yudina, S. Livshits, T. Dunaeva  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
minskih@bk.ru

## Abstract

**Background:** In order to prevent a possible increase in costs for the purchase of electricity, enterprises are optimizing and other measures to reduce the amount of electricity consumed. However, such methods may limit the company's ability to conduct worthy competition and lead to the loss of the company's competitive advantages. Thus, it is necessary to identify tools that will allow organizations to increase the energy efficiency of their production process.

**Materials and methods:** Bibliographic review of relevant sources, method of comparative analysis.

**Results:** The most effective energy saving problem is solved by a complex of technical and administrative measures.

**Conclusions:** Competent use of tools in energy supply enterprises will lead to the formation of a tariff policy that will stimulate suppliers on their own initiative to increase energy efficiency.

**Key words:** restructuring of the electric power industry, energy saving, automated system of power supply management of industrial organization, dispatching systems, technical accounting systems.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире развитие промышленности оказывает непосредственное влияние на рост потребностей общества в энергоресурсах. Вследствие данного факта издержки на энергопотребление в целом значительно увеличились. Оптимизация процесса энергопотребления и экономия энергоресурсов – одна из основных тенденций экономики XXI века, так как абсолютно все заинтересованы в повышении энергетической эффективности производства [1].

Реализация программы управления энергией – стратегический способ управления издержками, повышения общей эффективности и создания положительного образа.

Программы управления энергией реализуются в четыре этапа.

Шаг 1. Аудит и учет потребления энергии.

Реализация модели активного управления энергией начинается со сбора данных. Сбор точной и релевантной информации посредством измерений и аудита закладывает основы эффективного планирования.

Шаг 2. Устранение очевидных недостатков.

Использование собранных данных для сокращения энергопотерь. Многие производства начинают с пассивных мер повышения энергоэффективности, направленных на сокращение потерь в работе потребителей энергии. Это может быть переход на экономичные осветительные

приборы, трансформаторы с малыми потерями и высокоэффективные электродвигатели. Просветительские программы и формальное обучение – все это важные и полезные способы завоевания их интереса и вовлечения в сотрудничество.

Шаг 3. Оптимизация за счет внедрения автоматизации и управления.

Взятые в отдельности пассивные меры не дают полного эффекта.

Шаг 4. Мониторинг, обслуживание и постоянное совершенствование.

Развитая система автоматизации и управления способна сэкономить до 35 % энергии. Имеющийся опыт говорит о том, что в отсутствие надлежащего мониторинга и обслуживания 10 % этой экономии теряется. Для постоянного поддержания эффективности энергосистем необходима мощная, охватывающая все предприятие программа активного мониторинга, анализа и выявления отклонений, а также оперативного реагирования.

Предприятие, стремящееся к максимальной энергоэффективности, будь то с целью экономии или снижения нагрузки на окружающую среду, достигнет со временем точки, когда дальнейший прогресс невозможен без значительных капитальных вложений.

В современном мире развитие промышленности оказывает непосредственное влияние на рост потребностей общества в энергоресурсах. Вследствие данного факта издержки на энергопотребление в целом значительно увеличились. Оптимизация процесса энергопотребления и экономия энергоресурсов – одна из основных тенденций экономики XXI века, так как абсолютно все заинтересованы в повышении энергетической эффективности производства [1].

## II. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

В последние годы обострилась проблема экономии электроэнергии. Проведение реструктуризации электроэнергетики, а также модели оптового рынка электроэнергии (ОРЭ) делают более значимым технико-экономический аспект взаимоотношений потребителя и субъектов электроэнергетики и позволяют открыть новые возможности для увеличения КПД энергоэффективности производства, сокращая расходы на приобретение электроэнергии.

Сравнительный анализ показывает, что применение автоматизированных систем технического учета, а также систем автоматизированного управления позволяет определить потенциально затратные моменты в производственном процессе и выработать комплекс мероприятий по приведению компании к наибольшей энергоэффективности.

Для промышленной компании важную роль играет качество внедряемых информационных технологий. Опытный подход к управлению по международным стандартам позволяет компенсировать недостатки в организации рабочих процессов и создать конкурентные преимущества для компании. Соблюдение рекомендаций международных стандартов в управлении позволит избежать ошибок и устранить недостатки в организации производственных процессов, а также укрепить позиции компании в конкурентной борьбе.

Особую значимость для промышленных организаций подразумевает контроль состояния оборудования системы энергообеспечения, контроль текущих параметров системы энергоснабжения, распределение энергии и энергоносителей разных видов, соблюдение произведенных и потребленных энергоресурсов; планирование и прогнозирование потребления и собственной генерации энергоресурсов.

Очередь внедрения автоматизации происходит в данный период и связана с повышением цен на энергоносители, вследствие чего промышленные организации углубленно изучают вопросы, связанные с энергоэффективностью.

Увеличение энергоэффективности происходит за счет обновления и внедрения инновационных идей и технологий, но сначала необходимо осуществить детальный контроль за собственным потреблением.

Особую актуальность приобретают внедрение диспетчерских систем, а также систем технического учета (АСТУЭ), которые в совокупности позволяют промышленным компаниям выявлять и моментально устранять текущие проблемы и производить измерения эффективности вложений в мероприятия по энергосбережению [2].

Автоматизированная система управления энергообеспечением промышленной организации сможет решать задачи оценки энергоэффективности основного производственного оборудования и основных производственных процессов, а также разрабатывать мероприятия по увеличению энергоэффективности главных производственных процессов компании в целом.

Таким образом, грамотное использование инструментов на энергоснабжающих предприятиях приведет к выстраиванию тарифной политики, которая простимулирует поставщиков по собственной инициативе увеличивать энергоэффективность.

## Список литературы

- [1] Ушаков В.Я. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности: социально-экономические, организационные и правовые аспекты: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 280 с.
- [2] Литвак В.В., Вагнер М.А. Энергосбережение: учеб. пособие. Томск: STT, 2012. 212 с.

# ВОПРОСЫ НОРМИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ЭЭС В УСЛОВИЯХ РЫНКА

Чукреев М.Ю.

ФГБУН Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми  
научного центра Уральского отделения Российской АН (ИСЭ и ЭПС Коми НЦ УрО РАН)  
Сыктывкар, Россия  
mchukreyev@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В статье представлена методология оценки показателей балансовой надежности электроэнергетических сетей для условий либерализации, дается подробный сравнительный анализ российских и зарубежных показателей балансовой надежности, описываются вопросы моделирования задачи оценки показателей балансовой надежности электроэнергетических сетей и практические результаты исследований.

**Результаты:** Проведены исследования и выявлены основные факторы влияющие на качество принимаемых решений проблемы нормирования надежности при подготовке научно-технической документации.

**Выводы:** Современные возможности информационного наполнения задачи обоснования средств обеспечения надежности требуют актуализации методических подходов к определению всех составляющих нормативного резерва генерирующей мощности.

**Ключевые слова:** ЭЭС России, показатели надежности, электроэнергетическая система, показатели балансовой надежности.

# QUESTIONS OF RELIABILITY RELATED IN PLANING OF LIBERALIZED ELECTRIC POWER SYSTEMS DEVELOPMENT

M. Chukreyev

Federal State Budgetary Scientific Institution – Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North  
in the Komi Scientific Center, Ural Branch of the RAS  
Syktyvkar, Russian Federation  
mchukreyev@gmail.com

## Abstract

**Background:** The paper presents the methodology of assessment of adequacy of power grids for the circumstances of liberalisation of power sector, gives the detailed comparative analysis of Russian and foreign indicators of adequacy and its criterion values, describes the issues of modelling the adequacy assessment of power grids and practical results of research.

**Results:** Investigations were carried out and the main factors influencing the quality of the decisions taken by the problem of rationing reliability during the preparation of scientific and technical documentation were revealed.

**Conclusions:** Modern possibilities of informational filling of a problem of a substantiation of means of maintenance of reliability, require actualization of methodical approaches to definition of all components of a standard reserve of generating capacity.

**Key words:** UPS of Russia, reliability criteria, power system, adequacy parameter.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Задаче обеспечения балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем (ЭЭС), и Единой энергетической системы (ЕЭС) России в частности, всегда уделялось должное внимание при разработке стратегии развития электроэнергетической отрасли на перспективу от 5 до 20 лет. В 70-х годах прошлого столетия выстроилась достаточно строгая иерархическая система, в рамках которой были разработаны эффективные модели, позволяющие решать весь комплекс задач, связанных с управлением развитием энергосистем ЭЭС. В эту систему помимо решения задач оптимизации

перспективного развития генерирующих мощностей и основной электрической сети входили и задачи оценки показателей балансовой надежности и обоснования средств их обеспечения [1].

Принятие решений по обоснованию средств обеспечения надежности в этой системе планирования осуществлялось на уровне отделений проектного института «Энергосеть-проект» и курировалось Министерством энергетики страны. Важно отметить, что именно этим институтом разрабатывались нормативы по обеспечению балансовой надежности ЭЭС страны, которые входили составной частью в нормативно-технические документы (НТД) – методические

указания по проектированию энергосистем. Для обоснования этих нормативов разрабатывалось специальное программное обеспечение. Такой подход позволял формировать резервы генерирующей мощности в объединениях ЭЭС на краткосрочный (5–7 лет) и долгосрочный (до 20 лет) периоды.

Приведенная организация работ по обоснованию средств обеспечения надежности в нашей стране очень близка к принятой в Единой ЭЭС Северной Америки. Этой работой в Северной Америке занимается Совет по надежности – NERC (American Electric Reliability Corporation), который проводит ежегодный анализ балансовой надежности на перспективу от 2 до 10 лет. Он также разрабатывает обязательные стандарты надежности, в том числе и балансовой. Североамериканская школа по вопросам обеспечения балансовой надежности ЭЭС [2, 3], как и отечественная [4], имеет давние традиции. Можно сказать, что они развивались параллельно с учетом специфических особенностей электроэнергетической отрасли своих стран.

Реформирование электроэнергетики России, начатое в середине 90-х годов прошлого столетия, привело к снижению интереса к вопросам обеспечения балансовой надежности при рассмотрении вариантов развития ЕЭС России. Этому способствовало множество факторов: резкое, практически на треть, снижение электропотребления, изменение форм собственности, ухудшение качества управленческого персонала в электроэнергетической отрасли, закрытие отраслевых институтов и многое другое. В ФЗ «Об электроэнергетике» [5] в какой-то мере была восстановлена необходимость решения этой задачи. Вопросы обоснования средств обеспечения надежности были законодательно закреплены за ведущей в электроэнергетике организацией ОАО «СО ЕЭС».

С 2009 г. АО «СО ЕЭС» совместно с ПАО ФСК ЕЭС ежегодно выполняется работа «Схема и программа развития ЕЭС России на семилетний период» (в дальнейшем – СиПР). В 2010–2012 гг. АО «СО ЕЭС» с привлечением специалистов в области надёжности других организаций, были разработаны регламентирующие документы: проект технологических правил работы ЭЭС (правила технологического функционирования – ПТФ) и новые НТД. Именно в этих документах чётко оговорено, что расчёты показателей балансовой надёжности ЕЭС России должны проводиться для решения следующих задач:

- 1) определение необходимых резервов мощности и запасов пропускной способности электрических сетей на 7-летний период (ежегодно);
- 2) прогноз развития в рамках разработки Генеральной схемы размещения объектов энергетики на 15 летний период (один раз в 3 года).

## II. ПОЛНЫЙ РЕЗЕРВ МОЩНОСТИ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ

При планировании развития отрасли всегда выполняется так называемый баланс мощности для ЕЭС в целом и ее объединений. Форма баланса применительно к НТД включает две позиции (рис. 1):

- расходную часть «Спрос» (максимум потребления мощности, перспективный нормативный РГМ, экспорт мощности в энергосистемы зарубежных стран);

- приходную часть «Покрытие» (установленная мощность, ограничения мощности на максимум нагрузки и т. п.).



Рис. 1 – Структура прогнозируемого баланса мощности

В расходной части баланса в плане обеспечения надежности наиболее важной является характеристика нормативного перспективного резерва генерирующей мощности. В НТД разных редакций он соответствует нормативному (расчетному) резерву. Нормативный перспективный резерв генерирующей мощности необходим для обеспечения надежного функционирования энергосистемы и включает в себя ремонтный, компенсационный и стратегический резервы. Деление условное, при этом приведенные составляющие считаются независимыми. Это в значительной степени упрощает решение задачи обоснования нормированного резерва мощности.

Следует отметить, что с запуском в стране рынка мощности, нормы продолжительности и периодичности ремонтов основного оборудования электростанций утратили нормативную роль. В результате в современных рыночных условиях величина снижения мощности для проведения плановых ремонтов в осенне-зимний период определяется не столько нормами на проведение ремонтов, сколько техническими и финансовыми возможностями энергокомпаний с учетом режимно-балансовой ситуации в энергосистеме и правилами оптового рынка электрической энергии (мощности).

В силу перечисленных причин необходима актуализация методических подходов к определению перспективной ремонтной составляющей резерва мощности, как компромисса между существовавшими ранее нормами, статистической информацией о проведении ремонтов, отражающей функционирование энергетики в последнее десятилетие, балансом между рыночными отношениями и техническими потребностями.

Сложность определения нормативного резерва генерирующей мощности в основном связана с нахождением компенсационного резерва мощности, зависящего от множества случайных факторов и событий. Действие случайных факторов и событий могут быть оценены определенными показателями надежности. Именно поэтому, в соответствии с [4], к задачам балансовой надежности ЭЭС, в том числе и при управлении развитием ЕЭС России, относятся лишь те, решение которых связано с необходимостью учета:

- анализа отказов из-за аварийных повреждений элементов системы (аварийная составляющая компенсационного резерва);
- нерегулярных колебаний и ошибок прогнозирования нагрузок (нагрузочная составляющая компенсационного резерва).

Развитие генерирующих источников и электрических связей требует существенных финансовых затрат и обладает инерционностью. Это должно отражаться на уровнях резервирования, принимаемых при перспективном планировании развития энергосистем, а следовательно, и на нормативных значениях принимаемых показателей балансовой надежности.

### III. ПОКАЗАТЕЛИ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ

Выбирая показатели, характеризующие балансовую надежность ЭЭС, следует понимать, что их число по возможности должно быть минимальным и в то же время достаточным для принятия управленческих решений. Выбранные показатели балансовой надежности ЭЭС должны быть достаточно чувствительными к возмущениям, приводящим к снижению или увеличению надежности системы. В отечественных [4, 6] и зарубежных публикациях [2, 3] приведенным рекомендациям наиболее полно отвечают:

- вероятность бездефицитной работы территориальных зон ЭЭС ( $p = 1 - J_d$ ), где  $J_d$  – интегральная вероятность появления дефицита мощности;
- среднее число дней дефицита мощности, которое в западной литературе носит название длительности потери нагрузки в сутках в год – LOLE (Loss of Load Expectation) [2];
- среднее число часов дефицита мощности в год, которое в западной литературе носит название длительность потери нагрузки в часах – LOLH (Loss of Load Hours).

В отечественной практике широко используется вероятностный показатель  $J_d$  [4, 6]. Определение показателей балансовой надежности в виде  $J_d$  осуществляется путем моделирования случайных состояний генерирующей мощности, вызванных аварийными выходами оборудования, для каждого часа суточного изменения нагрузки (24 ступени) по всем 365 суткам года или 250 рабочим дням. При определении этого вероятностного показателя балансовой надежности многозонной ЭЭС, как правило, используются формы представления режима электропотребления, приведенные на рис. 2, а.

В зарубежной практике для оценки балансовой надежности в основном используются два вероятностных показателя балансовой надежности – LOLE и LOLH. Определение показателя LOLE связано с моделированием случайных состояний генерирующей мощности не для каждого часа суточного изменения нагрузки, а только для его пикового максимального значения [2] (одна ступень суточного графика) по всем 365 суткам года (рис. 2, б). Определение показателя LOLH в значительной степени совпадает с определением отечественного показателя  $J_d$ . Общепринятые стандарты нормативов для некоторых европейских стран [9]: Франция – LOLH = 3 ч/год, Великобритания и Нидерланды – LOLH = 4 ч/год, Ирландия – LOLH = 8 ч/год, Скандинавские страны – LOLH = 0,001.

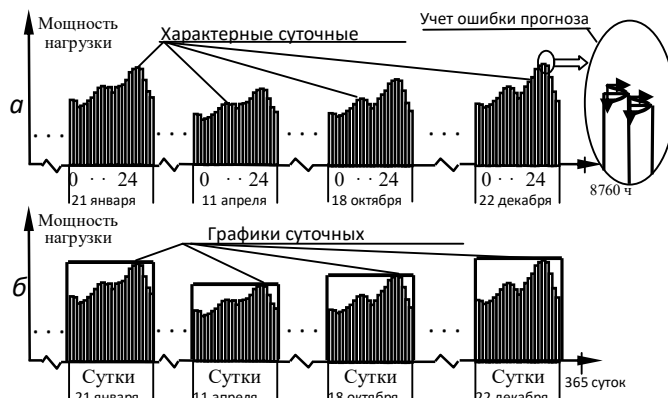


Рис. 2 – Формы представления режима электропотребления: а – часовые суточные графики 365 дней года; б – график суточных максимумов всех дней года

### IV. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРИНИМАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ НТД

Уже отмечалось, что практически во всех НТД задача определения величины компенсационного резерва мощности осуществлялась силами ОАО «Институт Энергосетьпроект» с привлечением специалистов ИСЭ и ЭПС Коми НЦ УрО РАН. Известно, что показатели балансовой надежности ЭЭС зависят в основном от влияния перечисленных ниже условий и факторов, носящих в том числе и вероятностно определенный характер:

- модель расчетной схемы ЕЭС России с выделенными территориальными зонами и связями их соединяющими;
- располагаемые мощности отдельных территориальных зон;
- структура генерирующих мощностей;
- плановый ремонт оборудования;
- снижение генерирующей мощности территориальных зон из-за аварийного повреждения агрегатов электростанций;
- регулярные и нерегулярные максимумы нагрузок территориальных зон и графики их изменения в разрезе года и суток;
- нерегулярные колебания нагрузки и ошибки прогнозирования спроса потребителей;
- запасы пропускной способности связей в нормальных и аварийных режимах между выделенными в модели расчетной схемы ЕЭС России территориальными зонами.

Совершенно очевидно, что все перечисленные выше факторы учитывались при оценке показателей балансовой надежности в процессе подготовки НТД по проектированию энергосистем разных годов выпуска. При этом следует понимать, что информационное наполнение задачи в современных условиях более адекватно отражает реально протекающие процессы. Это естественным образом должно отражаться на качестве принимаемых решений.

При обосновании долей резерва мощности в РТД в качестве модели расчетной схемы ЕЭС выступала схема с числом территориальных зон, равным числу объединенных

ЭЭС (ОЭС). Ряд ОЭС представлялся двумя территориальными зонами, но в любом случае расчетная схема не превышала 10 территориальных зон. В условиях формирования долей резерва в редакции РТД 2012 г. рассматривалась расчетная схема с 50 территориальными зонами, разработанная ОАО «Институт Энергосетьпроект» по заданию ОАО «СО ЕЭС». В последнее время специалистами службы перспективного развития ОАО «СО ЕЭС» для оценки показателей балансовой надежности применялись различные схемы ЕЭС России с числом территориальных зон от 56 до 102. Очевидно, что расчетная схема ЕЭС России влияет на показатели балансовой надежности и, следовательно, на величины компенсационного резерва мощности. Именно поэтому при выполнении работы «СиПР» необходимо проводить коррекцию величин компенсационного резерва территориальных зон, полученных на основе данных в виде долей процентов.

По следующим двум факторам (плановые и аварийные ремонты оборудования) следует отметить положительную тенденцию к их реставрации в современных условиях специалистами АО «СО ЕЭС». Следует отметить, что если ранее подобная информация была доступна для широкого круга специалистов (справочники), то сегодня она доступна только для узкого круга специалистов АО «СО ЕЭС». По этому направлению, на наш взгляд, происходит тенденция завышения норм планового ремонта и, наоборот, занижения норм аварийного. Связано это с переводом генерирующими компаниями ряда аварийно выведенных агрегатов в категорию планового ремонта, а также наличием избыточных мощностей, которые позволяют проводить ремонты в зимние периоды времени прохождения максимальных нагрузок.

Следующие два пункта касаются моделирования режимов электропотребления (графики нагрузок, их нерегулярные колебания и ошибки прогноза). Для оценки показателей балансовой надежности при обосновании компенсационного резерва мощности используется понятие почасового графика нагрузки территориальной зоны характерного зимнего рабочего дня, при условии его распространения только на рабочие дни года (250 суток). Это делается условно. За рубежом применяется такая же практика, только используются не суточные графики, а максимальные нагрузки всех суток года (365 значений).

Нерегулярный максимум нагрузки определяется значениями нерегулярных колебаний, которые принято подчинять нормальному закону распределения. По последним исследованиям специалистов АО «СО ЕЭС» нерегулярные колебания нагрузки в большой степени зависят от погодных условий и в значительной степени коррелированы между территориальными зонами. Это кардинально изменяет применяемый ранее подход к их моделированию.

Последний пункт касается запасов пропускной способности связей между территориальными зонами модели расчетной схемы ЕЭС России. Сложность определения этих данных состоит в том, что модель расчетной схемы

ЕЭС для оценки показателей балансовой надежности не всегда реально отражает существующие процессы, здесь всегда присутствует определенная погрешность. В то же время без формирования модели расчетной схемы ЕЭС задачу оценки показателей балансовой надежности на реально существующих схемах реализовать невозможно.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время назрела необходимость в разработке новых, отвечающих современным условиям, требований к информационному наполнению задачи оценки балансовой надежности для анализа перспективных вариантов развития ЭЭС. Здесь большой спектр работ в направлении сбора и обработки ретроспективной информации по режимам электропотребления (особенно ее случайной составляющей, вызванной температурным фактором), формированию плановых и аварийных ремонтов генерирующего и сетевого оборудования и многим другим аспектам.

Современные возможности информационного наполнения задачи обоснования средств обеспечения надежности требуют актуализации методических подходов к определению всех составляющих нормативного резерва генерирующей мощности. Необходимо найти компромисс между существовавшими ранее нормами на проведение аварийных и плановых ремонтов, имеющейся статистической информацией, отражающей функционирование энергетики в последнее десятилетие, балансом между рыночными отношениями и техническими потребностями. С этих позиций, используя отечественный и зарубежный опыт, требуется разработка новых методических рекомендаций к оценке показателей балансовой надежности и обоснованию резервирования перспективных схем развития ЕЭС России.

## Список литературы

- [1] Волков Э.П., Баринов В.А. Управление развитием и функционированием электроэнергетики в условиях формирования рыночных отношений // Изв. РАН. Энергетика. 2002. № 5. С. 37–48.
- [2] Billinton R. Power System Reliability Evaluation. New York, London, Paris. Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 299 p.
- [3] Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. New York and London, Plenum Press, 1994. 351 p.
- [4] Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. М.: Наука, 1986. 252 с.
- [5] Об электроэнергетике: федер. закон Российской Федерации от 26 марта 2003 г. № 35-03.
- [6] Маркович И.М. Режимы энергетических систем. М.: Энергия, 1969. 351 с.
- [7] Чукарев Ю.Я., Чукарев М.Ю. Модели оценки показателей балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2014. 207 с.
- [8] Методические указания по проектированию развития энергосистем: утв. приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г., № 281. М.: Минэнерго РФ, 2003.
- [9] Кучеров Ю.Н., Федоров Ю.Г. Развитие нормативного и методического обеспечения надежности сложных энергосистем и энергообъединений в условиях либерализованной энергетики // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. № 6. С. 2–11.

# ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Чуркина Ю.О., Кормилицын Д.Н.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
Иваново, Россия  
churkina\_y\_o@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Применение устройств продольной емкостной компенсации (УПК) на дальних линиях электропередачи увеличивает пропускную способность таких линий, оказывает положительное влияние на статическую устойчивость, позволяет управлять режимом электропередачи. Однако при значительной степени компенсации индуктивного сопротивления линии возможно возникновение нежелательного явления, такого как колебательное нарушение устойчивости, опасного для оборудования. Таким образом, необходимо проанализировать влияние закона регулирования емкостного сопротивления УПК на динамическую устойчивость электроэнергетической системы и на качество переходного процесса.

**Материалы и методы:** Использован метод вычислительного эксперимента: построены графики изменения режимных параметров в переходном процессе при различной настройке регулирующих устройств.

**Результаты:** Построены графики изменения электрических и электромеханических режимных параметров в переходном процессе при различных законах регулирования емкостного сопротивления управляемого УПК. Выявлено влияние управляемого УПК на динамическую устойчивость электроэнергетической системы, а также на качество переходного процесса; описаны возможные нежелательные явления, возникающие при некорректной настройке УПК.

**Выводы:** При анализе полученных результатов выявлено общее положительное влияние управляемого УПК на качество переходного процесса. Также выявлена возможность возникновения нежелательных эффектов. Предложены условия настройки УПК, способствующие улучшению динамической устойчивости режима электропередачи.

**Ключевые слова:** управляемые устройства продольной компенсации, динамическая устойчивость, резонансный переход.

## EFFECT OF CONTROLLED SERIES COMPENSATION ON THE DYNAMIC STABILITY OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM

D. Kormilicyn, Yu. Churkina  
Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russian Federation  
churkina\_y\_o@mail.ru

## Abstract

**Background:** The use of controlled series compensation (CSC) devices on long-distance transmission lines increases the capacity of such lines, has a positive effect on static stability, allows controlling the power transmission mode. However, with a significant degree of compensation of the inductive line impedance, undesirable phenomena, such as oscillatory instability, are dangerous for the equipment. Thus, it is necessary to analyze the influence of the law of regulation of the capacitive resistance of the CSC on the dynamic stability of the electric power system and on the quality of the transient process and to identify the conditions for the appearance of a resonance transition.

**Materials and Methods:** The method of the computational experiment is used: the graphs of the change of the regime parameters in the transient process are constructed with different adjustment of the control devices.

**Results:** The graphs of the change in electrical and electromechanical regime parameters in the transient process under various laws governing the capacitive resistance of the controlled CSC are constructed. The influence of controlled CSC on the dynamic stability of the electric power system, as well as on the quality of the transient process, was revealed; Describes possible undesirable phenomena that may arise when the CSC is not set up correctly.

**Conclusions:** When analyzing the results obtained, the overall positive effect of the managed CSC on the quality of the transient process was revealed. Also, the possibility of undesirable effects was revealed. Conditions for adjusting the CSC, which contribute to improving the dynamic stability of the transmission mode, are proposed.

**Key words:** controlled devices of series compensation, dynamic stability, resonance transition.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С целью повышения пропускной способности дальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения в них могут быть включены устройства продольной емкостной компенсации (УПК). При этом линия становится активным элементом электрической сети, способным оказывать значительное влияние на режим [1]. Ранее было показано, что включение УПК положительно влияет на статическую устойчивость электроэнергетической системы [2]. Также необходимо исследовать влияние УПК на динамическую устойчивость электроэнергетической системы. При осуществлении регулирования емкостного сопротивления УПК также необходимо исследовать влияние на качество переходного процесса самого закона регулирования.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследуемая система включает в себя линию электропередачи напряжением 500 кВ с управляемым УПК посередине; линия соединяет между собой две электрические станции, работающие на общую нагрузку. Генераторы станций оснащены АРВ. Принципиальная схема исследуемой сети представлена на рис. 1, схема замещения – на рис. 2.

Переходные процессы в исследуемой ЭЭС математически описываются системой дифференциально-алгебраических уравнений [3]:

- уравнения Парка-Горева и уравнение движения ротора генератора – для описания электромагнитных и электромеханических процессов в генераторах;
- дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в сетевых элементах;
- уравнения баланса токов в узлах;
- законы регулирования АРВ и управляемого УПК.

АРВ осуществляет регулирование по отклонению напряжения на шинах генератора и по первой и второй производным угла положения ротора генератора в соответствии с законом:

$$\Delta E_{qe} = -K_0 \cdot (U_{\Gamma} - U_{\Gamma 0}) + (K_{1\delta} p + K_{2\delta} p^2) \cdot \delta, \quad (1)$$

где  $\Delta E_{qe}$  – изменение установившейся ЭДС;  $K_0$  – коэффициент регулирования по отклонению напряжения на шинах генератора;  $U_{\Gamma}$ ,  $U_{\Gamma 0}$  – фактическое напряжение на шинах генератора и уставка АРВ, соответственно;  $K_{1\delta}$ ,  $K_{2\delta}$  – коэффициенты регулирования по первой и второй производным угла положения ротора генератора, соответственно;  $\delta$  – угол положения ротора генератора;  $p$  – обозначение оператора дифференцирования.

Емкостное сопротивление УПК изменяется в зависимости от полного тока линии в соответствии с законом:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega \cdot (K_{1\text{УПК}} - K_{2\text{УПК}} \cdot I)}, \quad (2)$$

где  $I$  – ток через УПК;  $X_{\text{УПК}}(I)$  – сопротивление УПК;  $K_{1\text{УПК}}$  и  $K_{2\text{УПК}}$  – коэффициенты регулирования УПК.

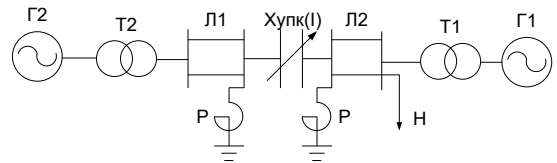


Рис. 1 – Исследуемая ЭЭС

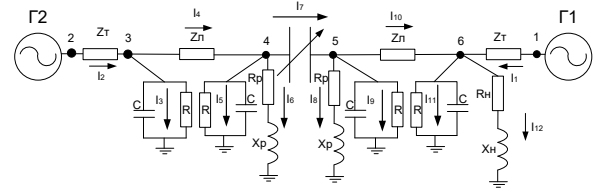


Рис. 2 – Схема замещения исследуемой ЭЭС

## III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния закона регулирования УПК на качество переходного процесса смоделирован 10 % наброс мощности и произведен расчет переходного процесса. По результатам расчета построены зависимости изменения электрических и механических параметров режима во времени. По характеру изменения режимных параметров сделаны соответствующие выводы о влиянии закона регулирования на качество переходного процесса.

## IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ УПК НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

### A. Влияние закона регулирования УПК на качество переходного процесса

Рассмотрен переходный процесс при 10 % набросе мощности при одинаковой начальной степени компенсации, но при различных законах регулирования УПК  $X_{\text{УПК}} = f(I_{\text{УПК}})$ :

$$K_{2\text{УПК}} = 0, \quad K_{2\text{УПК}} = 2, \quad K_{2\text{УПК}} = 4, \quad K_{2\text{УПК}} = 6. \quad (2)$$

При увеличении значения коэффициента регулирования  $K_{2\text{УПК}}$  емкостное сопротивление УПК изменяется более резко с изменением полного тока линии, что сказывается на качестве переходного процесса. При одном и том же изменении тока сопротивление УПК изменяется больше при большем  $K_{2\text{УПК}}$ , следовательно, увеличивается тормозящий момент на валу ротора генератора, за счет чего колебания имеют меньшую амплитуду и затухают раньше (рис. 3 и 4).

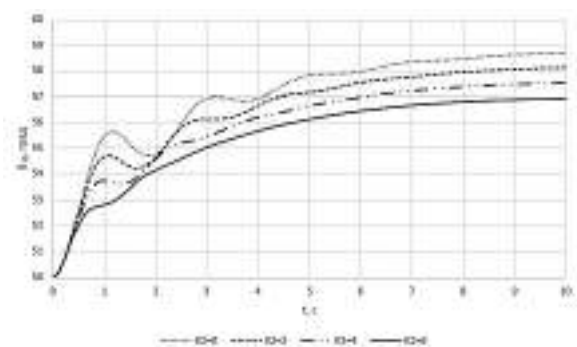
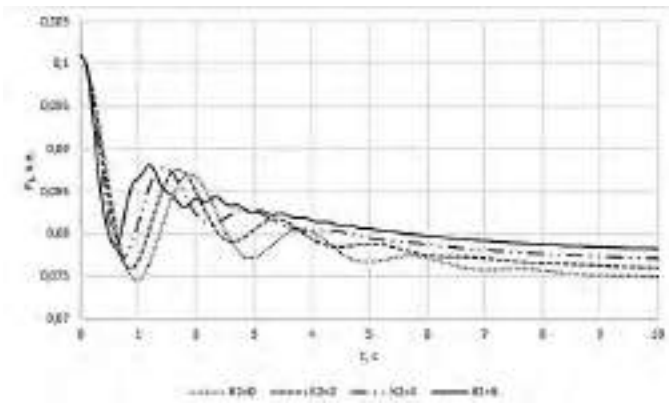
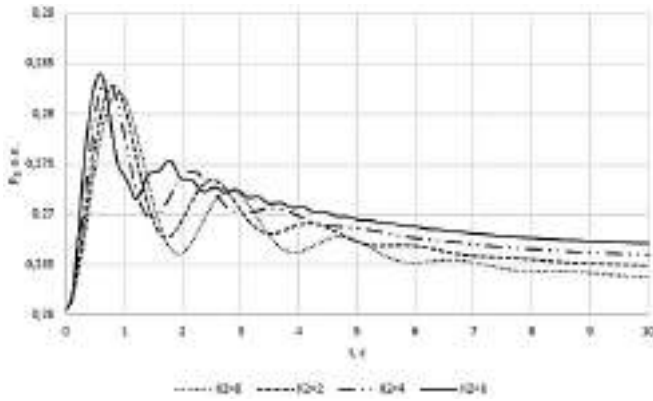


Рис. 3 – Изменение взаимного угла в переходном процессе при различных законах регулирования УПК





а



б

Рис. 4 – Изменение мощности станций 1 (а) и 2 (б) в переходном процессе при различных законах регулирования УПК

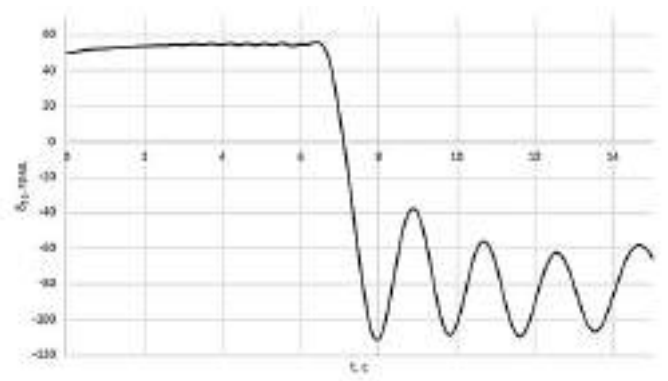
### В. Явление резонансного перехода

Исследуемый закон регулирования УПК имеет свои особенности. Так, большая степень компенсации и высокое значение коэффициента  $K_{2УПК}$  в характеристике  $X_{УПК}=f(I_{УПК})$  приводит к возникновению явления резонансного перехода [4]. При определенном значении тока через УПК его емкостное сопротивление может полностью скомпенсировать индуктивное сопротивление передачи. В таком случае в системе будет иметь место резонанс напряжений. Чем больше коэффициент регулирования  $K_{2УПК}$ , тем при меньшем токе возможно возникновение данного явления. На практике резонансу напряжений предшествует явление резонансного перехода, когда дальнейшее увеличение передаваемой по линии мощности происходит при снижении взаимного угла между векторами напряжений по концам линии, что приводит к потере устойчивости. Об этом можно судить по характеру изменения режимных параметров в переходном процессе при большем, чем в предыдущих случаях, значении коэффициента  $K_{2УПК}$  (рис. 5 и 6).

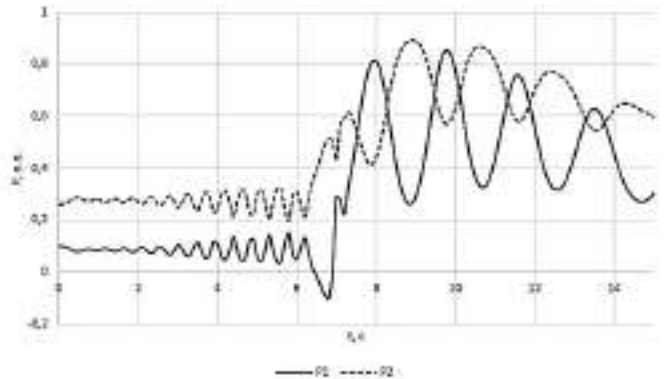
Очевидно, что возникновение таких режимов недопустимо. Однако с помощью соответствующего выбора коэффициента  $K_{2УПК}$  можно исключить возможность возникновения резонансного перехода.

### С. Совместное регулирование УПК и АРВ

При осуществлении совместного регулирования УПК и АРВ (1) переход к новому установившемуся режиму происходит значительно быстрее, что видно на рис. 7.



а

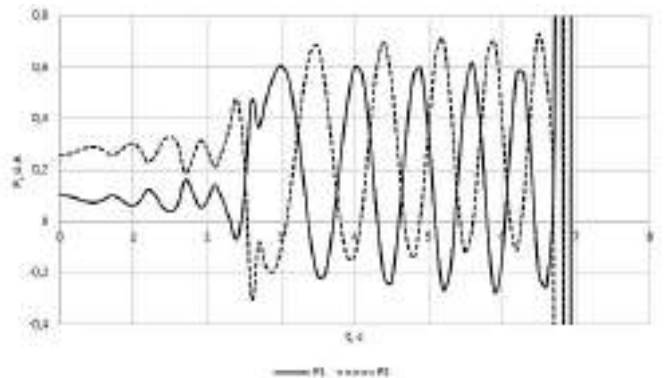


б

Рис. 5 – Изменение в переходном процессе при резонансном переходе при  $K_{2УПК} = 7$ : а – взаимного угла; б – мощностей станций



а



б

Рис. 6 – Изменение в переходном процессе при резонансном переходе при  $K_{2УПК} = 7,5$ : а – взаимного угла; б – мощностей станций

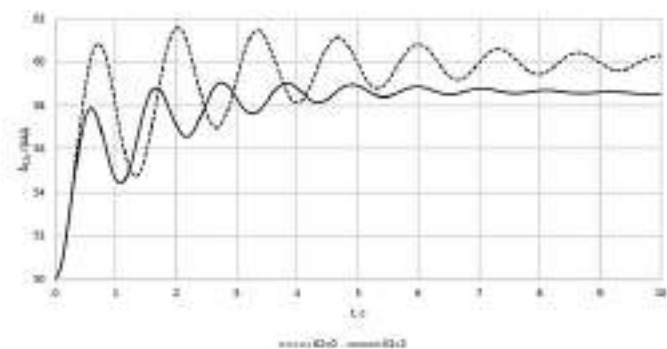


Рис. 7 – Изменение взаимного угла в переходном процессе при совместном регулировании УПК и АРВ при различных законах регулирования УПК

## У. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа влияния управляемого УПК на динамическую устойчивость режима электропередачи проведен ряд расчетов переходных процессов при 10 % набросе мощности и различной настройке регулирующих устройств. Выявлено, что при увеличении крутизны зависимости емкостного сопротивления УПК от полного тока

линии улучшается качество переходного процесса: колебания имеют меньшую амплитуду и быстрее затухают. Однако дальнейшее увеличение коэффициента регулирования  $K_{2УПК}$  ведет к возникновению явления резонансного перехода и потере устойчивости.

Таким образом, целесообразно выбирать наибольшее возможное значение коэффициента  $K_{2УПК}$  с целью одновременного улучшения как динамической, так и статической устойчивости режима электропередачи при отсутствии нарушения колебательной устойчивости.

## Список литературы

- [1] Мартиросян А.А. Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2009. 146 с.
- [2] Москвин И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 5. С. 46–50.
- [3] Братолобов А.А. Расчетные параметры синхронных машин: учеб. пособие. Иваново, 2008. 116 с.
- [4] Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линий электропередач // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 6. С. 3–8.

# РОЛЬ СЕТЕВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Шайхутдинов М.Р., Соловьёва А.А.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
Solovyova.alyona@mail.ru, Mansur-r-sh@mail

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Рассмотрение сетевых накопителей электроэнергии.

**Материалы и методы:** При составлении доклада использовалась специализированная литература, анализ научных статей и интернет-ресурсы.

**Результаты:** Данный доклад показывает достоинства использования сетевых накопителей электроэнергии.

**Выводы:** Использование сетевых накопителей с каждым годом возрастает, потому что технологии накопителей энергии решают самую главную проблему – неравномерный режим работы станций.

**Ключевые слова:** накопители, сетевые накопители электроэнергии.

## THE ROLE OF NETWORK POWER STORES IN ELECTRIC NETWORK

M. Shaikhutdinov, A. Solovyova  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
Solovyova.alyona@mail.ru, Mansur-r-sh@mail

## Abstract

**Background:** Considering network power stores.

**Materials and Methods:** During the preparation of the report, specialized literature, analysis of scientific articles and Internet resources.

**Results:** This report shows the dignity of using the NPS.

**Conclusions:** The use of network drives is increasing every year, because the technology of energy storage devices solves the most important problem: the uneven operation of stations.

**Key words:** accumulators, network power stores.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Существуют три основных типа станций: АЭС, ГЭС, или ГАЭС, и ТЭС. На АЭС из соображений по безопасности нагрузка не регулируется. Для работы с неравномерным графиком нагрузки резонно использовать ГЭС или ГАЭС. Но они есть не в каждой энергосистеме, а если и есть, то не всегда в необходимом количестве. Основная нагрузка по покрытию неравномерности суточного электропотребления ложится на ТЭС. Это и приводит к их работе в неэкономичном режиме, увеличивает расход топлива, а следовательно, и стоимость электроэнергии для потребителей. Все вышеперечисленные проблемы, а также ряд других, могут быть решены с помощью технологий накопления энергии. Сетевые накопители электроэнергии (СНЭ) – самый существенный подход к развитию интеллектуальных сетей будущего, для реализации которого нужен новый подход к накоплению энергии [1].

### II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СНЭ

Принцип работы СНЭ прост: накопители создают запас энергии во время неполной загрузки (в основном в ночное время суток) энергосистемы с последующей ее отдачей в систему в моменты пикового потребления. Это помогает уменьшению зависимости генерирующих мощностей от неравномерного потребления. Также улучшает качество производимой энергии и создает возможности для гибкого подключения новых потребителей.

Основными субъектами, заинтересованными в использовании СНЭ, являются: электросетевые компании, потребители, НСО, участники оптового рынка электроэнергии и мощности, включая независимых производителей энергии, провайдеры услуг на розничном рынке электроэнергии, плательщики коммунальных налогов, сотрудники регулятивных органов и политики.

Преимущества использования накопителей энергии в энергосистеме [2]:

- увеличение пропускной способности сети;
- повышение надежности энергосистемы;
- возможность регулирования частоты и повышение качества электроэнергии;
- расширение доступной мощности при снижении нагрузки на электросетевое оборудование и затрат на модернизацию инфраструктуры;
- снижение операционных и эксплуатационных затрат генерирующего и сетевого оборудования;
- допустима работа по двухставочному тарифу: накопление энергии в период низкой стоимости и ее выдача в период высокой стоимости;
- резервация электроэнергии для особо важных потребителей и поддержка их при перебоях в электроснабжении;
- объединение с генерирующим оборудованием ВИЭ (замещение топливной составляющей ДЭС).

### III. ВИДЫ АККУМУЛЯТОРОВ

На сегодняшний день есть более подходящие технологии для новых принципиальных проблем накопления электроэнергии. Наиболее компактные (по весу и размеру) технологии накопления энергии – Li-ion, NaS. Показатель затраты на цикл (заряд-разряд) на 1 кВт·ч наименьшие у NaS и Li-ion. Свинцовые технологии (Lead Acid) отличаются наименьшими капитальными затратами на кВт·ч. Наибольший срок службы у Li-ion и конденсаторов. Одним из самых новых видов накопителей являются суперконденсаторы. Они имеют большой срок службы – миллион и более циклов заряда/разряда.

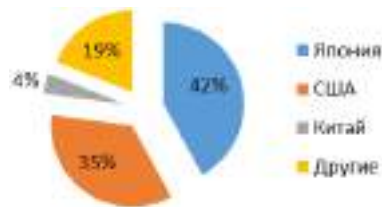
Характеристики суперконденсаторов [4]:

- плотность электрической емкости может достигать до 260 Ф/г;
- плотность электрической энергии до 50 Дж/см<sup>3</sup>;
- внутреннее сопротивление до 0,0001 Ом;
- время заряда и разряда в диапазоне 0,025–5,0 с;
- малый ток утечки и возможность хранения заряда в течение сотен часов.

Каждая технология накопления энергии характеризуется большими капитальными затратами на ее внедрение, а также эксплуатационными расходами. В настоящее время есть технологии накопления энергии, которые не являются экономически эффективными, и в будущем необходимо снизить, в первую очередь, капитальные расходы. Независимым системным операторам (НСО), энергокомпаниям, продавцам и провайдером технологий

накопления энергии необходимо формировать правила развивающегося рынка СНЭ, а также эксплуатационные требования с тем, чтобы добиться максимальной экономической эффективности применения СНЭ. В идеале рынки и тарифы должны быть рассчитаны таким образом, чтобы можно было бы воспользоваться преимуществами СНЭ без дополнительных неоправданных затрат.

Наглядно распределение мощности установленных накопителей энергии по данным Сандийских национальных лабораторий Министерства энергетики США [5] представлено на диаграмме:



По заявлению представителей немецкой энергетической компании Ewe Gasspeicher GmbH, аккумуляторная батарея, которую они создают, будет самой большой и мощной в мире. Поточная батарея Ewe Gasspeicher (brine4power) основана на технологии, которую разработали специалисты из университета Фридриха Шиллера в Йене. В ней используются водно-солевые электролиты с активным полимерным наполнителем. Все применяемые в электролите материалы вредны меньше для окружающей среды, чем соединения, которые содержат тяжелые металлы и серную кислоту, используемые в других типах потоковых окислительно-восстановительных аккумуляторных батарей.

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

На сегодняшний день в мире наблюдается бурное развитие технологий накопления электрической энергии, и в будущем их использование будет только возрастать. Компания Bloomberg New Energy Finance (BNEF) заявила, что к 2030 г. в мире будет действовать 125 ГВт батарейных накопителей энергии емкостью 305 ГВт·ч.

#### Список литературы

- [1] Знаменский А. Семинар «Современные технологии и направления инновационного развития в электроэнергетике» Системы накопления энергии в большой энергетике.
- [2] DOE Global Energy Storage Database [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energystorageexchange.org/>
- [3] Роль накопителей электроэнергии в повышении эффективности работы энергосистем // Инжиниринговый центр «Преобразовательная техника». URL: <http://cte.center/>
- [4] Иванов А.М., Герасимов А.Ф. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя // Электричество. 1991. № 8. С. 53.
- [5] Накопители энергии: итоги 2017 и краткосрочный прогноз [Электронный ресурс]. URL: <http://renew.ru/>

# ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р., Васьков А.Г.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»  
Москва, Россия  
shvedovgv@mpei.ru, sirochiddin.chorshanbiev.89@mail.ru, VaskovAG@mpei.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Как показывает мировой опыт, во многих развитых странах использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – важный фактор устойчивого развития энергетической отрасли. Эти тенденции развития проявляются и в таджикской энергетике, что подтверждается принятием решений, ряда программ и законодательных актов на правительственном уровне, способствующих развитию этой области. Потенциальные ресурсы ВИЭ, в частности солнечная энергия, поступающая в течение года на территорию страны, многократно повышают объемы потребления энергоресурсов. Это обстоятельство создает хорошие предпосылки для масштабного вовлечения ВИЭ в топливно-энергетический баланс страны в целях обеспечения устойчивого экологически безопасного развития энергетической страны. В данной статье рассматриваются вопросы оценки потенциальных ресурсов солнечной энергии на территории Республики Таджикистан.

**Материалы и методы:** Для оценки потенциальных ресурсов солнечной энергии был использован ряд следующих материалов: наименьшая и наибольшая продолжительность солнечного излучения, интенсивность и потенциал солнечной радиации и т. д. по данным метеорологических станций.

**Результаты:** В ходе исследования были определены валовый, технический и экономически целесообразный потенциалы солнечной энергии в стране.

**Выводы:** Исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод, что страна имеет большой потенциал для развития солнечной энергетической, использование которой будет способствовать не только улучшению энергообеспеченности населения, но и повышению жизненного уровня людей, проживающих в труднодоступных горных районах республики.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, солнечная радиация, солнечный потенциал, Республика Таджикистан.

## ASSESSMENT OF POTENTIAL RESOURCES OF SOLAR ENERGY IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

G. Shvedov, S. Chorshanbiev, A. Vaskov

FGBOU VO “National Research University “Moscow Power Engineering Institute”  
Moscow, Russian Federation  
shvedovgv@mpei.ru, sirochiddin.chorshanbiev.89@mail.ru, VaskovAG@mpei.ru

## Abstract

**Background:** The world experience in many developed countries shows that the use of renewable energy sources (RES) has become an essential factor for providing sustainable development in the energy sector. These development trends also manifested in the energy sector of Tajikistan, as evidenced by the decisions taken by a number of programs and legislation at the governmental level for the development in this area. The potential of RES, in particular, solar energy delivered along the year on the territory of the country, many times increases the volume of energy consumed. This fact creates good motivation for large-scale involvement of RES in fuel-energy balance in order to ensure sustainable environmentally safe development of the country's energy sector. In this case, the evaluation of the potential of solar energy resources on the territory of the Republic of Tajikistan has been considered in this paper.

**Materials and methods:** To evaluate the potential resources of solar energy, the following data were used: the smallest and the largest sunshine duration on the results of measurements of meteorological stations, intensity and potential of solar radiation, etc.

**Results:** During the study, the gross, technical and economic feasible potential of solar energy in the country were determined.

**Conclusions:** Based on the above studies, we can conclude that the country has great potential for development of solar energy. By using these potentials, the country not only contribute to improve the energy supply of the inhabitants, but also to raise their living standards, especially those, who are living in remote mountainous regions of the country.

**Key words:** renewable energy sources, solar energy, solar radiation, solar potential, Republic of Tajikistan.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Республика Таджикистан – солнечная и горная страна, расположенная в Центральном Азиатском регионе. Территория республики составляет 143,1 тыс. км<sup>2</sup> [1]. 93 % этой территории занимают горы. Согласно [2] население Республики составляет 8 551,2 тыс. человек, около 75 % населения проживает в сельских местностях [3]. Благодаря своему географическому расположению и природно-климатическим условиям Республика Таджикистан обладает огромным потенциалом для использования ВИЭ. ВИЭ – это не относящиеся к ископаемым видам топлива источники – постоянно существующие или периодически возникающие в окружающей среде потоки солнца, ветра, геотермальные воды, биомасса и реки [4]. К ВИЭ, в соответствии с законодательством Республики Таджикистан, относят:

- солнечную, ветровую и геотермальную энергии;
- энергию природных и искусственных водотоков и водоемов;
- древесные и бытовые отходы, биомасса в виде отходов промышленности, сельского, лесного и жилищно-коммунального хозяйств.

ВИЭ принято разделять на две группы [5]:

1) традиционные ВИЭ (гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии ГЭС мощностью более 30 МВт; энергия биомассы, используемая для получения тепла традиционными способами сжигания (дрова, торф и некоторые другие виды печного топлива); геотермальная энергия);

2) нетрадиционные ВИЭ (солнечная и ветровая энергии; энергия морских волн, течений приливов и океана; гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии малыми и микроГЭС; энергия биомассы, не используемая для получения тепла традиционными методами; низкопотенциальная тепловая энергия и другие «новые» виды возобновляемой энергии).

Нужно отметить, что эта классификация довольно условная и не играет большой практической роли за исключением одного момента: к нетрадиционным (НВИЭ) отнесены ГЭС мощностью менее 30 МВт. Исходя из вышесказанного и классификации ВИЭ, а также согласно законодательству Республики Таджикистан, солнечную энергию относят к НВИЭ.

## II. ПОТЕНЦИАЛ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Отметим, что в промышленных целях солнечную энергию в Таджикистане не используют. Только благодаря своему географическому расположению и природно-климатическим условиям республика считается одним из наиболее подходящих регионов, где возможно использование солнечной энергии. Стандарт [6] устанавливает термины и определения понятий в области солнечной энергетики и имеет следующие утвержденные ГОСТ, которые действуют на территории Республики Таджикистан:

- СТ РТ ГОСТ Р 51594-2010 «Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения»;

- СТ РТ ГОСТ Р 51595-2010 «Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия»;
- СТ РТ ГОСТ Р 51596-2010 «Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Методы испытаний»;
- СТ РТ ГОСТ Р 51597-2010 «Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. Типы и основные параметры».

Республика Таджикистан расположена между 36° 40' и 41° 05' с. ш. и вся территория находится в так называемом «мировом солнечном поясе» (45° с. ш. – 45° ю. ш.). Континентальный климат характеризуется значительными суточными и сезонными колебаниями воздуха, малым количеством осадков, сухостью воздуха, малой облачностью и продолжительностью солнечного сияния от 2 100 до 3 166 часов в год, число солнечных дней достигает 280–330 дней в год [7, 8].

Согласно [9–11] общая длительность солнечного сияния по результатам измерений некоторых метеостанций составляет:

- метеостанция «Дехавз» – 2 097 ч/год (в верховьях р. Зарафшана на высоте 2 500 м);
- метеостанция «Ледник Федченко» – 2 116 ч/год (на высоте 4 169 м);
- метеостанция «Пяндж» – 3 029 ч/год (на южной части Республики);
- метеостанция «Каракуль» – 3 166 ч/год (в восточной части Республики в Памире).

Эти территории являются наиболее подходящими для использования солнечной энергии.

По данным некоторых метеостанций республики, число дней без солнца по территориям республики составляет около от 30–60 дней за год [12].

По оценкам специалистов этой сферы интенсивность солнечной радиации в большинстве районов страны достигает до 1 000 Вт/м<sup>2</sup>, а годовая сумма солнечной радиации превышает 2 000 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Среднее значение солнечного излучения здесь оценено как 700–800 Вт/м<sup>2</sup>. Это в два раза больше, чем в средней полосе Европы, где использование солнечной энергии носит самый широкий характер [13].

При использовании доступной солнечной энергии Республики Таджикистан можно удовлетворить 10–20 % национального спроса на энергию. По предварительным оценкам потенциал солнечной радиации в Республике Таджикистан составляет 25 млрд кВт·ч/год [12–15]. С точки зрения специалистов в этой области до 60–80 % потребностей населения республики в течение 10 месяцев могут быть обеспечены солнечной энергией. В пересчете на условное топливо это составляет около 400 тыс. т. у. т., что эквивалентно 460 млн м<sup>3</sup> газа или 528 тыс. т мазута [9]. По укрупненным параметрам показатели интенсивности прямой солнечной радиации оцениваются от 10,3 (июнь–июль) до 5,9 кВт·ч/м<sup>2</sup> (декабрь–январь) [8]. Средняя суммарная месячная солнечная радиация в основных населенных пунктах республики составляет около 200 Вт/м<sup>2</sup>.

Минимальное значение солнечной радиации, Вт/м <sup>2</sup>											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
80	114	153	209	275	326	322	290	232	164	100	65
Среднее значение солнечной радиации, Вт/м <sup>2</sup>											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
87,2	121,6	160,4	225,1	280,9	330,7	328,9	294,1	244,1	167,4	110	75,6
Максимальное значение солнечной радиации, Вт/м <sup>2</sup>											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
96	137	187	320	304	350	340	305	258	172	114	86

В высокогорьях кроме астроклимата и присутствия облачности длительность солнечного сияния зависит еще от экспозиции откосов и степени закрытости горизонта, находящимися вокруг хребтами. Количество часов солнечного сияния уменьшается в ограниченных долинах и на отвесных склонах. Весной северные склоны крутизной 10° (30°) получают на 10–15 % (15–20 %) солнечной радиации меньше, чем горизонтальная поверхность. В летний сезон различия в приходе радиации на склоны и горизонтальную поверхность отсутствуют. По данным специалистов среднесуточное значение теоретического солнечного излучения для Таджикистана в ясный день составляет 228 Вт/м<sup>2</sup>, что полностью соответствует данным гидрометеостанций (таблица).

### III. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Среднее значение мощности солнечного облучения, по данным таблицы, равно 202,2 Вт/м<sup>2</sup>. Так как площадь Республики Таджикистан составляет 143,1 тыс. км<sup>2</sup>, общая среднегодовая мощность равняется 28 934 820 МВт. Принимая во внимание факт возможности использования солнечной энергии только лишь в местах проживания (7 % от общей территории Республики), общие потенциальные ресурсы солнечной энергии в стране будут составлять:

$$28\,934\,820 \cdot 0,07 = 2\,025\,437,4 \text{ МВт.}$$

Полученное значение мощности солнечного излучения справедливо для случая, когда все дни в году – солнечные. Как было отмечено ранее, годовая продолжительность солнечного сияния на территории республики колеблется от 2100 до 3166 часов в году. Приняв общее количество солнечных дней в году равным 90 %, получим общую потенциальную мощность солнечной энергии для Таджикистана:

$$2\,025\,437,4 \cdot 0,9 = 1\,822\,893,66 \text{ МВт.}$$

Полное освоение данного теоретического энергетического потенциала возможно только при полном покрытии обжитой территории республики солнечными батареями со значением КПД, равным 100 %. С технической точки зрения солнечные батареи возможно расположить только на небольшой площади. Таким образом, в расчете на одного жителя считаем площадь, занимаемую одной такой батареей, равной 2 м<sup>2</sup>. В таком случае при численности населения Республики 8,5512 млн человек и количестве солнечных дней, равном в среднем 90 %, получим общую потенциальную мощность:

$$202,2 \cdot 2 \cdot 8,5512 \cdot 0,9 = 3\,122,3 \text{ МВт.}$$

Надо учитывать, что при прямом преобразовании в электроэнергию выходная мощность будет меньше. Приняв во внимание факт использования в солнечных

батареях кристаллов, воспринимающих фотоны и имеющих расчетный КПД 0,16 %, получим технический потенциал солнечной энергии в республике, равный

$$3\,122,3 \cdot 0,16 = 499,568 \text{ МВт.}$$

В настоящее время достаточно сложно оценить экономический потенциал солнечной энергии в Республике Таджикистан.

Солнечная энергия в стране не может конкурировать с гидроэнергией. Удельная стоимость строительства ГЭС в Таджикистане составляет порядка 1 000 долл./кВт, тариф – 2,25 цент./кВт·ч [16]. В тоже время удельная стоимость солнечной ЭС мощностью 1 000 МВт, строящейся сегодня в Китае в Ордоской степи с высокой солнечной радиацией, равна 2 500 долл./кВт, а планируемый тариф – 18,8 ÷ 20 цент./кВт·ч [9].

В осенне-зимний период (с ноября по февраль) из-за дефицита электроэнергии 70 % населения республики, проживающего в сельских районах, получают ее всего лишь несколько часов в сутки. Получается, что именно в таких условиях потенциал солнечной энергии востребован в первую очередь.

Согласно данным таблицы он составляет 36,5 % от общего потока солнечной радиации. Из этого получим, что экономически целесообразный потенциал солнечной энергии в стране составляет:

$$499,568 \cdot 0,365 = 182,342 \text{ МВт.}$$

Полученную мощность 182,342 МВт можно сравнивать с мощностью одной ГЭС, аналогичной Сангтудинской-2. В условиях Таджикистана таких ГЭС можно построить более 120. Исходя из этого можно сказать, что солнечная энергия в Республике Таджикистан сегодня не имеет большого промышленного значения, как было отмечено выше. Если ресурсы солнечной энергии республики перевести в тонны условного топлива (т.у.т), то получим:

- валовой потенциал:

$$1\,822\,893 \text{ МВт} = 4790,5934 \text{ млн т.у.т/год;}$$

- технический потенциал:

$$499,568 \text{ МВт} = 1,31 \text{ млн т.у.т/год;}$$

- экономически целесообразный потенциал:

$$182,342 \text{ МВт} = 0,496 \text{ млн т.у.т/год.}$$

Вышеприведенный анализ относится к прямому преобразованию солнечной энергии в электрическую. Использование солнечной энергии для социально-бытового сектора в большей степени представляет интерес для отопления и горячего водоснабжения.

Если переведем вышеприведенный энергетический потенциал солнечной энергии в Республике Таджикистан, который был получен для использования в электроэнергетике, в тепловую энергию, то при 1 кВт·ч = 860 Ккал получим следующие величины:

- валовый потенциал – 13 732,94 млн Гкал/год;
- технический потенциал – 3,763 млн Гкал/год;
- экономически целесообразный потенциал – 1,37 млн Гкал/год.

В Республике Таджикистан помимо применения солнечной энергии в фотоэлектрических установках большую перспективу имеет технология преобразования солнечной энергии в тепловую. Производство подобных устройств возможно с привлечением местных промышленных компаний. Возможно широкое применение таких устройств для нагрева воды и в системе теплоснабжения в жилых домах, домах отдыха, гостиницах, душевых на летних дачах, в сельской местности, тепличных хозяйствах.

Международные туристические компании выражают интерес к автономному электроснабжению с использованием фотоэлектрических устройств [17]. Для достижения этой цели в стране имеется необходимая сырьевая, производственная и научная база. В текущем времени в Республике Таджикистан актуальной проблемой является покрытие дефицита тепловой и электроэнергии с использованием солнечной энергии.

В связи с этим ОАО «Системаавтоматика», которая более 20 лет занимается вопросами интеграции современных технологических решений и имеет доступ к современным технологиям на территории Таджикистана, работает над этой проблемой.

Сотрудники компании для развития инфраструктуры по всей территории страны проводят научные исследовательские и строительные работы.

Совместно с ОАО «Системаавтоматика» на территории Республики Таджикистана построены и сданы в эксплуатацию объекты, использующие солнечную энергию, такие как Национальный медицинский центр «Караболо» с установленной мощностью 120 кВт, Роддом № 1 с установленной мощностью 40 кВт, ООО Санатория «Бахористон» с установленной мощностью 30 кВт и т. д. Их общая установленная мощность составляет более 500 кВт.

#### IV. Выводы

Исходя из проведенных исследований можно сделать вывод, что страна имеет большой потенциал для развития солнечной энергетики, использование которой будет

способствовать не только улучшению энергообеспеченности населения, но и повышению жизненного уровня людей, проживающих в труднодоступных горных районах республики.

#### Список литературы

- [1] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Таджикистан>.
- [2] Численность населения Республики Таджикистана 1 января 2016 года: статистический сб. Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан, 2016. 49 с.
- [3] Таджикистан: Ускорение прогресса в достижении ЦРТ путем улучшения доступа к энергосбережению. Душанбе, 2010. 58 с.
- [4] Об использовании возобновляемых источников энергии: закон Республики Таджикистан от 12 января 2010 г. № 587.
- [5] Ларан Э. Нефть-М., 2008. 432 с.
- [6] Об утверждении проектов национальных стандартов Республики Таджикистан: приказ Агентства по стандартизации, метрологии, сертификации и торговой инспекции при Правительстве Республики Таджикистан от 1 сентября 2010 г. № 07. Душанбе: Таджикстандарт, 2010.
- [7] Impact of Solar Generation Connected to 0.4 kV Grid on the Power losses and the Shape Factor of Load Curve / V. Galaktion [et al.] // Young Researchaers in Electrical and Electronic Engineering Con. Saint Peterburg, 2018. P. 781–784.
- [8] Сулейман С.Ш. О зависимости солнечного излучения от географических факторов местности // Гелиотехника. 1985. № 5. С. 68–71.
- [9] Киргизов А.К. Развитие и оптимизация режимов электроэнергетической системы с распределенными возобновляемыми источниками энергии методами искусственного интеллекта (на примере Республики Таджикистан): дис...канд.техн.наук. Н., 2017. 178 с.
- [10] Сирожев Б. Развитие электроэнергетики Таджикистана. Душанбе: Ирфон, 1984. 110 с.
- [11] Лавриненко П.Н., Кабилов З.А. Возможности использования солнечной энергии в Таджикистане: обзор инф. Душанбе, 1980. 50 с.
- [12] Кабутов К. Возобновляемые источники энергии проблемы и перспективы использования в Таджикистане // Хартия Земли и устойчивое развитие Таджикистана: матер. Междунар. конф. Душанбе, 2011. С. 75–81.
- [13] Ахмедов Х.М., Каримов Х.С., Кабутов К. Возобновляемы источники энергии в Таджикистане: состояние и перспективы развития. Душанбе, 2010. 30 с.
- [14] Study of the Operating Modes of the 0.4 kV Main Distribution Network, in Dushanbe city of the Republic of Tajikistan, with Distributed Solar Generation for Power Losses and Power Quality Estimation / Khurshed B. Nazirov [et al.] // IEEE Saint Peterburg, Russia Young Researchaers in Electrical and Electronic Engineering Con. 2018. P. 743–747.
- [15] Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р., Морсин И.А. Влияние распределенной солнечной генерации на потери электроэнергии в электрических сетях // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: матер. VIII Междунар. молод. науч.-техн. конф: в 3 т. Т. 2. С. 125–128.
- [16] Прейскурсант № 09-01-2014 «Тарифы на электрическую и тепловую энергию» / ОАХК «Барки Точик». Душанбе, 2014. 40 с.
- [17] Bukarica V. United nations development programme Tajikistan: Energy efficiency master plan for Tajikistan. Dushanbe, 2011. 73 p.
- [18] ОАО «Системаавтоматика» [Электронный ресурс]. URL: <http://systemavto.tj>.
- [19] Использование возобновляемых источников энергии в Республике Таджикистан на примере проектов реализованных ОАО «Системаавтоматика»: презентация. Душанбе, 2013.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ДАЛЬНЮЮ ЛИНИЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Шибачев Ю.С., Чистякова С.В., Пшеничникова А.А.  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
Иваново, Российская Федерация  
shiba4ev@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Рост электрических нагрузок и сопутствующее ему развитие электроэнергетических систем требует решения проблем, связанных с обеспечением их надежного и безопасного функционирования. Для исключения аварийных режимов работы при проектировании новых участков сетей необходимо решать вопросы, связанные с обеспечением устойчивости. Одним из способов является применение устройств продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии. К таким устройствам относятся управляемые устройства продольной компенсации с тиристорным управлением, нашедшие широкое применение в мировой практике.

**Материалы и методы:** При моделировании для численного решения систем дифференциальных уравнений был использован неявный метод трапеций с интерполяцией в программной среде MATLAB.

**Результаты:** Разработаны модели электроэнергетической системы (далее ЭЭС) с одним и двумя управляемыми устройствами продольной компенсации, проведен сравнительный анализ влияния управляемые устройства продольной компенсации (далее УУПК) на устойчивость ЭЭС.

**Выводы:** Использование разработанной модели подтверждает положительный эффект от применения УУПК на динамическую устойчивость ЭЭС.

**Ключевые слова:** динамическая устойчивость электроэнергетических систем, управляемые устройства продольной емкостной компенсации, математическая модель.

## ANALYSIS OF DISTRIBUTED CONTROLLED SERIES COMPENSATION'S INFLUENCE ON DYNAMIC STABILITY OF POWER SYSTEM INCLUDING LONG-RANGE TRANSMISSION LINE OF ULTRA-HIGH VOLTAGE

Yu. Shibachev, S. Chistyakova, A. Pshenichnikova  
Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russian Federation  
shiba4ev@gmail.com

## Abstract

**Background:** The growth of electrical loads and accompanying development of electric power systems requires the solution of problems related to ensuring their reliable and safe operation. To exclude emergency operation modes when designing new sections of the electrical grids needs to address issues related to stability of electrical systems. One way is to use controlled series compensation devices. These devices include the thyristor controlled series compensation devices, which are mostly wide spread in the world nowadays.

**Materials and Methods:** When modeling for numerical solutions of differential equations systems was used an implicit trapezoidal method with interpolation in MATLAB software environment.

**Results:** Power system models with one and two controlled series compensation devices are developed. The influence of controlled series compensation devices on the stability of electric power systems is comparatively analyzed.

**Conclusions:** Using the developed model confirms the positive effect of controlled series compensation devices on the dynamic stability of the electric power systems.

**Key words:** dynamic stability of power systems, controlled series compensation devices, mathematical model.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является участок электроэнергетической системы, состоящий из крупной электростанции с установленной мощностью 3400 МВт и дальней линии электропередачи (далее ДЛЭП) сверхвысокого напряжения длиной 1000 км. Основной целью является изучение устойчивости электроэнергетической системы и определение возможности повышения пропускной способности ДЛЭП путем установки устройства продольной компенсации.

Известны два способа выполнения продольной емкостной компенсации – сосредоточенный и распределенный. Недостатком сосредоточенной компенсации является, во-первых, повышение напряжения на выводах УУПК, что вынуждает применять шунтирующие реакторы, во-вторых, это усложняет схему УУПК и увеличивает стоимость его устройства. Если УУПК установить в нескольких местах вдоль линии электропередачи, можно добиться снижения напряжения на выводах УУПК и использования меньшего количества шунтирующих реакторов [1].

Схема исследуемой модели с распределенной емкостной компенсацией представлена на рис. 1. Расстояние между УУПК выбрано таким образом, чтобы получить наибольшую предельную передаваемую мощность по критерию апериодической статической устойчивости и поддерживать напряжение на выводах УУПК в допустимых пределах при различных значениях передаваемой активной мощности [1].

Для наиболее полного расчета переходных процессов необходимо сформировать математическую модель. На основе этой модели в программном комплексе MatLab возможно производить расчеты как установившихся, так и переходных режимов работы электроэнергетической системы.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЭС

Для математического моделирования была использована схема замещения исследуемой ЭЭС с двумя УУПК, приведенная на рис. 2.

Такое представление электрической системы дает возможность анализировать влияние УУПК на установившиеся режимы, переходные процессы и устойчивость исследуемой системы, позволяя тем самым формулировать основные требования к характеристикам УУПК и системам их управления.

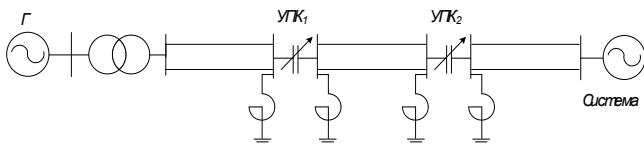
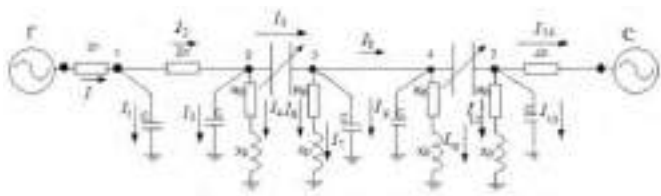


Рис. 1 – Схема исследуемой ЭЭС с двумя УУПК



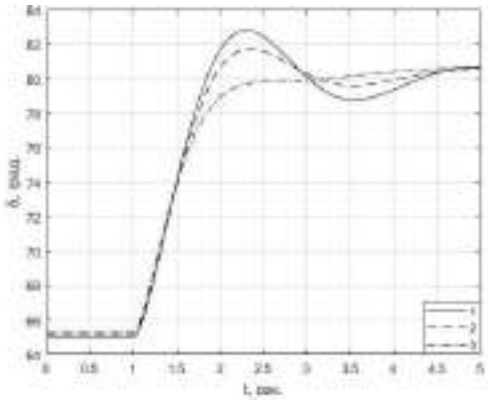


Рис. 4 – Зависимость  $\delta(t)$  для ЭЭС с 1 УУПК:  
1 –  $K_2 = 6$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

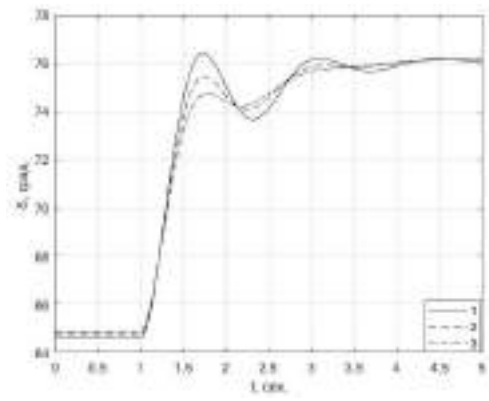


Рис. 5 – Зависимость  $\delta(t)$  для ЭЭС с 2 УУПК:  
1 –  $K_2 = 4$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

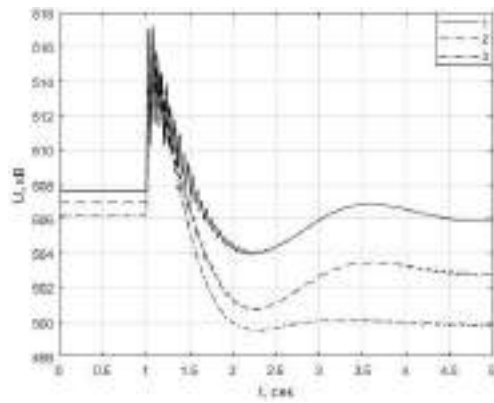


Рис. 6 – Зависимость напряжения на входе УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 6$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

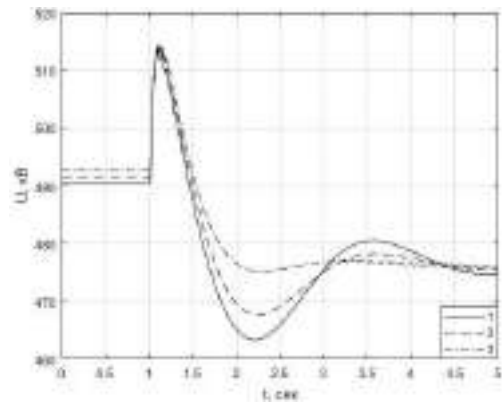


Рис. 7 – Зависимость напряжения на выходе УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 6$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

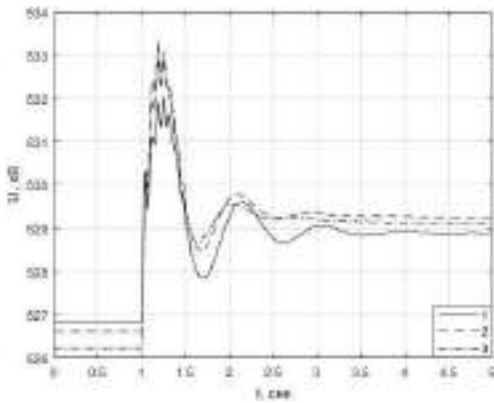


Рис. 8 – Зависимость напряжения на входе 1 УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 4$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

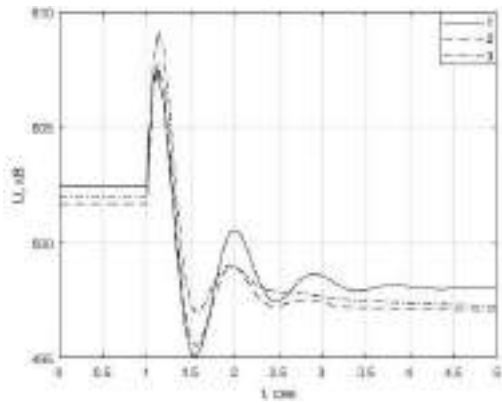


Рис. 9 – Зависимость напряжения на выходе 1 УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 4$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

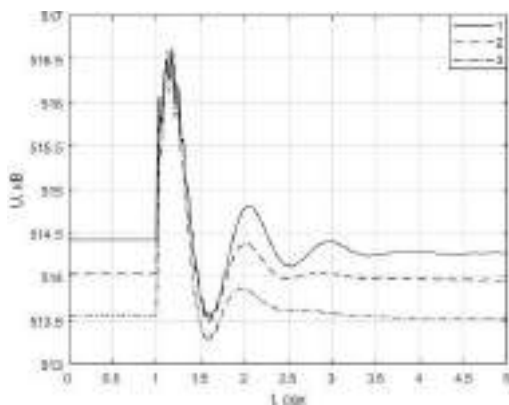


Рис. 10 – Зависимость напряжения на входе 2 УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 4$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

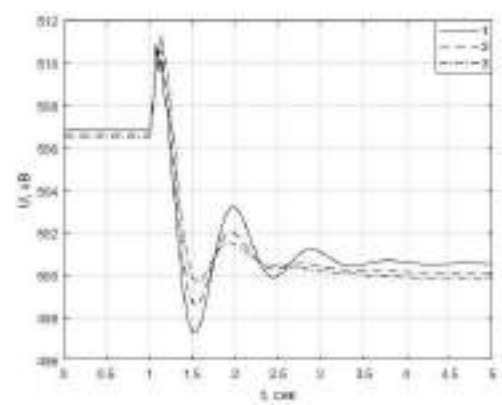


Рис. 11 – Зависимость напряжения на выходе 2 УУПК от времени:  
1 –  $K_2 = 4$ ; 2 –  $K_2 = 8$ ; 3 –  $K_2 = 10$

Таким образом, математическая модель исследуемой ЭЭС состоит из 65 уравнений: 33 дифференциальных и 22 алгебраических. Данная система является моделью, которая учитывает как электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС, так и электромеханический переходный процесс. С помощью полученной модели ЭЭС возможно анализировать как переходные, так и установившиеся режимы.

### III. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО УПК НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС

Порядок исследования динамической устойчивости установлен правилами определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЭЭС» СТО 59012820.27.010.001-2013.

В данной работе был принят шаг траектории утяжеления, равный  $\Delta P = 340$  мВт. В качестве нормативного возмущения рассматривался наброс мощности  $\Delta P_n = 340$  мВт, что составляет 10 % от установленной мощности станции.

В результате серии расчетов были получены зависимости угла положения роторов генераторов от времени при разных коэффициентах  $K_2$  для ЭЭС с одним УУПК (рис. 4) и ЭЭС с двумя УУПК (рис. 5) при величинах перетока активной мощности, при которых не наблюдается нарушение динамической устойчивости.

Зависимости, представленные на рис. 5 и 6, показывают влияние коэффициента  $K_2$  на длительность переходного процесса, количество колебаний и амплитуду значения угла  $\delta$ .

При увеличении коэффициента  $K_2$  переходный процесс протекает быстрее, количество колебаний уменьшается, амплитудное значение угла положения ротора генератора снижается.

Как уже было отмечено ранее, зависимости, представленные на рис. 5 и 6, свидетельствуют о сохранении системой динамической устойчивости, также при указанных перетоках активной мощности напряжение на выводах УУПК находится в допустимых пределах, установленных национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 57382-2017 «Стандартный ряд номинальных и наибольших рабочих напряжений».

Зависимости напряжений на выводах УУПК для ЭЭС с использованием как сосредоточенной, так распределенной емкостной компенсации представлены на рис. 6–11.

При этом распределение напряжения вдоль линии становится более равномерным при установке двух УУПК.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель позволяет сделать следующие выводы:

- использование УУПК позволяет повысить предел передаваемой активной мощности по критерию динамической устойчивости. При этом распределение напряжения вдоль ВЛ становится более равномерным и количество используемых шунтирующих реакторов уменьшается при использовании распределенной емкостной компенсации;
- при использовании 2 УУПК величина допустимого перетока активной мощности ограничивается уровнями напряжений на выводах УУПК. Применение УШР позволит повысить предел передаваемой активной мощности до ограничений по критерию динамической устойчивости.

### Список литературы

- [1] Мартиросян А.А., Зотова М.В., Кормилицын Д.Н. Выбор места установки и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации для повышения устойчивости электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 4. С. 30-36.
- [2] Моделирование режимов электроэнергетических систем с управляемыми элементами: учеб. пособие / В.П. Голов [и др.]. Иваново, 2016. 100 с.
- [3] Управляемая распределенная компенсация линий сверхвысокого напряжения: учеб. пособие / В.П. Голов [и др.]. Иваново, 2018. 112 с.
- [4] СТО 59012820.27.010.001-2013. Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЭЭС»: утв. и введ. в действие приказом ОАО «СО ЭЭС» от 18 января 2013 г. № 10.
- [5] Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов [и др.] // Вестн. ИГЭУ. 2012. Вып. 5. С. 26–31.
- [6] Устройство продольной компенсации с тиристорным управлением / А.А. Мартиросян [и др.] // ВЕСТНИК РНК СИГРЭ. 2014. Вып. 4. С. 110–115.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИЛОВОГО РЕЖИМНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ

Шишкин А.С., Лямов А.С., Паздерин А.В., Смоловик С.В., Солодянкин С.А., Тупицина А.Л.  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого»  
Санкт-Петербург, Россия

## Аннотация

Статья посвящена разработке математических моделей современных устройств, относящихся к гибким системам передачи переменного тока (ГСППТ) для расчетов режимов и исследования устойчивости сложных энергосистем. В качестве примеров таких устройств рассмотрены: компенсирующее устройство, выполненное на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ), статический синхронный продольный компенсатор (ПСТАТКОМ) и объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ).

**Ключевые слова:** объединенный регулятор перетока мощности, гибкие системы передачи переменного тока.

## MATHEMATICAL MODELING OF HIGH-SPEED DEVICES OF THE POWER REGIME OF REGULATION AND STUDY OF THEIR EFFECT ON THE PERFORMANCE

A. Shishkin, A. Lyamov, A. Pazderin, S. Smolovik, S. Solodyankin, A. Tupitsyn  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
St. Petersburg, Russian Federation

## Annotation

The article is devoted to the development of mathematical models of modern devices related to flexible AC transmission systems (GSPPTS) for the calculation of modes and the study of the stability of complex power systems. As examples of such devices are considered: the compensating device is based on voltage Converter (STATCOM), static synchronous compensator longitudinal (STATCOM) and the joint controller of power flow (ORPM).

**Key words:** unified power flow controller, flexible AC transmission.

### I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАТКОМА

Для выполнения расчетов электромеханических переходных процессов электроэнергетической системы с учетом регулируемого устройства типа СТАТКОМ предложена следующая динамическая модель, описываемая системой алгебро-дифференциальных уравнений.

Входной переменной является напряжение на шинах высокого напряжения сети в точке подключения устройства  $U_{ст}$ , заданное своими проекциями  $U_q$  и  $U_d$  на координатные оси  $q$  и  $d$  генератора.

Мощность СТАТКОМа  $S_{ст}$  задается в исходных данных.

Математическая модель исследуемой ЭЭС представляет собой систему следующих дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\Delta E_{ст} = \frac{K_{st}(U_{ст} - U_{уст})}{1 + pT_v} + \frac{k_{0\omega st}s}{1 + pT_{0\omega 1}}, \quad (1)$$

где  $U_{уст}$  – заданная величина уставки по напряжению;  $K_{st}$  – коэффициент регулирования канала отклонения напряжения,  $K_{st} = -5 \div -100$  ед. ЭДС СТАТКОМа/ед. напряжения;  $T_v$  – постоянная времени канала отклонения напряжения,  $T_v = 0,001$  с;  $s$  – скольжение ротора генератора относительно синхронной оси;  $k_{0\omega st}$  – коэффициент регулирования по скольжению ротора генератора;  $T_{0\omega 1}$  – постоянная времени канала регулирования по скольжению,  $T_{0\omega 1} = 0,01$  с.

Скольжение ротора генератора в качестве переменной управления принято для упрощения. В более сложной схеме в качестве параметра управления принимают отклонение частоты напряжения в точке подключения устройства.

Поскольку при моделировании используется общая координатная система  $q, d$ , связанная с математической моделью генератора, то вычисляются коэффициенты распределения приращения ЭДС по этим осям.

Величина приращения ЭДС ограничивается таким образом, что модуль тока СТАТКОМа, равный произведению  $\Delta E_{ст} b_{ст}$ , не может превысить заданной в относительных единицах величины мощности устройства  $S_{ст}$ .

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПСТАТКОМА

Для регулируемого устройства последовательного включения (ПСТАТКОМ) разработана математическая модель, подобная модели СТАТКОМа. Предполагается, что устройство может работать независимо в качестве статического синхронного продольного компенсатора, а также в составе объединенного регулятора перетока мощности (ОРПМ), включающего в себя СТАТКОМ, который обменивается с ПСТАТКОМом определенной величиной активной мощности (в соответствии с параметрами регулирования последнего). Энергетические связи двух устройств отражены в системе ограничений.

Входной переменной величиной является значение тока  $I_m$ , протекающего по включенному последовательно в линию электропередачи трансформатору в точке подключения устройства, заданное своими проекциями  $I_q$  и  $I_d$  на координатные оси общей координатной системы  $q$  и  $d$ .

Индуктивное сопротивление трансформатора ПСТАТКОМа принимается в относительных единицах равным  $x_{пст} = 0,04 \div 0,1$  о.е.

Мощность ПСТАТКОМа  $S_{пст}$  задается в исходных данных (обычно принимается равной мощности СТАТКОМа).

Сигнал управления ЭДС ПСТАТКОМа вычисляется по известному отклонению тока с помощью следующей передаточной функции:

$$\Delta I_m = \frac{K_{0i}(I_m - I_{уст})}{1 + pT_i}, \quad (2)$$

где  $I_{уст}$  – величина уставки по току;  $K_{0i}$  – коэффициент регулирования канала отклонения тока,  $K_{0i} = -10 \div -100$  ед. ЭДС ПСТАТКОМа/ед. тока;  $T_i$  – постоянная времени канала отклонения тока,  $T_i = 0,01$  с.

Составляющие ЭДС ПСТАТКОМа по осям  $q$  и  $d$  вычисляются с использованием передаточных функций с учетом дополнительного сигнала управления по отклонению скольжения ротора генератора  $s$  относительно синхронной оси (постоянные времени  $T_{пст}$  и  $T_{0\omega}$  приняты равными 0,01 с):

$$\Delta E_{qпст} = \frac{\Delta I_m x_{пст} I_{dreg}}{1 + pT_{пст}} + \frac{k_{0\omega} s}{1 + pT_{0\omega}}; \quad (3)$$

$$\Delta E_{dпст} = \frac{-\Delta I_m x_{пст} I_{qreg}}{1 + pT_{пст}} + \frac{k_{0\omega} s}{1 + pT_{0\omega}}, \quad (4)$$

где  $I_{dreg}$  и  $I_{qreg}$  – составляющие тока ПСТАТКОМа, определяемые в соответствии с углом регулирования  $\rho$  (при работе ПСТАТКОМа в составе ОРПМ угол  $\rho$  в общем случае отличен от нуля [1, 4, 5]):

$$I_{dreg} = I_q \sin \rho + I_d \cos \rho; \quad (5)$$

$$I_{qreg} = I_q \cos \rho - I_d \sin \rho. \quad (6)$$

При работе ПСТАТКОМа в составе ОРПМ обмен активной мощностью с сетью осуществляется путем использования возможностей СТАТКОМ при учете ограничений, определяемых заданными мощностями устройств.

Система ограничений построена таким образом, что ПСТАТКОМ обладает приоритетом по отношению к СТАТКОМу – питание ПСТАТКОМа активной мощностью (при регулировании фазового угла выходного напряжения) приводит к снижению возможной генерации реактивной мощности, используемой для поддержания напряжения в узле подключения СТАТКОМа.

Модели устройств были верифицированы путем сопоставления переходных процессов при типовых возмущениях с процессами, рассчитанными в комплексе MatLab Simulink (SimPowerSystemsBlockset).

Предельное время отключения короткого замыкания (КЗ) определялось при трехфазном замыкании в начале линии электропередачи, поскольку анализ и сопоставление получаемых результатов при данном возмущении выполняются наиболее просто (таблица).

ПРЕДЕЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ КЗ

Вариант расчета	Время КЗ, с
Без СТАТКОМа и ПСТАТКОМа	0,1047
СТАТКОМ $K_{st} = -10$	0,115
ПСТАТКОМ (положительный коэффициент) $K_{0i} = 10$	0,1138
ПСТАТКОМ (отрицательный коэффициент) $K_{0i} = -10$	0,088
Вместе (положительный коэффициент) $K_{0i} = 10$ ; $K_{st} = -10$	0,122
Вместе (отрицательный коэффициент) $K_{0i} = -10$ ; $K_{st} = -10$	0,1035

## III. ВЫВОДЫ

1. Разработана методика математического моделирования быстродействующих устройств ГСППТ, основанная на представлении их регулируемыми источниками ЭДС, связанными системой взаимных ограничений. Разработанные модели устройств были верифицированы путем сопоставления переходных процессов при типовых возмущениях с процессами, рассчитанными в комплексе MatLab/Simulink.
2. Рассмотрено влияние устройств ГСППТ на предельное время отключения короткого замыкания, отмечено возможное негативное влияние на уровень динамической устойчивости последовательного преобразователя ОРПМ в случае его работы в режиме компенсации индуктивного сопротивления, направленного на ограничение тока линии.

## Список литературы

- [1] Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.; ТОРУС ПРЕСС, 2011. 312 с.
- [2] Паздерин А.В., Солодянкин С.А. Повышение надёжности функционирования энергосистем за счёт технологий гибких систем передачи переменного тока // Электрические станции. 2009. № 5. С. 38–41.
- [3] Паздерин А.В., Солодянкин С.А. Составляющие эффективности внедрения статических синхронных компенсаторов в электрических сетях // Электрические станции. 2012. № 11. С. 34–39.

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Шубина С.К., Хрещатая О.И, Кубышкина А.А.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
sofiashubina678@gmail.com, olechka2531@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Внедрение новых технологий в области электроснабжения является одним из важных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в России. Ключевые технологии связаны с применением систем Smart Grid, а также внедрением распределённой генерации. Необходимо определить технологии, внедрение которых повысит энергоэффективность ТЭК до 2030 года.

**Материалы и методы:** Были изучены различные современные технологии и их эффекты в области электроэнергетики.

**Результаты:** Определены технологии, внедрение которых повысит энергоэффективность и качество электроснабжения РФ.

**Выводы:** Необходимо развивать высокоэффективную кибер-физическую систему, включающую интерактивные инженерные сети из физических и коммуникационных компонентов, связанных с технологиями класса Big Data. Кроме того, необходимо начать формирование законодательной базы, способной регламентировать процессы, связанные с применением новых технологий в электроэнергетике.

**Ключевые слова:** ТЭК, Smart Grid, ВИЭ, энергоэффективность.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE FUEL AND ENERGY SECTOR

S. Shubina, O. Khreshchataya, A. Kubyshkina  
Kazan State Power Engineering University,  
Kazan, Russian Federation  
sofiashubina678@gmail.com,olechka2531@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The introduction of new technologies in the field of power supply is one of the important directions of the development of the fuel and energy complex in Russia. Key technologies are associated with the use of Smart Grid systems, as well as the introduction of distributed generation. It is necessary to identify technologies for the introduction of which will increase the energy efficiency of the fuel and energy complex until 2030.

**Materials and Methods:** Various modern technologies and their effects in the field of electric power industry were studied.

**Results:** Technologies are identified, the implementation of which will increase the energy efficiency and quality of electricity supply in the Russian Federation

**Conclusions:** It is necessary to develop a highly efficient cyber-physical system that includes interactive engineering networks from physical and communication components associated with Big Data technologies. And it is also necessary to begin the formation of a legislative base capable of regulating the processes associated with the use of new technologies in the electric power industry.

**Key words:** FEC, Smart Grid, RES, energy efficiency.

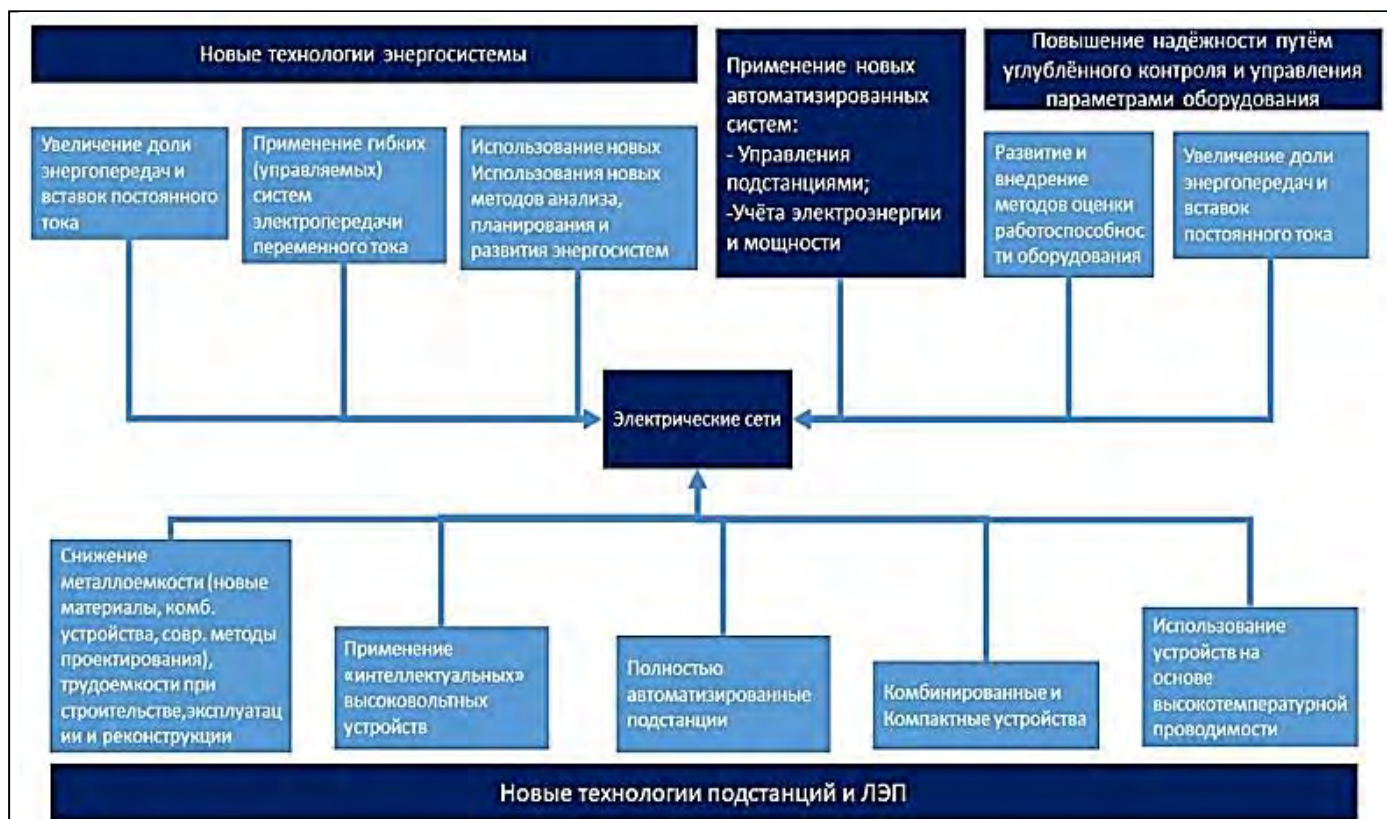
### I. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение интеллектуальных технологий в ТЭК необходимо для России, учитывая вызовы, которые стоят перед нашей страной уже сегодня. При дальнейшем развитии технологий Smart Grid встает необходимость изучения своих или адаптации уже имеющихся технологий с учетом специфики развития энергетической отрасли в нашей стране.

Для повышения качества оперативного управления распределением электроэнергии от источников малой генерации и ВИЭ встанет необходимость введения и управления аналитической системы. Мы выделили первоочередные пути развития тренда до 2030 г.

### II. ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ЭФФЕКТЫ

Развитие интеллектуальных сетей в России необходимо обеспечить созданием нормативной базы, способствующей бесперебойной работе данной технологии. С учетом



Направления развития ТЭК

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЭК

Изменения в ЕЭС	1-й этап (до 2020 г.)	2-й этап (до 2030 г.)
Качественные	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Запуск масштабного процесса модернизации с наращиванием мощностей генерации и пропускной способности сети.</li> <li>2. Широкое применение FACTS</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Стабильное эффективное функционирование механизмов развития ЕЭС.</li> <li>2. Адекватность и современность электроэнергетики.</li> </ol>
Содержательные	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Объединение на параллельную работу с УСТЕ.</li> <li>2. Обновление изношенного парка генерирующего оборудования.</li> <li>3. Обеспечение надежной связи Сибири с европейской частью ЕЭС с достаточной пропускной способностью.</li> <li>4. Широкое использование ВПТ и передач ПТ для обеспечения надежности и живучести ЕЭС.</li> <li>5. Обеспечение безопасности электроснабжения, его надежности в городах.</li> <li>6. Достижение генерацией и сетями адекватности спросу на ЭЭ.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обеспечение энергетических конкурентных преимуществ хозяйственной деятельности на территории России.</li> <li>2. Конкурентные преимущества ЕЭС на глобальном рынке электроэнергии.</li> <li>3. Постоянное внедрение эффективных прогрессивных технологий.</li> <li>4. Доминирование рыночных отношений.</li> <li>5. Экспорт системных и инженерных услуг.</li> <li>6. Интеграция в состав континентальной энергосистемы.</li> </ol>

специфики электросетевых комплексов городов России в долгосрочной перспективе до 2030 года возможно лишь частичное внедрение интеллектуальных систем, направленных на решение основных задач данной отрасли, включающих повышение качества и надежности энергоснабжения страны, увеличение эффективности функционирования электросетевого комплекса, качественное улучшение технического состояния энергосетевой инфраструктуры, а также снижение негативного влияния на окружающую среду.

С использованием нового технологического оборудования и интеллектуальных систем в сфере накопления электроэнергии повышается маневренность и управляемость ее передачами, сглаживаются провалы потребления во время ее неполной загрузки с последующей отдачей

в систему в моменты пикового потребления. Это способствует уменьшению зависимости генерирующих мощностей от неравномерного потребления, а также улучшает качество производимой энергии и создает возможности для гибкого подключения новых потребителей.

Внедрение объектов малой генерации в зоне децентрализованного энергоснабжения при использовании местных энергоресурсов, а также возобновляемых источников энергии способствует повышению эффективности развития энергосетевого хозяйства. Такие мероприятия позволят удовлетворить спрос на энергию и топливо в энергодефицитных регионах, обеспечат надежное и качественное снабжение, тем самым упростят энергетическое освоение новых территорий. Энергетика, основанная на ВИЭ, будет развиваться в виде малых гидроэлектростанций, солнечных,



теплоснабжающих, биоэнергетических, ветровых энергоустановок, геотермальных электростанций, мусоросжигательных и мусороперерабатывающих энергокомплексов в крупных городах.

### III. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЭК

Среди множества новых технологий выделены направления в области развития всей энергосистемы, автоматизированных систем, повышения надежности подстанций и ЛЭП (рисунок).

Этапы развития ТЭК разделены на два основных периода: до 2020 и до 2030 г. Эффекты внедрения технологий представлены в разрезе качественных и содержательных изменений ЕЭС и приведены в таблице.

### Список литературы

- [1] Хрипач Н.А. К вопросу о моделировании гибридных накопителей энергии // Технические науки на службе созидания и прогресса: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Самара, 2017. С. 268.
- [2] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>
- [3] Переоборудование существующих промышленных котельных в мини-ТЭЦ // Тригенерация – портал по комбинированной выработке энергии и мини-ТЭЦ. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/771-Pereoborudovanie-sushchestvuyushchih-promyshlennyh>.
- [4] Digitizing Energy Analytics-Powered Performance // Accenture: New isn't on its way. We're applying it right now URL: [https://www.accenture.com/t20150523T020857Z\\_w\\_us-en/acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital\\_1/Accenture-Digitizing-Energy-Analytics-Powered-Performance.pdf?fla=en](https://www.accenture.com/t20150523T020857Z_w_us-en/acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital_1/Accenture-Digitizing-Energy-Analytics-Powered-Performance.pdf?fla=en).

# ВЛИЯНИЕ НА НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ИГР

Щербаков Е.В., Высоких Д.Д., Толстихина Л.В.  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» «Саяно-Шушенский филиал»  
Саяногорск, Черёмушки, Россия  
Eugene\_Shv@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Одной из задач рынка электроэнергетики является распределение энергоресурсов между заявками потребителей. С использованием методов математической статистики можно произвести распределение электроэнергии между предприятиями. В будущем ожидается увеличение спроса на электроэнергию. Небольшую, но важную долю в производстве электроэнергии будут играть малые ГЭС (МГЭС). МГЭС оказывают меньшее влияние на экологию, чем станции большой мощности, а также позволяют увеличить надёжность электроснабжения удалённых потребителей.

**Материалы и методы:** Методика экономико-математической модели распределения малой генерации основана на теории игр. Для оценки надёжности безотказной работы линий электропередачи (ЛЭП) использован нормальный закон распределения.

**Результаты:** В соответствии с программой развития Республики Хакасия рассчитан ориентировочный уровень энергопотребления к 2030 году, который составит 4471,3 млн кВт·ч. Произведено распределение энергоресурсов планируемых МГЭС между предприятиями с применением экономико-математической модели, основанной на теории игр. Оценена надёжность электроснабжения потребителей, которая без учёта МГЭС составит 85,1 %, с учётом МГЭС – 99,2 %.

**Выводы:** Величина предполагаемого покрытия энергодефицита за счёт строительства планируемых МГЭС составит 478,6 млн кВт·ч. Надёжность работы электрических сетей Республики Хакасия повысится на 14,1 %.

**Ключевые слова:** электроснабжение, малая генерация, заявки, теория игр, надёжность, распределение, энергодефицит.

## INFLUENCE ON THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY OF CONSUMERS UNDER THE DISTRIBUTION OF SMALL GENERATION USING THE THEORY OF GAMES

E. Shcherbakov, D. Visokih, L. Tolstikhina  
Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch  
Sayanogorsk, Cheryomushki, Russian Federation  
Eugene\_Shv@mail.ru

## Abstract

**Background:** The important task of the modern electricity market is the electric power distribution between consumer applications. Using mathematical statistics methods, one can determine the electric power distribution for enterprise applications. Electricity generation of several small hydropower plants allows to increase the reliability of the power transmission lines due to a great number of connections to the local power system, which indicates a higher reliability of power supply to remote consumers. In the future it is expected that there will be a considerable increase in electricity demand and generating capacities. In this electricity generation small hydropower plants will have a very important part due to less environmental impact as well as increased electric reliability.

**Materials and methods:** The methodology of this mathematical and economic model is based on Game Theory. Electric reliability is determined using the normal distribution law for trouble-free operation of the transmission line.

**Results:** The electric power distribution between enterprises is determined using the mathematical and economic model based on Game Theory. According to the development programme for the Republic of Khakassia, an indicative level of electricity consumption by 2030 is found, which will amount to 4 471,3 million kWh. The reliability of power supply was calculated. It will amount to 85,1 % without account for small hydropower plants and with account for small hydropower plants – 99,2 %.

**Conclusions:** The expected deficiency of electricity shortages due to the small hydropower plant construction will amount to 478,6 million kWh. The trouble-free operation of the electric networks in the Republic of Khakassia will increase by 14,1 %.

**Key words:** electric power supply, small generation, applications, Game Theory, reliability, distribution, electricity shortages.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент Республика Хакасия является энергоизбыточным регионом. Комплексный проект развития промышленного потенциала Республики Хакасия до 2030 г. объединяет целый ряд производственных направлений, многие из которых уже реализуются. В их числе: создание Бейского угольного кластера, развитие металлургического производства на базе рудников в Абазе и Вершине Тёи, строительство завода по производству электролитического металлического марганца в посёлке Туим и другие [15]. ПАО «Россети» заявило о намерении построения линии электропередачи 500 кВ из Хакасии в Монголию, что обострит проблему энергодефицита в данном регионе в недалёком будущем [7].

Решить проблему энергодефицита в Республике Хакасия к 2030 г. можно строительством малых гидроэлектростанций.

## II. ДИНАМИКА РОСТА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЮЖНЫХ РЕГИОНАХ СИБИРИ С 2015 ПО 2030 ГОД

Ожидается повышение спроса на электроэнергию к 2030 г. на 17,99 % [8]. Потребление в Республике Хакасия на 2030 г. составит 25 844,30 млн кВт·ч/год.

В категорию «Потребление в Республике Хакасия» включены нужды потребителей по месту размещения планируемых МГЭС. Динамика роста энергопотребления в Республике Хакасия и сальдо перетоков в смежные энергосистемы представлены на гистограмме.



Динамика роста энергопотребления и перетоков мощности из Республики Хакасия

Выработка Абаканской солнечной электростанции (СЭС) также включена в расчёты и составляет 6,5 млн кВт·ч [11]. СЭС в течение дня выдают электроэнергию, величина которой напрямую зависит от погодных условий. Данная электростанция будет являться в будущем лишь вспомогательной для энергообеспечения.

Для Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС, а также Абаканской, Сорской, Абазы-Энерго ТЭС выработка принята в соответствии с Программой перспективного развития электроэнергетики в Республике Хакасия до 2030 г. Суммарная выработка электроэнергии электростанциями Хакасии к 2030 г. составит 34 383,5 млн кВт·ч, а дефицит электроэнергии – 4 471,3 млн кВт·ч.

## III. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИГР

Для распределения энергоресурсов малой гидроэнергетики используется методика на основе теории игр, что позволяет формализовать решение по распределению вырабатываемой электроэнергии по заявкам потребителей. Выработка электроэнергии планируемых МГЭС составит 478,6 млн кВт·ч [10, с. 120]. Для расчётов применяется механизм открытого управления. Считаем, что сообщаемая потребителями информация достоверна, она необходима для ликвидации дефицита энергоресурсов. Условные обозначения распределения энергоресурсов МГЭС представлены в табл. I.

Таблица I – Условные обозначения распределения энергоресурсов МГЭС

Наименование	Обозначение
Количество потребителей	$N$
Заявка $i$ -го потребителя на энергию	$S_i$
Ресурс, направляемый $i$ -му потребителю	$x_i$
Годовая выработка МГЭС	$R$

Алгоритм принятия решений:

1. Ресурс распределяется поровну между всеми потребителями в размере  $x_i$ .
2. Для  $i$ -го потребителя  $S_i$  полностью хватает выделенного ресурса на первом этапе.
3. Количество потребителей сократилось с  $N$  до  $N_1$ , объем ресурса, подлежащего удовлетворению, также сократился с  $R$  до  $R_1$ .
4. Повторяем пункты пп. 1–2 для распределения энергоресурсов между оставшимися потребителями.

Расчёт повторяется до тех пор, пока оставшихся энергоресурсов не хватит ни для одной заявки [9, с. 3997–4000]. Данные планируемых потребителей приняты в соответствии с программами перспективного развития Республики Хакасия [1–6]. Распределение энергоресурсов представлено в табл. II–VI.

Таблица II – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ АСКИЗСКОЙ ГЭС

Потребители	Заявки э/э, МВт·ч	$R/N=169\ 994/4 = 42\ 499$
Распределено по заявкам		15 045,27
$R$ , МВт·ч		169 994,00
Излишки э/э, МВт·ч		154 948,73

Таблица III – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ОНАКСКОЙ ГЭС

Потребители	Заявки э/э, МВт·ч	$R/N = 598\ 421/4 = 11\ 968$
Распределено по заявкам		9392,00
$R$ , МВт·ч		59841,00
Излишки э/э, МВт·ч		50449,00

Таблица IV – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ЕРБИНСКОЙ ГЭС

Потребители	Заявки э/э, МВт·ч	$R/N = 136\ 235/4 = 27\ 247$	$R1/N1 = 130\ 514,8/1 = 130\ 514,8$
Распределено по заявкам	34 010,20	9 392,00	28 290,00
$R$ , МВт·ч	136 235,0	130 514,80	102 224,80
Излишки э/э, МВт·ч		102 224,80	

Таблица V – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ТЕЙСКОЙ ГЭС

Потребители	Заявки э/э, МВт·ч	R/N = 136 235/4 = 27 247
Распределено по заявкам		15 801,12
R, МВт·ч		52 287,00
Излишки э/э, МВт·ч		36485,88

$$\Phi(x) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (1)$$

где  $x = \frac{t - \bar{t}}{\sigma}$  – квантиль нормированного распределения.

Таблица VI – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ИЮССКОЙ ГЭС

Потребители	Заявки э/э, МВт·ч	R/N = 60 282/2 = 30 141	R1/N1 = 60281,75/1 = 60 281,75
Распределено по заявкам	960000,00	0,25	60281,75
R, МВт·ч	60281,75		0,00
Излишки э/э, МВт·ч	Отсутствуют		

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - \Phi(-x) = \Phi(x). \quad (2)$$

Значение функции  $\Phi(x)$  определялось по таблице значений интегральной функции Лапласа. После расчёта надёжности для каждой линии в отдельности использовался метод структурных схем.

Рассматриваемая сеть представляется в виде смешанной схемы с последовательным и параллельным соединением элементов, которые взаимно коррелированы. Для последовательного соединения вероятность безотказной работы определяется произведением вероятностей безотказной работы элементов схемы [12].

Процент безотказной работы существующей электрической сети равен:

$$P_1 = 1 - \left( 1 - \left( 0,971^2 + 0,999^4 + 0,695^3 \right) \right)^5 = 0,851 = 85,1 \%$$

Данные электрических соединений подстанций и генерирующих узлов МГЭС представлены в опубликованной статье [14, с.171].

Суммарные излишки электроэнергии МГЭС составят 688,217 млн кВт·ч. Они будут передаваться в ОЭС Сибири Хакасского РДУ.

#### IV. ВЛИЯНИЕ МГЭС НА НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

Для оценки надёжности электроснабжения потребителей, с учётом планируемых МГЭС, используется нормальный закон распределения. В теории надёжности нормальным распределением описывают наработки на отказ объектов вследствие их износа и старения [13].

Для выполнения расчётов с использованием нормального распределения применяют табулированную функцию Лапласа. Вероятность попадания нормированной величины в интервал (0; x) [12]:

Таблица VII – РАСЧЁТ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Линия	Длина линий, км	Частота внеплановых отключений, 1/год на 100 км	Частота отключений с учётом длины, 1/год	Число отключений в год	
<b>Без учёта МГЭС</b>					
ПС Туим – ПС Сора	128,74	0,02	0,0257	1,0	
ПС Сора – ПС Абакан-районная	73,00		0,0146		
ПС Абакан-районная – ПС Абаканская	6,81		0,0014	0,1	
ПС Абаканская – ПС Камышта	98,05		0,0196	1,0	
ПС Ка мышта – ПС Аскиз	26,28		0,0053	0,3	
ПС Аскиз – ПС Югачи	36,71		0,0073	0,4	
ПС Югачи – ПС Тея	44,91		0,0089	1,0	
ПС Аскиз – ПС Абаза	86,87		0,0174		
<b>С учётом МГЭС</b>					
СШ Аскизкой ГЭС – ПС Аскиз	25,00	0,02	0,0050	1,0	
СШ Онакской ГЭС – ПС Абаза			0,0050		
СШ Ербинской ГЭС – ПС Сора	20,00		0,0040		
СШ Июской ГЭС – ПС Туим			0,0040		
СН Аскизкой ГЭС – НН ПС Аскиз	18,00		0,0036		
СН Онакской ГЭС – НН ПС Абаза	16,00		0,0032		
НН Ербинской ГЭС – НН ПС Сора	11,00		0,05		0,0055
НН Июская ГЭС – НН ПС Туим	9,00				0,0045

Таблица VIII – РАСЧЁТ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Линия	Математическое ожидание, ч	Стандартное отклонение, ч	Время безотказной работы, ч	Квантиль распределения	Ф(x)
<i>Без учёта МГЭС</i>					
ПС Туим – ПС Сора	8760	1500	8000	–0,51	0,971
ПС Сора – ПС Абакан-районная					
ПС Абакан-районная – ПС Абаканская	87600			–53,07	0,999
ПС Абаканская – ПС Камышта	8760			–0,51	0,695
ПС Камышта – ПС Аскиз	26280			–12,19	0,999
ПС Аскиз – ПС Югачи	17520			–6,35	
ПС Югачи – ПС Тея	8760			–0,51	0,695
ПС Аскиз – ПС Абаза					
<i>С учётом МГЭС</i>					
СШ Аскизкой ГЭС – ПС Аскиз	8760	1500	8000	–0,51	0,695
СШ Онакской ГЭС – ПС Абаза					
СШ Ербинской ГЭС – ПС Сора					
СШ Июской ГЭС – ПС Туим					
СН Аскизкой ГЭС – НН ПС Аскиз					
СН Онакской ГЭС – НН ПС Абаза					

Процент безотказной работы электрической сети с учётом МГЭС:

$$P_2 = 1 - ((0,695^8) \cdot (1 - (0,971^2 + 0,999^3 + 0,695^3)^5) = 99,2 \%$$

Прирост показателя надёжности составит:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 99,2 - 85,1 = 14,1\%$$

Расчёт безотказной работы электрической сети Республики Хакасия представлен в табл. VII и VIII.

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Произведено распределение энергоресурсов по выдаче мощности на примере пяти планируемых МГЭС с применением теории игр.

2. Рассчитан дефицит электроэнергии в Республике Хакасия к 2030 году, который составит 4 471,3 млн кВт·ч.

3. Величина предполагаемого покрытия энергодефицита за счёт строительства МГЭС составит 478,6 млн кВт·ч.

4. Рассчитан процент безотказной работы электрических сетей Республики Хакасия с применением вероятностно-статистических методов. Надёжность электроснабжения потребителей повысится на 14,1 %.

## Список литературы

- [1] Постановление об утверждении схемы и программы перспективного развития электроэнергетики в Республике Хакасия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/432991888/>.
- [2] Положение о территориальном планировании. URL: <http://askiz.org/city/ЖКН%20Hozystvo/Gradostroitelna%20infa/>
- [3] Реестр инвестиционных предложений. URL: <http://www.invest.r-19.ru/offers/reestr-investicziornyix-predlozhenij/>

- [4] Инвестиционные проекты и площадки Таштыпского района. URL: <http://amotash.khakasnet.ru/investicziornyie-proektyi-i-ploshhadki-tashtyipskogo-rajona.html>.
- [5] Инвестиционный портал [Электронный ресурс]. Создание комплекса по производству цемента. URL: <http://www.invest.r-19.ru/offers/reestr-investicziornyix-predlozhenij/sozdanie-kompleksa-po-proizvodstvu-czementa/>.
- [6] План создания инвестиционных объектов и объектов инфраструктуры в Республике Хакасия. URL: <http://www.invest.r-19.ru/offers/plan-sozdaniya-investicziornyix-obektov-i-obektov-infrastruktury/>
- [7] URL: <http://www.irk.ru/news/20170420/powerline/>
- [8] Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2017 г. № 1209-р.
- [9] Бучаев С.А., Яковлев Е.А. Экономико-математическая модель распределения энергоресурсов для малой гидроэнергетики на основе теории игр // Российское предпринимательство. № 16(22), С. 3989–4002.
- [10] Техничко-экономическое обоснование строительства малых ГЭС в Республике Хакасия / М.В. Кяри [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. Т.3. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С. 120–124.
- [11] ЕвроСибЭнерго [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kges.ru/press\\_tsentr/novosti/abakanskaya\\_ses\\_evrosibenergo\\_vyirabotala\\_6 mln\\_kvтч/](http://www.kges.ru/press_tsentr/novosti/abakanskaya_ses_evrosibenergo_vyirabotala_6 mln_kvтч/).
- [12] URL: <https://studfiles.net/preview/6084999/page:12/>
- [13] Савоскин Н.Е. Надёжность электрических систем: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2004.
- [14] Сёма Е.Г., Тенешев А.В., Фроленко Н.С. Перспективы использования гидроэнергетических ресурсов Республики Хакасия // Гидроэлектротехника в XXI веке: сб. матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Татарникова. Черемушки, 2017. С. 169–174.
- [15] МИД России [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mid.ru/vnesneekonomiceskie-svazi-sub-ektov-rossijskoj-federacii/-/asset\\_publisher/ykgrK2nCl8c/content/id/2778029/](http://www.mid.ru/vnesneekonomiceskie-svazi-sub-ektov-rossijskoj-federacii/-/asset_publisher/ykgrK2nCl8c/content/id/2778029/)
- [16] Фроленко Н.С., Сёма Е.Г. Исследование возможности работы малой генерации в энергосистеме Республики Хакасия // Электроэнергетика глазами молодежи: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. Т.3. Самара, 2017. С. 37–41.

**Секция № 6**

**ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**



**Scientific sections № 6**

**INDUSTRIAL POWER SYSTEMS. ENERGY EFFICIENCY**



# ИНФРАКРАСНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Алтухов И.В., Шамарова Н.А.  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»  
Иркутск, Россия

## Аннотация

**Состояние вопроса:** К основным способам сушки растительного сырья относятся: конвективный, кондуктивный, инфракрасный, токами высокой и сверхвысокой частоты. Однако существующие методы обладают недостаточным КПД. В связи с этим разработка энергосберегающей технологии сушки растительного сырья, повышающего качество конечного продукта, является на сегодняшний день актуальной задачей.

**Материалы и методы:** Эффективные режимы импульсной инфракрасной обработки и сушки растительного сырья определены посредством теоретических и экспериментальных исследований.

**Результаты:** Анализ технологий, применяемых для сушки сельскохозяйственного сырья, показал, что установки, работающие на принципе преобразования электрической энергии в энергию инфракрасного излучения, имеют существенные преимущества и обширный диапазон использования.

**Выводы:** Предложена технология сушки сырья, в основе которой лежит метод импульсного инфракрасного излучения, позволяющий получить концентрированные продукты с высокой пищевой ценностью длительного хранения и с наименьшими энергозатратами.

**Ключевые слова:** энергосберегающая электротехнология, растительное сырье, метод импульсного инфракрасного излучения.

## INFRARED ELECTROTECHNOLOGY FOR DRYING RAW MATERIAL

I. Altuhov, N. Shamarova  
Irkutsk Nation Technical University  
Irkutsk, Russian Federation

## Abstract

**Background:** For drying plant raw materials, the following methods are used: convective, conductive, infrared, high and ultrahigh-frequency currents. However, existing methods have insufficient efficiency. The task of creating an energy-saving technology for drying vegetable raw materials that enhances the quality of the final product becomes urgent.

**Materials and Methods:** Effective regimes of pulsed infrared processing and drying of plant raw materials are determined through theoretical and experimental studies.

**Results:** Analysis of the development of technologies used for drying agricultural raw materials showed that installations operating on the principle of converting electric energy to infrared energy have significant advantages and an extensive range of uses.

**Conclusions:** The technology of drying of raw materials is proposed, based on the method of pulsed infrared radiation, which allows obtaining concentrated products of high nutritional value of long-term storage with the lowest energy costs.

**Key words:** energy saving electrotechnology, vegetable raw materials, the method of pulsed infrared radiation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наибольший интерес для научного сообщества представляют вопросы энергосбережения и повышения энергетической эффективности как на производстве, так и в сельском хозяйстве. Применение современных энергосберегающих технологий и оборудования для сохранения продукции сельского хозяйства является важнейшим фактором, играющим главную роль в увеличении объемов производства и снижении себестоимости сельскохозяйственной продукции.

## II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Анализ состояния современного рынка продовольственного сырья показывает, что потребители все больше внимания уделяют продуктам, имеющим высокие качественные показатели и длительные сроки хранения. В то же время появляются новые технологические возможности

для получения таких продуктов с использованием прогрессивных технических средств. Хорошими возможностями для решения указанных выше задач обладают методы сушки растительного сырья.

Высушенное с использованием новых источников излучения и систем управления растительное сырьё имеет ряд преимуществ:

- 1) малая остаточная влажность позволяет существенно увеличить срок хранения, а также получить высокую концентрацию питательных веществ и незначительный объем массы;
- 2) значительно облегчить условия хранения и транспортировки;
- 3) возможность использовать данные продукты для снабжения населения дальних и труднодоступных районов страны, а также туристов, армии, флота т. п.



Большое разнообразие способов, методов и средств сушки сырья растительного происхождения обусловлено особенностями продуктов, подвергаемых сушке и видами связи влаги, а также экономическими соображениями [3].

Наибольшее распространение получили следующие способы сушки: конвективный, кондуктивный, инфракрасный, токами высокой и сверхвысокой частоты. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, поэтому при выборе метода сушки и технологического оборудования необходимо учитывать эффективность метода, реализуемого в данном устройстве. Метод должен отвечать следующим требованиям: иметь наименьшие затраты энергии, давать минимальное снижение потерь активно действующих веществ и высокие пищевые параметры конечного продукта, полученный продукт должен обладать хорошей восстанавливаемостью и иметь длительный срок хранения. Однако реализовать все эти требования на основе традиционных методов обработки чрезвычайно трудно.

### III. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Выходом из сложившегося положения является применение импульсной инфракрасной (ИК) обработки и сушки. Развитие этого направления обуславливается тем, что вещество имеет электрическую природу. Известно, что наиболее эффективно на электрические заряженные частицы воздействуют с помощью электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Растительное сырьё по своей физической природе обладает определенными электро- и теплофизическими свойствами: теплоёмкостью, теплопроводностью, электропроводностью, диэлектрической и магнитной проницаемостью, оптическими свойствами. Данные свойства проявляются при воздействии на материал электрическим, магнитным и электромагнитным полями, волнами различной частоты. В результате происходят изменения в состоянии электрических зарядов материалов, что приводит к выделению теплоты в веществе и одновременно к изменению его физических и химических свойств.

Специфическое воздействие, которое оказывает ИК-излучение на пищевые продукты растительного происхождения, связано с интенсификацией процессов биохимических превращений, являющихся следствием резонансного воздействия поглощаемой энергии на связи атомов в молекулах, частоты колебаний которых совпадают или кратны частоте падающего излучения.

В целом ИК-нагрев имеет следующие преимущества [2]:

- 1) при температуре излучателя 1500 °С ИК-излучение оказывается в 4–5 раз интенсивнее теплопередачи конвекцией. Следовательно, преимущество инфракрасного нагрева перед конвективным состоит, прежде всего, в большей интенсивности теплопередачи, при этом необходимо чтобы температура излучателя была выше 500 °С;
- 2) температура воздуха, через который проходят лучи, на нагрев или сушку существенного влияния не оказывает, а возможность сфокусировать лучистый поток на нагреваемом объекте увеличивает эффективность процесса;
- 3) способность продуктов поглощать энергию ИК-излучения позволяет подбирать излучатели или температуру нагрева излучателей так, чтобы обеспечивался наиболее интенсивный нагрев именно тех частиц сырья или поверхностей, которые должны нагреваться наиболее интенсивно.

### IV. ВЫВОДЫ

Применение инфракрасного нагрева для сушки растительного сырья имеет ряд преимуществ перед другими методами, а использование новых технических излучателей и систем управления ими позволяет значительно интенсифицировать процесс сушки. Продукты, полученные путем использования данных систем, обладают высокими качественными показателями и возможностью длительного хранения.

### Список литературы

- [1] Алтухов И.В. технология получения концентрированных сахаросодержащих продуктов с использованием импульсной инфракрасной обработки и сушки корнеклубнеплодов: дис. ... техн. наук: 05.18.01. Красноярск, 2016. 440 с.
- [2] Электронагревательные установки в сельскохозяйственном производстве / В.Н. Расстригин [и др.]; под. ред. В.Н. Расстригина. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
- [3] Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 527 с.

# ОСУШКА ПРИРОДНОГО ГАЗА КАРБОНАТНЫМ ШЛАМОМ

Николаева Л.А., Аль-Окби А.К.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

larisanik16@mail.ru

## Аннотация

Добываемый на месторождениях природный газ не является чистым продуктом, он содержит много примесей. Многие углеводородные газы, подлежащие переработке, содержат влагу. Наличие влаги в природном газе отрицательно сказывается на процессах его переработки. При переработке влажных газов ухудшаются технико-экономические показатели работы установок. В газопроводах наличие воды может приводить к образованию гидратов, а в магистральной может появиться обычный лед. И то, и другое способно повлечь образование в трубах пробок, препятствующих движению газового потока. В этих условиях нарушается нормальная работа регулирующих клапанов, ответственных за поддержание должного давления. Поэтому осушка природного газа является одним из важных перспективных направлений во многих технологических процессах.

**Состояние вопроса:** В настоящее время газовая промышленность является одной из ведущих отраслей промышленности. Так, в 2017 г. «Газпром» увеличил добычу газа на 12,4% по сравнению с 2016 г., в настоящее время общий объем достиг до 472 млрд куб. м.

**Материалы и методы:** Сорбционный материал на основе карбонатного шлама, лабораторная установка по осушке природного газа, расчетный метод технологических характеристик адсорбера.

**Выводы:** Изучен процесс адсорбционной осушки природного газа разработанным гранулированным материалом на основе шлама химводоочистки Казанской ТЭЦ-1. На лабораторной установке показано, что адсорбционная емкость материала по влаге достигает максимального значения 2,4 г/г. Определены технологические свойства адсорбента. Рассчитаны технологические характеристики адсорбера периодического действия с неподвижным слоем гранулированного материала: диаметр, количество материала на одну загрузку, продолжительность адсорбции. Предложена технологическая схема рекуперационной адсорбционной установки осушки природного газа.

**Ключевые слова:** адсорбционная осушка, природный газ, гранулированный сорбционный материал, адсорбер периодического действия, неподвижный слой, технологическая схема осушки.

# DEHYDRATION NATURAL GAS USING CARBONATE SLUDGE

L. Nikolaeva, A. Al-Okbi

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russian Federation

larisanik16@mail.ru

## Abstract

The natural gas which extracted from the fields is not considered pure product, It contains a lot of impurities. Many hydrocarbon gases, which are to be addressed contains moisture. The presence of moisture in the natural gas has a negative effect on the processes of its processing. When processing wet gases, the technical and economic performance of the installations deteriorates. In gas pipelines, the presence of moisture leads to the formation of hydrates, ordinary ice may appear in the main line. Both of these can lead to the formation of traffic jams in the pipes, preventing the movement of the gas flow. In these conditions, the normal operation of the control valves responsible for maintaining proper pressure is disrupted. Therefore, dehydration of natural gas is one of the important promising directions in many technological processes.

**Background:** At present, the gas industry is one of the leading industries. So, in 2017, Gazprom increased gas production by 12.4% compared to 2016, currently the total volume reached 472 billion cubic meters.

**Materials and methods:** Sorption material based on carbonate sludge, a laboratory plant for dehydration natural gas, the calculation method of technological characteristics of the adsorber.

**Conclusions:** The process of adsorption drying of natural gas was developed by the developed granulated material on the basis of slurry of chemical water purification of Kazan CHP-1. The laboratory installation shows that the adsorption capacity of the material on moisture reaches a maximum value of 2.4 g/g. The technological properties of the adsorbent are determined. The technological characteristics of a batch adsorber with a fixed layer of granular material are calculated: diameter, amount of material per load, duration of adsorption. A technological scheme of a recuperative adsorption plant for dehydration natural gas is proposed.

**Key words:** adsorption dehydration, natural gas, granular sorption material, batch adsorption, fixed bed, technological scheme of dehydration.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В отличие от нефти мировая добыча газа продолжает расти достаточно быстрыми темпами. В 2000 г. добыча газа в мире достигла 2,37 трлн м<sup>3</sup> т. Даже в бывшем СССР и России, когда непрерывно снижались объемы производства, газодобыча продолжала расти, а затем стабилизировалась. По объемам добычи газа в мире со значительным отрывом от других стран лидируют страны бывшего СССР и США. В число крупных газодобывающих стран мира входят: Канада, Великобритания, Индонезия, Нидерланды, Алжир, Норвегия и Мексика.

В настоящее время газодобывающая промышленность является одной из важнейших составляющих топливно-энергетического комплекса России. Наша страна обладает самыми крупными промышленными запасами природного газа (около 40% от мировых) и занимает лидирующее положение в мире по его добыче и экспорту. По предварительным данным Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса в 2011 г. суммарный объем добычи газа составил 670,7 млрд куб. м, что выше уровня 2010 г. на 20 млрд куб. м, (на 3,1 %). Определяющим фактором роста стало увеличение внутреннего потребления газа на 2,5 % и его поставок за пределы РФ на 4,5 %. Оценка размеров прогнозируемых запасов газа в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, на шельфах северных и восточных морей показывает, что Россия еще долгое время будет лидером мировой газовой отрасли.

Природным газом называется смесь таких газов, которые образовались при разложении различных органических веществ. Газ является одним из важнейших полезных ископаемых, активно применяемых не только в промышленности, но и в быту. До 98% природного газа составляет метан, а также его гомологи – этан, бутан, пропан [1].

Плотность природного газа в газообразном состоянии составляет 0,75 кг/м<sup>3</sup>, он самовозгорается при 65°C, а удельная теплота сгорания – 25 МДж/м<sup>3</sup>.

Транспортировка влажного газа приводит к выпадению водяного конденсата в трубах, а также к образованию кристаллогидратов. Кристаллогидраты отлагаются на поверхности труб и оборудования, что приводит к сужению диаметра проходных отверстий и увеличению гидравлического сопротивления при прохождении газового потока по трубам. Высокая влажность природного газа приводит к возникновению активных коррозионных процессов на поверхности оборудования. При взаимодействии компонентов углеводородного газа с водой могут образовываться гидраты. Газовые гидраты – твердые кристаллические соединения, образующиеся при определенных условиях из воды и низкомолекулярного газа. По внешнему виду гидраты напоминают лед или снег. Одним из условий образования гидратов является наличие капельной влаги. Для того чтобы избежать образования гидратов, необходимо предотвратить коррозию оборудования, произвести осушку природного газа [2].

Процесс осушки углеводородных газов осуществляется охлаждением, абсорбцией, адсорбцией и комбинированием перечисленных способов [3].

Степень осушки газа оценивают по температуре точки росы, характеризующей степень его насыщения водяными парами. Точка росы – температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы содержащийся в нем водяной

пар достиг насыщения и начал конденсироваться в росу. При осушке природного газа температура «точки росы» снижается и должна быть не выше, чем минимальная температура окружающей среды, в которой газ будет проходить при транспортировке. При этой температуре водяной пар начинает выпадать в виде капли влаги (росы), это означает, что парциальное давление паров воды в данном газе равно давлению насыщенного водяного пара при данной температуре. Определение температуры «точки росы» проводится гигрометрами-анализаторами, основанными на конденсационном методе: анализатор измеряет температуру конденсации паров воды на охлаждаемом зеркале в единицах температуры «точки росы».

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе рассматривается адсорбционный метод осушки для получения низких значений «точки росы» при невысокой влагоемкости углеводородного газа.

При охлаждении газа при постоянном давлении лишняя влага конденсируется, а точка его росы снижается. На этом базируется метод осушки газа охлаждением. Адсорбционная осушка заключается в избирательном поглощении паров воды с жидкими абсорбентами, в качестве которых используют ди- и триэтиленгликоли.

Адсорбционные способы осушки природного газа имеют ряд преимуществ по сравнению с абсорбционными (незначительное влияние температуры и давления на процесс адсорбции, относительная простота аппаратуры, малые эксплуатационные расходы), а в условиях, где требуется глубокая осушка газа, есть возможность получения точки росы до –70°C и ниже. К недостаткам адсорбционных методов осушки можно отнести высокие значения перепада давления, относительно высокие затраты тепла, истирание сорбционных материалов.

Адсорбционный метод разделения газовых смесей основан на избирательном поглощении углеводородов влаги твердыми сорбентами, которые хорошо адсорбируют высшие углеводороды и не поглощают метан. Адсорбенты должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокую адсорбционную емкость, механическую прочность, селективность, способность к регенерации, стабильность свойств в условиях длительной эксплуатации, быть нетоксичными и некоррозионно активными, иметь низкую стоимость.

В работе в качестве адсорбента для осушки природного газа предлагается использовать гранулированный сорбционный материал, разработанный на основе карбонатного шлама Казанской ТЭЦ-1. Карбонатный шлам является отходом тепловых электрических станций (ТЭС), образующимся в процессе водоподготовки на стадии предварительной очистки в результате процессов известкования и коагуляции природных вод. Представляет собой однородный порошок от светло желтого до коричневого цвета. Рентгенографический качественный фазовый анализ на дифрактометре D 8 ADVANCE фирмы Bruker показал следующий химический состав: кальцит CaCO<sub>3</sub> – 73 %, брусит Mg(OH)<sub>2</sub> – 9 %, портландит Ca(OH)<sub>2</sub> < 1 %, кварц SiO<sub>2</sub> – 0,5 %, прочие вещества – 17,5 %. Определены технологические характеристики шлама как сорбционного материала: насыпная плотность – 560 кг/м<sup>3</sup>, влагоемкость – 57 %, адсорбционная емкость (по влаге) – 1,1 г/г, суммарный объем пор – 0,41 см<sup>3</sup>/г, удельная поверхность – 23,2 м<sup>2</sup>/г [4].

В технологиях осушки природного газа, как правило, применяются адсорберы с зернистой загрузкой. Поэтому для уменьшения гидравлического сопротивления в слое, через который пропускается осушаемый газ, адсорбенты изготавливают в гранулированном виде. Для получения гранул мелкодисперсный шлам с размерами частиц от 0,01 до 0,09 мм смешивается с жидким натриевым стеклом (ЖНС) при массовом и объемном соотношении 2:1, соответственно. Соотношение подобрано экспериментальным путем. При меньшем соотношении происходит неполное пропитывание шлама ЖНС и при последующем обжиге гранулы осыпаются. При большем соотношении происходит перерасход связующего. Далее смесь доводится до однородной массы, окатывание происходит в ручную. Гранулы выдерживаются в печи при  $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение трех часов, затем они охлаждаются до комнатной температуры в эксикаторе. Полученные гранулы имеют диаметр от 1 до 2,5 мм.

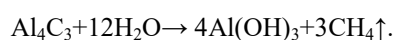
Технологические характеристики полученного гранулированного материала следующие: адсорбционная емкость по влаге – 2,4 г/г; влагоемкость – 49%; насыпная плотность – 536 кг/м<sup>3</sup>; суммарный объем пор – 0,592 см<sup>3</sup>/г; удельная поверхность – 46,2 м<sup>2</sup>/г.

Гранулированный шлам (ГАСМ) имеет высокую пористость, что особенно важно при использовании его адсорбционных свойств в режиме пропускания газа. Низкая стоимость адсорбционного материала на основе шлама химводоочистки, доступность, возможность регенерации позволяют его использовать для осушки природного газа с минимальными затратами и наибольшей эффективностью.

Для исследования сорбционных свойств ГАСМ в газовой среде, приближенной по составу к природному газу, использовалась созданная на кафедре «Технология воды и топлива» КГЭУ модельная установка с неподвижным слоем шлама.

Установка включает в себя лабораторный адсорбер (рис. 1), в качестве которого применяли реакционную колонку, изготовленную из нержавеющей стали, что обеспечивало ее стойкость к агрессивным средам. Подвод и отвод газовой смеси осуществлялись с помощью штуцеров 3 и 13. Подводящий штуцер с помощью резьбового соединения объединялся с диффузионным колпачком 10. Это обеспечивало равномерное распределение газа по слою ГАСМ 8, размещенного на сетке 9, и препятствовало выносу частиц. Для нагрева колонки использовался термостат с электронагревателем 6. Температура газовой среды составляла 40<sup>o</sup>C.

Состав газовой среды: O<sub>2</sub> – 4–5,7 %; CH<sub>4</sub> – 75–79 %; H<sub>2</sub>O – 3 %. Оставшуюся часть объема газовой смеси составлял CO<sub>2</sub>. При адсорбции влаги концентрация изменялась в диапазоне от 0 до 10 мг/м<sup>3</sup>. Расход газов, приведенный к нормальным условиям, составлял 4·10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/с. Метан получали в лабораторных условиях при реакции карбида алюминия и воды:



Водопоглощение адсорбционного материала определялось гравиметрическим методом.

В работе предлагается включить в схему рекуперационной установки осушки природного газа данный адсорбер (рис. 2).

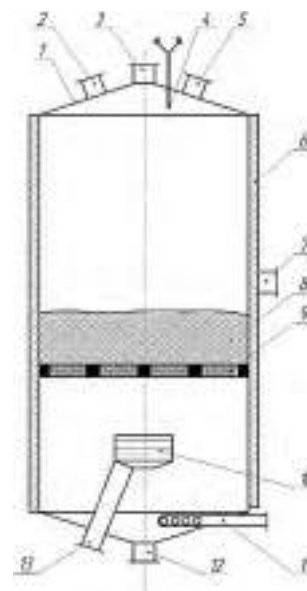


Рис. 1 – Реакционная колонка с неподвижным слоем ГАСМ: 1 – корпус; 2, 3 – штуцеры отвода адсорбтива и осушенного газа; 4 – термодатчик; 5, 7 – люки для загрузки и выгрузки адсорбента; 6 – электронагреватель; 8 – слой ГАСМ; 9 – стальная сетка с отверстиями диаметром не более 1 мм; 10 – диффузионный колпачок, 11, 13 – штуцеры подвода сжатого воздуха и газовой смеси; 12 – патрубок отвода конденсата

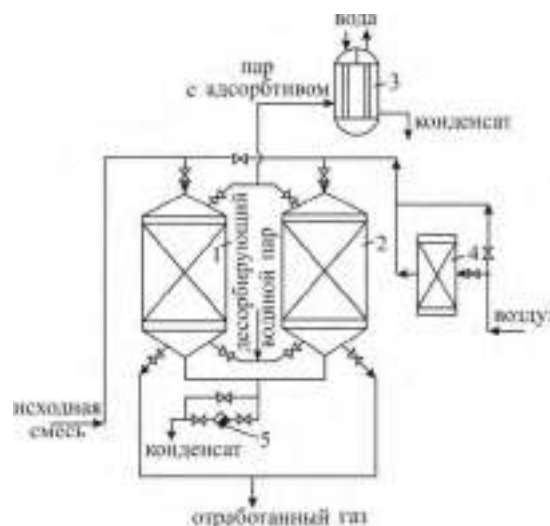


Рис. 2 – Схема рекуперационной адсорбционной установки: 1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор водяного пара и паров десорбированного вещества; 4 – калорифер; 5 – конденсатоотводчик

Несмотря на периодичность работы аппаратов с неподвижным слоем, адсорбционные установки работают непрерывно, в них включают несколько адсорберов, число которых определяется в соответствии с продолжительностью адсорбционно-десорбционного цикла.

Исходную газовую смесь подают в адсорбер 1, заполненный разработанным гранулированным сорбционным материалом. После насыщения слоя в адсорбере 1 его переключают на стадию десорбции, а исходную смесь направляют в адсорбер 2. Адсорбент регенерируют острым динамическим водяным паром, подаваемым в нижнюю часть адсорбера. Динамический пар уносит пары адсорбата в конденсатор 3. Конденсат адсорбата в смеси с водой идет далее на разделение. Сушку адсорбента производят горячим воздухом, подаваемым в адсорбер через калорифер 4. Охлаждают адсорбент атмосферным воздухом, подаваемым по обводной линии.

### III. ВЫВОДЫ

Произведен технологический расчет адсорбера периодического действия со следующими исходными данными: за один период проходит  $L = 2000 \text{ м}^3$  газозоудушной смеси с концентрацией метана  $C_0 = 0,0045 \text{ кг/м}^3$ . Температура процесса  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление атмосферное, скорость потока газозоудушной смеси  $w_n = 13 \text{ м/мин} = 0,22 \text{ м/с}$ , концентрация смеси после выхода из адсорбера  $C = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ . В качестве адсорбента использовался гранулированный сорбционный материал с диаметром зерен  $d_3 = 1 \div 2,5 \text{ мм}$  и насыпной плотностью  $\rho_n = 536 \text{ кг/м}^3$ . Высота слоя материала  $H = 0,5 \text{ м}$ , удельная поверхность  $a_v = 720 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , удельный свободный объем  $\epsilon_{св} = 0,375$ .

Построена изотерма адсорбции метана при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  на разработанном гранулированном материале (рис. 3).

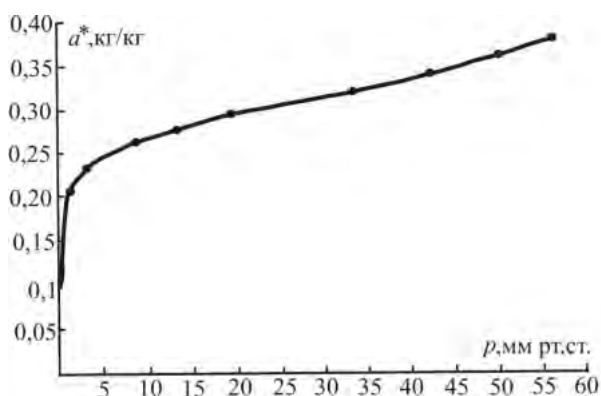


Рис. 3 – Изотерма адсорбции паров метана на сорбционном материале в условиях поглощения [5]

По изотерме определено количество гранулированного сорбционного материала, необходимое на одну загрузку. Диаметр адсорбера и продолжительность поглощения влаги до насыщения адсорбента приведены в таблице.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДСОРБЕРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Показатель	Значение
Диаметр, м	0,52
Площадь поверхности (удельная), $\text{м}^2/\text{м}^3$	720
Удельный свободный объем пор	0,375
Количество сорбционного материала на одну загрузку, кг	130,44
Продолжительность адсорбции, мин (ч)	360 (5,1)
Высота слоя гранулированного материала, м	0,5
Влажность гранулированного сорбционного материала, %	3,0

### Список литературы

- [1] Бальбердина И.Т. Физические методы переработки и использования газа. М.: Недра, 1999, 248с.
- [2] Гриценко А.М. Научные основы промышленной обработки углеводородного сырья. М.:Недра, 1977, 239 с.
- [3] Коротаев Ю.П., Лутошкин Т.С., Нам Н.К. К вопросу о борьбе с гидратами методом вымораживания // Газовая промышленность. 2001. №4. С. 45–47.
- [4] Николаева Л.А., Голубчиков М.А., Захарова С.В. Изучение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №9–10. С.86–91.
- [5] Лаптев А.Г., Коначин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. 426 с.

# РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Баннов Д.М., Крицкий М.В.

ФГБОУ ВО «Самарский Государственный Технический Университет»

Самара, Россия

dmnbnn@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Асинхронный двигатель (АД) является основным приводом большинства ответственных механизмов и агрегатов. Около 10 % всех отказов АД происходит по причине выхода из строя ротора и основную долю из них – обрыв стержня «беличьей клетки». На данный вид повреждения АД релейная защита не используется, а апробированных средств технической диагностики разработано крайне мало. В связи с развитием микропроцессорных защитно-диагностических устройств электрооборудования появляется возможность разработки систем диагностики основанных на новых принципах обработки информации, например интеллектуальных методов. Для исследования эффективности работы разрабатываемых систем встал вопрос о создании экспериментальной установки отвечающей вновь возникающим требованиям.

**Материалы и методы:** Для проведения исследования на испытуемом АД взамен заводского магнитопровода с залитой в него алюминиевой «беличьей клетки» был сконструирован новый магнитопровод, обмотка ротора заменена на медные изолированные стержни. Получение и обработка дискретных информационных сигналов со статора осуществлялась путем применения программного пакета LabVIEW. При этом временные ряды обрабатывались методами, принятыми в теории цифровой обработки сигналов.

**Результаты:** Авторами была создана экспериментальная установка, на которой возможно снятие и цифровая обработка данных со штатных средств мониторинга (токов и напряжений статора) при обрыве одного, двух, трех и четырех стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД. Информационная часть экспериментальной установки позволяет проводить апробацию разрабатываемых способов диагностики в режиме реального времени.

**Выводы:** Полученная экспериментальная установка позволяет достаточно полно проводить апробацию и оценивать эффективность разрабатываемых способов диагностики электрических машин.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; обмотка ротора; обрыв стержня; лабораторная установка.

# DEVELOPMENT AND CREATION EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR RESEARCH OF THE DIAGNOSTIC FEATURES OF DAMAGE TO THE SHORT-CIRCUIT OF THE ROTOR OF AN INDUCTION MOTOR

D. Bannov, M. Kritsky

Samara State Technical University

Samara, Russian Federation

dmnbnn@yandex.ru

**Abstract:** Induction motors (IM) is the main drive of most responsible mechanisms and assemblies. About 10 % of IM failures occur due to the damage of the rotor and the major part of them is the breakage of the braking bar of the “squirrel cage”. For this type of damage IM relay protection is not used and approved technical diagnostic tools are very little developed. Due to the development of microprocessor protective and diagnostic devices of electrical equipment, it becomes possible to develop diagnostic systems based on new principles, for example, intellectual methods. For research the efficiency of the developed system got a question of creating experimental installation that met the newly emerging requirements.

**Materials and Methods:** To carry out the research on the test IM, instead of the factory magnetic core with the aluminum “squirrel cage” was constructed new magnetic core with isolated copper short-circuit winding. The acquisition and processing of discrete information signals from stator was collected using the software LabVIEW. In this case, the time series were processed using methods adopted in the theory of digital signal processing.

**Results:** The authors have created an experimental installation on which it is possible to acquisition and digitally processing data from standard monitoring signs (current and voltage) when broken one, two, three and four in a row short-circuit bar of the rotor IM. The digital part of the experimental installation allows to test the developed diagnostic methods in real time.

**Conclusions:** Experimental installation allows to sufficiently carry out approbation and evaluate the efficiency of the developed methods for diagnosing electric machines.

**Key-words:** induction motor; rotor winding; broken rotor bar; experimental installation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологически конструкция асинхронного двигателя (АД) проста и надежна, поэтому АД с короткозамкнутой обмоткой ротора является основой многих ответственных механизмов и используется в качестве силового агрегата. При проведении научных исследований по разработке новых средств технической диагностики АД на микропроцессорной базе [1–3] главным инструментом является математическое моделирование. При этом, как правило, всегда требуется экспериментальная апробация теоретически обоснованных подходов и методов.

Цель: разработать экспериментальную установку, на которой возможно снятие и цифровая обработка данных со штатных средств мониторинга (токов и напряжений статора) при обрыве одного, двух, трех и четырех стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД.

Постановка задачи: 1) сконструировать магнитопровод и коммутируемую «беличью клетку» ротора взамен магнитопровода заводской конструкции АД с целью свободного изменения количества рабочих стержней; 2) создать условия, при которых возможна работа испытуемого АД в различных эксплуатационных режимах. 3) разработать измерительную систему сбора и обработки данных, позволяющую использовать цифровые и интеллектуальные методы обработки информации; 4) использовать программную среду, способную реализовывать алгоритмы обработки данных в режиме реального времени.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 1) включает в себя: платформу, на которой установлены два АД, соединенных муфтой (один из них выступает в роли электродинамического тормоза для обеспечения режимов нагрузки, другой – испытуемый АД с возможностью искусственно создать повреждения «беличьей клетке»); комплект датчиков токов и напряжений; промышленный ПК с платой для сбора данных и программным обеспечением.

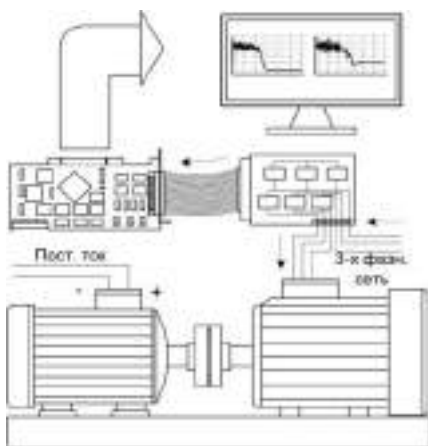


Рис. 1 – Схема лабораторной установки

Для решения поставленных задач на базе ротора АД было решено создать магнитопровод из анизотропной электротехнической стали (рис. 2), аналогичный по габаритам и числу стержней заводскому. Информационные



Рис. 2 – Ротор АД с оборванным стержнем

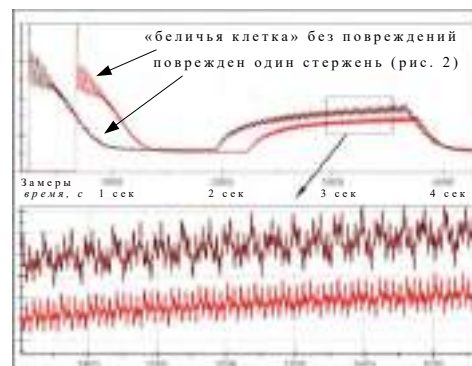


Рис. 3 – Обобщающий вектор токов статора

сигналы токов, потребляемых двигателем, были получены датчиками, настроенными в режим аналогового ввода NRSE, переданы и обработаны в аналого-цифровом преобразователе, использующем системный контроллер тактирования DAQ-STC, PCI 6024E от компании National Instruments (NI). Частота дискретизации при проведении экспериментов составляет 10 kHz.

На подготовленном для исследований ПК с установленным и настроенным программным пакетом от NI получаемый сигнал проходит через набор команд, прописываемых в среде LabVIEW.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Поток данных формируется в текстовую таблицу, читаемую MS Excel и другими редакторами. Например, на рис. 3 показаны осциллограммы обобщающего вектора тока для целого и поврежденного ротора.

## IV. ВЫВОДЫ

В ходе работы была построена экспериментальная установка, на которой можно моделировать нагрузку при работе АД и получать высокодискретные и точные информационные сигналы.

## Список литературы

- [1] Глазырина Т.А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2012. 120 с.
- [2] Скоробогатов А.А. Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций: дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, 2006. 155 с.
- [3] Баннов Д.М., Мальшев С.В. Совершенствование метода диагностирования повреждений обмотки ротора асинхронных двигателей // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: матер. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017. С. 82–85.

# ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ РАСТВОРИТЕЛЯ НА РАЗДЕЛЕНИЕ ФУРАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ МЕТОДОМ ТОНКОСЛОЙНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Бу Нгок Зан, Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
sneg987@mail.ru

## Аннотация:

**Состояние вопроса:** В настоящее время для оценки технического состояния маслonaполненного электрооборудования широко применяются хроматографические методы контроля. К одним из наиболее простых и доступных методов оценки остаточного ресурса твёрдой изоляции силовых трансформаторов относится тонкослойная хроматография, которая позволяет определять концентрацию фурановых соединений, образующихся в результате термической и гидролитической деструкции бумажной изоляции, которые мигрируют в трансформаторное масло и ухудшают его диэлектрические характеристики. При контроле фурановых соединений методом тонкослойной хроматографии большое значение имеет выбор оптимального по селективности растворителя, так как от его природы зависит последовательность элюирования компонентов фурановых соединений и в конечном итоге их качество разделения. Поэтому выбор оптимальных по селективности растворителей является достаточно важной проблемой, решение которой позволит оптимизировать процесс контроля за содержанием фурановых соединений в трансформаторном масле и более качественно провести диагностику развивающихся в электрооборудовании дефектов.

**Материалы и методы:** В работе использовали метод оценки остаточного ресурса твёрдой изоляции по наличию фурановых соединений с использованием тонкослойных пластинок «Sorbfil» с силикагелем, обработанным люминофором в области ультрафиолетового поглощения 245 нм. В качестве растворителей и экстрагентов использовали органические вещества различной химической природы с характеризующимися отличающимися по полярности свойствами. Для проведения экспериментов использовали методы восходящей тонкослойной хроматографии, а также применяли сорбционные трубки, заполненные различными по природе адсорбентами.

**Результаты:** Проведена оценка селективных характеристик органических растворителей по отношению к разделению фурановых соединений в трансформаторном масле методом восходящей и радиальной тонкослойной хроматографии. Определены величины факторов удерживания фурановых производных на тонкослойных пластинках с силикагелем. Для визуализации пятен использовали ацетоуксусный анилин. Установлена функциональная зависимость коэффициента подвижности различных по природе растворителей для фурановых производных от концентрации модифицирующих компонентов и рассчитан коэффициент селективности. Показано, что на тонкослойных пластинках с силикагелем наблюдается линейная зависимость диаметра пятна фурановых производных от их концентрации.

**Выводы:** На основе проведённых исследований найдены закономерности удерживания фурановых производных в трансформаторном масле с использованием различных по природе растворителей. Проведена оптимизация процесса разделения фурановых соединений и найдены оптимальные соотношения растворителя с модификатором, при которых наблюдается наиболее селективное разделение фурфурола, оксиметилфурфурола и фурфурилового спирта.

**Ключевые слова:** тонкослойная хроматография, фурановые соединения, трансформаторное масло, силикагель, бумажная изоляция, органический растворитель, полярность растворитель, элюирование, гексан.

## INFLUENCE OF THE SOLVENT NATURE ON THE SEPARATION OF FURAL COMPOUNDS IN TRANSFORMER OIL BY THE METHOD OF THIN-LAYER CHROMATOGRAPHY

Vu Ngoc Dan, Yu. Snigireva, V. Novikov  
Kazan state power engineering university  
Kazan, Russian Federation  
sneg987@mail.ru

## Abstract

**Background:** Chromatographic methods of control are widely used to assess the technical condition of oil-filled electrical equipment. One of the simplest and most accessible methods for estimating the residual life of solid insulation in power transformers is thin-layer chromatography, which allows one to determine the concentration of furan compounds formed as a result of thermal and hydrolytic degradation of paper insulation that migrate into transformer oil and spoil its dielectric characteristics.



Monitoring furan compounds by thin layer chromatography, it is very important to select such solvent that would be selectivity optimal, since the sequence of elution of components of furan compounds and, ultimately, their separation quality, depends on its nature. Therefore, the choice of the solvent that is optimal in its selectivity is very important task, that will allow to optimize the process of monitoring concentration of furan compounds in the transformer oil and to detect the developing defects in electrical equipment.

**Materials and methods:** The method of estimating the residual life of solid insulation by the presence of furan compounds using thin-layer "Sorbfil" plates with silica gel treated with a luminophore in the range of ultraviolet absorption of 245 nm was used in the work. Solvents and extractants were used possess different chemical nature featured by the strong difference in their properties. Sorption tubes filled with various adsorbents were used in ascending thin-layer chromatography method.

**Results:** Evaluation of the selective characteristics of organic solvents with respect to the separation of furan compounds in a transformer oil by the method of ascending and radial thin layer chromatography was carried out. Determination of the retention factors of furan derivatives on thin-layered plates with silica gel. Acetoacetic aniline was used to visualize the spots. The functional dependence of the mobility coefficient of various solvents for furan derivatives on the concentration of modifying components was determined and the selectivity coefficient was calculated. It is shown that a linear dependence of the spot diameter of furan derivatives on their concentration is observed on thin-layered plates with silica gel.

**Conclusions:** The regularities of the retention of furan derivatives in a transformer oil were found using various solvents. Separation of furan compounds was optimized, and optimal ratios of the solvent with the modifier were found in which the most selective separation of furfural, hydroxymethylfurfural and furfuryl alcohol was observed.

**Key words:** thin layer chromatography, furan compound, transformer oil, silica gel, paper insulation, organic solvent, elution, hexane.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, минеральное трансформаторное масло состоит из парафиновых, ароматических и нафтеновых углеводородов с примесями кислородных, сернистых и азотсодержащих веществ [1]. Трансформаторное масло обычно заливается в силовые трансформаторы, которые являются наиболее уязвимыми с точки зрения технических повреждений. Результатом этих повреждений является длительный простой энергетических блоков. Это приводит к значительным экономическим убыткам за счёт восстановительных работ и недопоставки электроэнергии потребителям [2]. Для изготовления диэлектрических материалов силового маслонаполненного электрооборудования с бумажно-масляной системой изоляции наиболее широкое применение находят специальные электротехнические сорта картона, бумаги и древесно-слоистого пластика [3]. Наиболее ответственные элементы конструкции силового маслонаполненного электрооборудования производятся из электротехнических сортов древесно-слоистого пластика на основе утолщённого букового шпона. Для производства этих электроизоляционных материалов применяют чистые волокна небелёной сульфатцеллюлозы хвойных пород деревьев. При возникновении в трансформаторном оборудовании сильных электрических полей или термических аномалий твёрдая изоляция частично разрушается, образуются продукты деструкции, которые используют для контроля степени повреждения силовых трансформаторов [4].

К продуктам деструкции бумажной изоляции относятся фурановые соединения, которые в изоляционных маслах определяются методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [5], газовой хроматографией [6], а также с использованием тонкослойной хроматографии [7].

Фурановые соединения обычно образуются в результате деструкций бумажной изоляции под действием высокой температуры и влаги. В результате этих процессов происходит гидролиз целлюлозы бумажной изоляции силовых трансформаторов с образованием молекул глюкозы. При повышенной температуре происходит кислотный катализ, в процессе которого образуются муравьиная

и уксусная кислота, а также низкомолекулярные спирты, к которым относятся метанол и этанол. Образующиеся моносахариды подвергаются дегидратации, в результате чего образуются более 30 фурановых производных, являющихся продуктами гидролиза целлюлозы. Из образовавшихся фурановых соединений наиболее высокую концентрацию имеют фурфурол, метилфурфурол, ацетилфуран и фурфуроловый спирт, которые мигрируют в трансформаторное масло и определяются хроматографическими методами.

Для извлечения фурановых производных из образцов трансформаторного масла проводят их экстракцию различными по физико-химической природе органическими растворителями. Наиболее часто используют гексан, насыщенный ацетонитрилом. С этой целью в делительную воронку заливали определённый объём трансформаторного масла, добавляли гексан. Образовавшиеся экстракты фурановых соединений отделяли от трансформаторного масла в делительной воронке и определяли концентрацию индивидуальных компонентов хроматографическими методами. Предварительную подборку растворителей осуществляли путём анализа трансформаторного масла с использованием радиальной тонкослойной хроматографии на пластинах с силикагелем.

Схема алгоритма определения фурановых производных в трансформаторном масле представлена на рис. 1.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований использовали хроматографическую камеру, в нижнюю часть которой заливали органический растворитель. На тонкослойную пластину «Sorbfil» размером 100×100 мм с помощью микрошприца объёмом 10 мкл. Наносили пробу экстракта трансформаторного масла объёмом 2 мкл. Затем тонкослойную пластинку подсушивали до удаления растворителя, помещали в хроматографическую камеру и проводили процесс разделения с использованием различных по полярности растворителей. Отмечали время элюирования растворителей по длине сорбционного слоя тонкослойной пластинки через каждые 10 мм. После



Рис. 1 – Алгоритм определения фурановых производных в трансформаторном масле

достижения растворителем длины сорбционного слоя 100 мм процесс прекращали, тонкослойную пластинку сушили и помещали в камеру с раствором ацетилаксусного анилина в этаноле для визуализации пятен фурановых соединений. Затем тонкослойные пластинки сушили при температуре 80-100<sup>0</sup>С и проводили идентификацию полученных пятен, а также количественную интерпретацию фурановых соединений. С этой целью были приготовлены стандартные образцы фурановых производных: фурфурола, оксиметилфурфурола и фурфурилового спирта, разделение которых проводили в тех же условиях, что и экстракты трансформаторного масла.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

При элюировании фурановых производных использовали гексан, который относится к неполярным соединениям. Поэтому гексан модифицировали различными по полярности органическими растворителями. В случае использования чистого гексана в качестве элюента в тонкослойной хроматографии фурановых производных разделение их не происходит и они элюируются в виде одного пятна, которое остаётся на стартовой линии тонкослойной пластинки.

Для улучшения элюирующей способности гексана в него в качестве модификатора были добавлены различные органические растворители, в качестве которых были использованы этилацетат, дихлорэтан, пропанол.

С этими растворителями тонкослойную хроматографию можно использовать для контроля остаточного ресурса маслонаполненного электрооборудования. При этом в энергетических предприятиях имеется рабочий документ,

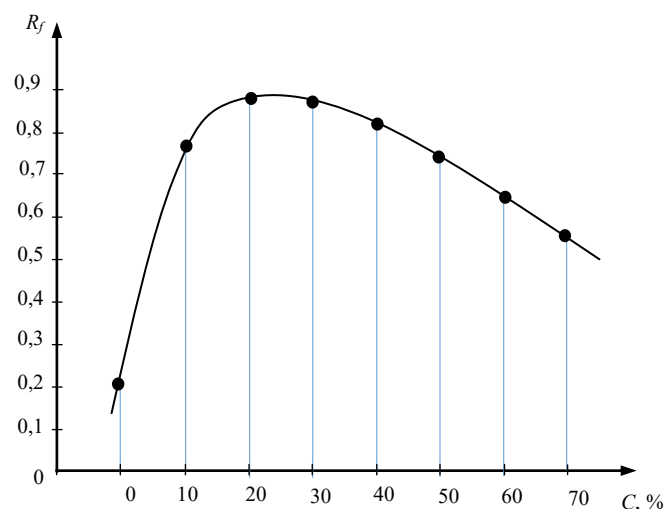
который регламентирует применение в энергетических системах тонкослойной хроматографии [7]. Разработан нормоконкомплект технологического оборудования и расходных материалов для контроля в трансформаторном масле фурановых соединений.

Комплексную интерпретацию полученных результатов осуществляли путём сравнения образующихся хроматографических полос с пятнами, полученными для эталонных соединений. Наряду с определенными достоинствами методика контроля фурановых соединений в трансформаторном масле имеет и ряд существенных недостатков. Так, значительное время занимает процесс пробоподготовки трансформаторного масла, наличие большого количества расходных материалов, а также продолжительность времени анализа, которая определяется влиянием природы используемых адсорбентов, нанесённого на тонкослойную пластинку, его фракционный состав, полярность подвижной фазы, её вязкостные характеристики, а также температурные условия процесса разделения компонентов.

В таблице приведены значения величины подвижности растворителей  $R_f$  в зависимости от содержания этилацетата в гексане.

Как видно из таблицы на чистом гексане не разделяются фурфурол и фурфуриловый спирт. Разделение этой пары отсутствует также при соотношении гексан – этилацетат 40:60 %. Наиболее оптимальное разделение наблюдается при соотношении гексан – этилацетат 50:50 %.

Это, очевидно, связано с тем, что фурановые производные характеризуются различными значениями физико-химических свойств. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента хроматографической подвижности оксиметилфурфурола на тонкослойной пластинке с силикагелем от концентрации этанола в гексане.



Влияние содержания этилацетата в гексане на подвижность растворителей  $R_f$

Компоненты	Температура, °С	Гексан	Соотношение гексан–этилацетат				
			80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
Фурфурол	161,7	0	0,06	0,23	0,44	0,59	0,77
Оксиметилфурфурол	114,0 ... 116,0	0,17	0,73	0,85	0,88	0,89	0,91
Фурфуриловый спирт	170,0	0	0,20	0,38	0,53	0,69	0,77

Рис. 2 – Гексан–этанол

Как видно из рис. 2 оптимальное значение коэффициента хроматографически подвижного  $R_f$  находится в интервале от 20 до 30 % содержанию этанола в гексане.

Все фурановые производные своей структуре имеют атом кислорода и поэтому обладают способностью к образованию межмолекулярной водородной связи, что в условиях тонкослойной хроматографии приводит к достаточно сильному удерживанию адсорбентом анализируемых веществ на тонкослойных пластинках в восходящем варианте.

В качестве адсорбента в восходящем варианте тонкослойной хроматографии использовали силикагель, который представляет собой высушенный гель ангидрида кремниевой кислоты  $\text{SiO}_2$ . Удельная поверхность силикагеля составляет от 30 до 600  $\text{м}^2/\text{г}$ , диаметр пор от 0,01 до 0,002 м. На поверхности силикагеля также присутствуют гидроксильные группы, которые способны вступать в межмолекулярные взаимодействия различной физико-химической природы. Такие взаимодействия приводят к высокой сорбционной способности силикагеля по отношению к полярным органическим растворителям.

## Список литературы

- [1] Крейн С.Э., Кулакова Р.В. Нефтяные изоляционные масла. М.; Л., 1959. 144 с.
- [2] Yokenbah E., Borsi H. Condition and diagnosis of power transformers // International conference on condition monitoring and diagnostic. 2008. P. 21–24.
- [3] Колбасов В.Ф., Савельев С.Ю., Хентшель Й. Электроизоляционные материалы и компоненты силовых трансформаторов: справ. руководство. Тольятти: Изд-во ООО «ВТ-Энерго», 201. 64 с.
- [4] Neubert H., Bödrich T., Disselkötter R. Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Trans-former Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics // Excerpt from the proceedings of the 2011 COMSOL conference in Stuttgart. Stuttgart, 2011. 7 p.
- [5] РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом жидкостной хроматографии. М.: ОРГРЭС. 1995. 12 с.
- [6] СТО 56947007-29.180.010.009-2008. Методические указания по определению содержания фурановых производных в трансформаторных маслах методом газовой хроматографии. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.
- [7] РД 34.51.304-94. Методические указания по применению в энергосистемах тонкослойной хроматографии для оценки остаточного ресурса твердой изоляции по наличию фурановых соединений в трансформаторном масле. М.: АО «ВНИИЭ», 1994.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ

Галиев А.А., Соловьева О.В.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
azat.galiev.1995@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Применение сепараторов возможно как в нефтеперерабатывающей отрасли, так и при очистке сточных вод. Главная проблема состоит в эффективности разделения эмульсий типа «вода–нефтепродукты». Планируется изменение конструктивных особенностей сепараторов с помощью численного моделирования для получения очищенных нефтепродуктов.

**Материалы и методы:** Использовалось численное моделирование методом вычислительной гидродинамики (CFD).

**Результаты:** Определен интервал для установки перегородки  $X = 20$  см. Проведен численный расчет в трубе с прямыми перегородками вертикального и горизонтального положения. Выявлен угол наклона перегородки  $\alpha = 65^\circ$  для повышения эффективности разделения.

**Выводы:** Проведено исследование конструкции сепаратора для эффективного разделения эмульсий типа «вода–нефтепродукты». Построена численная модель трубки для определения эффективности прямых и наклонных перегородок в сепараторе. Найдено наиболее оптимальное расстояние установки перегородки и выявлен угол наклона перегородок.

**Ключевые слова:** сепаратор, эмульсия, нефтепродукт, моделирование, труба, эффективность.

## NUMERICAL MODELING OF THE SEPARATOR FOR IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF SEPARATION OF EMULSIONS

A. Galiev, O. Solovyova  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russia  
azat.galiev.1995@mail.ru

## Annotation

**The state of the issue:** The application of these devices is possible, both in the oil refining industry and in the treatment of wastewater. The main problem is the efficiency of separation of emulsions such as water-oil products. It is planned to change the design features using numerical simulation to produce refined petroleum products.

**Materials and methods:** Numerical simulation by computational fluid dynamics (CFD) was used.

**Results:** The interval for the installation of the partition  $X = 20$  cm was determined. A numerical calculation was made in a pipe with straight partitions of vertical and horizontal position. The baffle angle was determined to increase the separation efficiency  $\alpha = 65^\circ$ .

**Conclusions:** The analysis of the separator constructions for effective separation of emulsions, such as water-oil products, has been carried out. A numerical model is constructed to determine the efficiency and inclined partitions in the separator. The most optimal distance from the septum was found and the angle of the septum was revealed.

**Key words:** separator, emulsion, oil product, modeling, pipe, efficiency.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей для нефтедобывающей отрасли является исследование процессов, связанных с очисткой и отделением нефти от воды, которые, в свою очередь, являются очень затратными по времени и расходу электроэнергии. Одним из решений этой проблемы может служить использование гравитационно-динамических сепараторов (ГДС). Это один из наиболее эффективных способов разделения неустойчивых эмульсий, образуемых двумя несмешивающимися жидкостями.

Гравитационно-динамический сепаратор – это устройство, которое является технологически-инновационной разработкой, обладающей преимуществами в скорости и качестве разделения неустойчивых смесей в сравнении с другими устройствами. Установка представляет собой емкость, внутри которой имеются различные элементы (перегородки), обеспечивающие наиболее оптимальное разделение двух фаз [1, 2].

Установлено, что данный тип сепараторов может иметь широкие рынки сбыта как в качестве самостоятельного оборудования, так и в сочетании с другими типами оборудования для тонкой очистки и разделения до норм, установленных в РФ и Европе для воды, сбрасываемой в канализационную сеть, а при необходимости и до более высоких кондиций [3].

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для определения влияния конструктивных элементов на разделение эмульсий была построена геометрия расчетной области с некоторыми граничными условиями, задаваемыми в программе (рис. 1): 1 – “wall” – стенка; 2 – “velocity-inlet” – задание скорости на входе ( $v = 0,01 \text{ м/с} = 1 \text{ см/с}$ ); 3 – “outflow” – свободный выход.

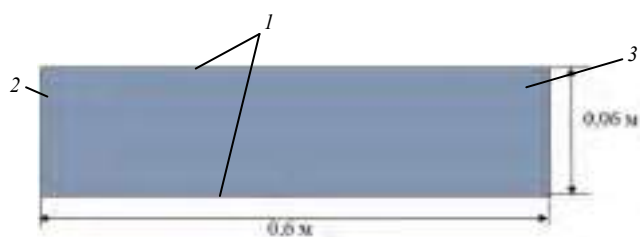


Рис. 1 – Схема расчетной области

Значение скорости  $v = 1 \text{ см/с}$  было выбрано в соответствии с оптимальной для расчета длиной трубы, так как ее увеличение приводит к увеличению размеров, что, в свою очередь, ведет к увеличению расчетного времени, а при меньшей скорости потока эмульсия разделится самостоятельно за счет гравитации.

Для расчета использовалась эмульсия типа «вода-нефтепродукты» со следующими физическими параметрами:

- вода (water-liquid):  
плотность воды  $\rho_w = 998,2 \text{ кг/м}^3$ ;  
динамическая вязкость воды  $\mu_w = 1003 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ ;
- нефтепродукт (fuel-oil):  
плотность нефти  $\rho_f = 960 \text{ кг/м}^3$ ;  
динамическая вязкость нефти  $\mu_f = 0,048 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ .

## III. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Была проведена серия расчетных исследований для определения допустимого сеточного разбиения. Мы определили оптимальный вариант сеточного разбиения, который составил 40 000 ячеек.

Содержание воды в эмульсии вода-нефтепродукты составляет 50 %, нефти – 50 %.

Расчет является нестационарным:

- шаг по времени – 0,001;
- шаг по пространству – 20;
- количество итераций – 6000;

- число Куранта в расчете варьировалось от 0,17 до 0,79;
- расчетное время соответствует реальному – 60 с.

В результате проведенного эксперимента был выявлен наиболее эффективный вариант расположения перегородки в трубе ( $x_0 = 0,1 \text{ м}$ ) при заданном расходе и плотностях сред, при которых наблюдается резкое успокоение потока (рис. 2, а).

Определен угол  $\alpha = 65^\circ$ , на котором при данной скорости происходит эффективное разделение потока (рис. 2, б).

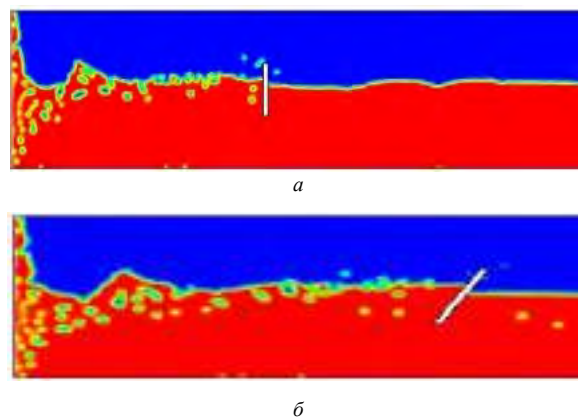


Рис. 2 – Объемная концентрация воды в трубе  $x_0 = 0,1 \text{ м}$ : а –  $\alpha = 90^\circ$ ;  
б –  $\alpha = 65^\circ$

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа обзора существующих сепарационных установок разработана конструкция гравитационно-динамического сепаратора, обладающая высокой эффективностью разделения эмульсий, являющаяся простой и не энергозатратной.

Проведены параметрические расчеты течения эмульсии в трубе для определения оптимального положения пластины – успокоителя потока; выявлен наиболее эффективный вариант расположения перегородки в трубе ( $x_0 = 0,1 \text{ м}$ ) при заданном расходе и плотностях сред, при котором наблюдается резкое успокоение потока, также определен угол наклона перегородки равный  $65^\circ$ .

### Список литературы

- [1] Способ разделения неустойчивых эмульсий и устройство для его осуществления (варианты): пат. 2013106536 Рос. Федерация № 2013106536/05; заявл. 14.02.13; опубл. 20.08.14, Бюл. № 23.
- [2] Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. М.: Высшая школа, 1964.
- [3] Arntzen R., Andresen P.A.K. Three-Phase Well-stream Gravity Separation, In Johan Sjöblom, editor, Emulsion encyclopedia. New York, USA: Marcel Dekker inc., 2001.
- [4] Hansen E.W.M., Rørtveit G.J. Numerical simulation of fluid mechanisms and separation behavior in offshore gravity separators, ser. Emulsions and Emulsion Stability: Surfactant Science Series/61. Trondheim, Norway: CRC Press, 2006.

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АКУСТИКО-РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Ибадов А.А.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
sogaponenko@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** К современным методам контроля местоположения заглубленных трубопроводов относятся: магнитометрический, радиационный, радиоволновый и электромагнитный методы, инфракрасная термография, акустическая локация и резонансно-акустическое профилирование. Перечисленные методы имеют ряд недостатков, связанных с ограничением области применения, т. е. они не применимы к трубопроводам из неметаллических материалов, а также обладают слабой избирательностью контроля местоположения заглубленных трубопроводов, когда в непосредственной близости с контролируемым объектом проходит множество металлических инженерных коммуникаций и различных трасс – кабели связи, силовые кабели, трубы тепло-, водо- и газоснабжения. Метод акустической локации применим к контролю местоположения трубопроводов из неметаллических материалов, но имеет ряд недостатков, связанных с трудностью проведения поисковых работ.

**Материалы и методы:** При выполнении работы применялись вероятностно-статистические методы математической обработки и метод конечноэлементного анализа.

**Результаты:** Результаты теоретических исследований подтверждены и дополнены результатами экспериментальных исследований, проведенных на специально разработанном информационно-измерительном комплексе для контроля местоположения заглубленных трубопроводов в лабораторных и полевых условиях.

**Выводы:** Разработан информационно-измерительный комплекс на основе усовершенствованного акустико-резонансного метода контроля местоположения заглубленных трубопроводов, выполненных из различных металлических и неметаллических материалов. Проведенные экспериментальные исследования согласуются с теоретическими в пределах погрешности экспериментов. Предлагаемый метод обеспечивает высокую достоверность контроля местоположения заглубленных трубопроводов различных диаметров, длин и материалов. Экспериментально установлено, что различный тип грунта, материал и длина исследуемых трубопроводов не влияют на резонансные частоты колебаний. Установлено методом моделирования и экспериментальными исследованиями, что область частот 100–1100 Гц является наиболее информативной для трубопроводов с диаметром от 40 до 1000 мм. Основная гармоника зависит от диаметра трубопровода.

**Ключевые слова:** трубопровод, виброакустический сигнал, резонансная частота, полезный сигнал, спектр, полый объект, гармонический анализ, вынужденные гармонические колебания, метод суперпозиций мод, ANSYS, LabVIEW.

## IMPROVEMENT OF ACOUSTIC-RESONANCE METHOD AND DEVELOPMENT OF INFORMATION AND MEASURING COMPLEX OF LOCATION OF LOCATION OF PIPELINES

S. Gaponenko, A. Kondratiev, A. Ibadov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
sogaponenko@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The modern control methods location of buried pipelines include: magnetic method, infrared thermography, radiation method, the radio wave method, electromagnetic method, acoustic location, the resonance-acoustic profiling. These methods have several disadvantages related to the limited in scope, i.e. they are not applicable to ducts of non-metallic materials, and have weak selectivity control location of buried pipelines, when in proximity with the controlled object undergoes a lot of metal engineering communications and a variety of runs – communication cables, power cables, pipe heating, water and gas supply. Acoustic location method is applicable to control the location of pipelines from non-metallic materials, but has a number of disadvantages associated with the difficulty of carrying out search works.

**Materials and methods:** Probabilistic and statistical methods of mathematical processing and finite element analysis were used in the work.

**Results:** The results of theoretical studies are confirmed and supplemented by the results of experimental studies carried out on a specially designed information and measurement system for monitoring the location of buried pipelines in the laboratory and field conditions.

**Conclusions:** Information and measuring complex is developed on the basis of an improved acoustic resonance method for monitoring the location of buried pipelines made of various metallic and nonmetallic materials. The experimental studies carried out are consistent with the theoretical ones within the experimental error. The proposed method provides high reliability of monitoring the location of buried pipelines of various diameters, lengths and materials. It has been experimentally established that the different soil type, material and length of the pipelines under investigation do not affect the resonance frequencies of the oscillations. It is established by the method of simulation and experimental studies that the frequency range 100–1100 Hz is the most informative for pipelines with a diameter of 40 to 1000 mm. The fundamental harmonic depends on the diameter of the pipeline.

**Key words:** pipeline, vibro-acoustic signal, resonant frequency, useful signal, spectrum, hollow object, harmonic analysis, forced harmonic oscillations, superposition mode, ANSYS, LabVIEW.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Известен комплексный метод обнаружения неметаллических трубопроводов (полимерно-армированных труб) и повреждений на них [25], заключающийся в генерировании звуковых колебаний в трубопроводе, вызывающих механические колебания металлической арматуры трубы в магнитном поле Земли. Измеряют электрическую  $E$  и магнитную  $H$  составляющие возникающего электромагнитного излучения, температуру грунта и уровень шумов, издаваемых средой, транспортируемой по трубе.

Недостатком данного метода является сложность определения расположения трубопроводов, связанная с наличием множества контролируемых параметров, а также невозможность поиска металлических трубопроводов.

Задачей предлагаемого изобретения является создание простого способа, обеспечивающего высокую достоверность и избирательность определения расположения как неметаллических, так и металлических трубопроводов.

Усовершенствованный акустико-резонансный метод [14] заключается в генерации резонансных звуковых колебаний в полости искомого объекта, при этом оконтуривание этого объекта осуществляется путем перемещения чувствительного элемента (микрофона или пьезоэлектрического датчика) над зоной поиска.

Предлагаемый метод позволяет упростить контроль местоположения заглубленных трубопроводов в связи с тем, что возбуждается резонансная частота искомого объекта повышается избирательность контроля. Метод также обеспечивает высокую достоверность контроля местоположения заглубленных как неметаллических, так и металлических трубопроводов [1–22].

## II. УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Заявленные модели [15, 16] осуществляют контроль местоположения заглубленных трубопроводов, выполненных из различных материалов, путем регистрации чувствительными элементами звуковых сигналов от течи или импульсных волн, которые создаются дополнительно подключаемым к трубопроводу генератором.

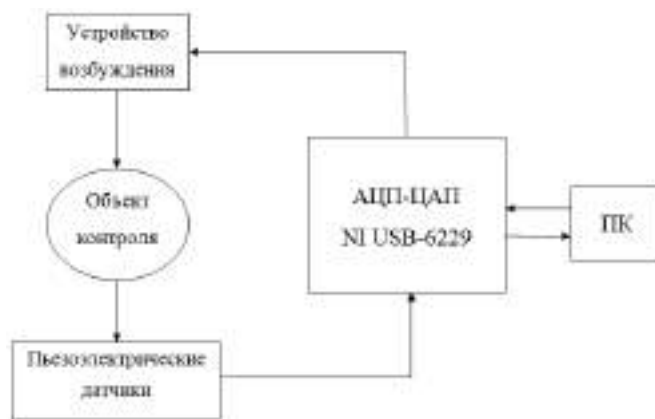


Рис. 1 – Структурная схема экспериментальной установки

Таким образом, данное решение позволяет упростить процесс контроля местоположения заглубленных трубопроводов и мест утечек уменьшением количества сканирующих операций, а также обеспечить достоверное обнаружение трубопроводов различных диаметров и материалов [1–25].

Для тестирования предлагаемого метода контроля местоположения был создан информационно-измерительный комплекс, который состоит из экспериментальной установки и программного обеспечения.

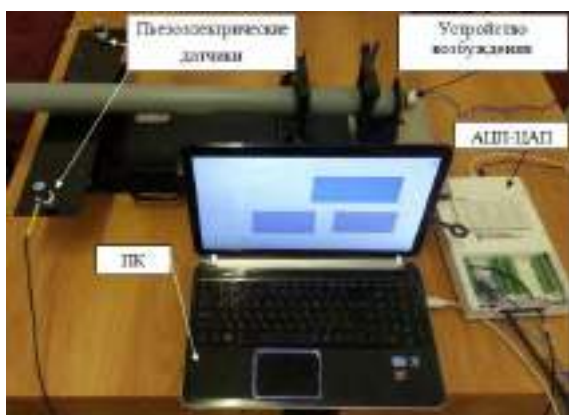
Структурная схема установки для контроля местоположения заглубленных трубопроводов представлена на рис. 1 [1–25] и включает в себя устройство возбуждения (акустический излучатель), пьезоэлектрические датчики, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи (АЦП и ЦАП), персональный компьютер (ПК). На акустический излучатель подается гармонический сигнал качающейся частоты в диапазоне от 100 до 4000 Гц. С ЦАП производится преобразование выходного сигнала ПК в аналоговую форму. Для приема виброакустического сигнала в системе применяются пьезоэлектрические датчики марки KD-35. Принимаемый сигнал пьезоэлектрическим датчиком, конвертируется в цифровой код из аналогового сигнала в АЦП и анализируется в ПК [1–22]. Внешний вид установки представлен на рис. 2, а.

В среде LabVIEW был создан программный комплекс для контроля местоположения скрытых полых объектов по их резонансной частоте [1–24], который предназначен для контроля местоположения заглубленных трубопроводов различных диаметров и материалов по их резонансной частоте.

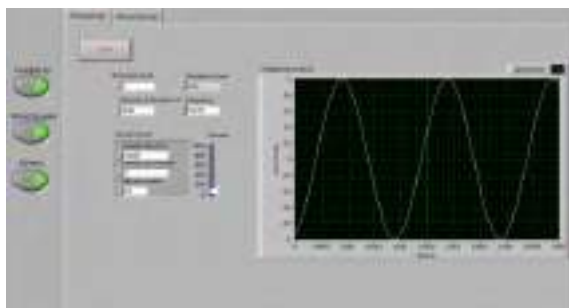
Внешний вид вкладки «Генератор» представлен на рис. 2, б, а вкладки «Регистратор» – на рис. 2, в.

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

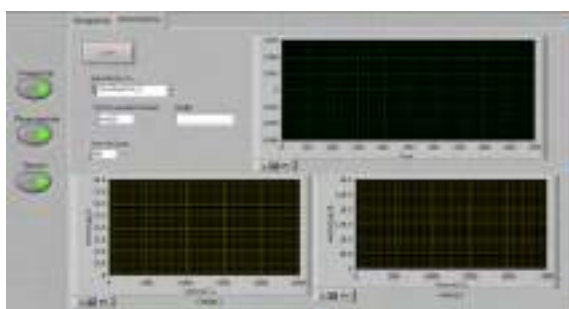
- выбор и генерацию резонансной частоты в полости скрытого полого объекта (исследуемого трубопровода);
- поиск и прием генерируемого сигнала чувствительными элементами (пьезоэлектрическими датчиками) над зоной поиска;
- преобразование принятого сигнала в спектр в реальном времени и сохранение в формате .txt на персональный компьютер.



а



б



в

Рис. 2 – Внешний вид установки (а), вкладок «Генератор» (б) и «Регистратор» (в)

Оценка погрешности информационно-измерительного комплекса проводилась вероятностно-статистическим методом по ГОСТ Р 8.736-2011, предусматривающим определение погрешности по характеристикам законов распределения погрешностей средств измерений, входящих в состав комплекса [1–24].

Для разработанного комплекса абсолютная погрешность составила  $\pm 0,0139$  В при доверительной вероятности 0,95 при средних значениях амплитуды колебания 0,298 В.

Результаты, полученные с помощью данной экспериментальной установки и программного комплекса, имеют высокую достоверность. Лабораторные исследования проводились без учета грунта.

### III. Выводы

1. Разработан и реализован в виде информационно-измерительного комплекса усовершенствованный акустико-резонансный метод контроля местоположения заглубленных трубопроводов, состоящий из устройств возбуждения и приема вынужденных колебаний [1].
2. Разработано и создано алгоритмическое и программно-техническое обеспечение процессов управления информационно-измерительным комплексом и обработки виброакустических сигналов в среде LabVIEW [1].
3. Для отработки предлагаемого метода и программного обеспечения была создана лабораторная установка для контроля местоположения заглубленных трубопроводов, выполненных из различных материалов и проведены лабораторные испытания [1].
4. Разработанная методика контроля местоположения заглубленных трубопроводов с применением усовершенствованного акустико-резонансного метода и метода конечноэлементного моделирования и информационно-измерительный комплекс апробированы в натурных полевых испытаниях в ООО «Научно-технический центр «ГЕОКОМ», что подтверждено соответствующими актом реализации научных исследований [1].

### Список литературы

- [1] Гапоненко С.О. Акустико-резонансный информационно-измерительный комплекс и методика контроля местоположения заглубленных трубопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 22 с.
- [2] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Модельная установка для разработки способа определения местоположения скрытых трубопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 123–129.
- [3] Гапоненко С.О. Варианты регистрации и анализа полезного виброакустического сигнала в программном продукте LabVIEW // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2014. № 5(44). С. 8–15.
- [4] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Перспективные методы и методики поиска скрытых каналов, полостей и трубопроводов виброакустическим методом // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2015. № 2(47). С. 9–13.
- [5] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Измерительно-диагностический комплекс для определения расположения скрытых трубопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 3-4. С. 138–141.



- [6] Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretdinov A.R. Low-frequency vibro-acoustic method of determination of the location of the hidden canals and pipelines // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 2321–2326.
- [7] Nazarychev S.A., Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control // *Helix*. 2018. Vol. 8(1). P. 2481–2487.
- [8] Гапоненко С.О., Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е. Методика определения трассировки скрытых трубопроводов // *Научному прогрессу – творчество молодых*. 2016. № 2-4. С. 163–165.
- [9] Бударина О.А., Гапоненко С.О. Устройство для определения скрытых полостей // *Научному прогрессу – творчество молодых*. С. 162–163.
- [10] Нагоркин А.Е., Гапоненко С.О., Загретдинов А.Р. Алгоритм обработки и анализа виброакустических сигналов // *Научному прогрессу – творчество молодых*. С. 221–223.
- [11] Гапоненко С.О., Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е. Виброакустический метод контроля скрытых полых объектов // *Научному прогрессу – творчество молодых*. 2015. С. 234–235.
- [12] Бударина О.А., Гапоненко С.О. Диагностика трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // *Научному прогрессу – творчество молодых*. С. 232–233.
- [13] Установка для калибровки пьезоэлектрических датчиков / С.О. Гапоненко [и др.] // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2016. № 7-8. С. 79–86.
- [14] Способ определения расположения трубопровода: пат. 2482515 Рос. Федерация № 2011151380/28; заявл. 15.12.11; опубл. 20.05.13, Бюл. № 14. 6 с.
- [15] Устройство для определения расположения трубопроводов и поиска мест утечек рабочей среды: п. м. 120784 Рос. Федерация № 2012115909/28; заявл. 19.04.12; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27. 2 с.
- [16] Устройство для определения расположения трубопроводов и поиска мест утечек рабочей среды: п. м. 120785 Рос. Федерация № 2012115910/28; заявл. 19.04.12; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27. 2 с.
- [17] Устройство для определения трассировки трубопроводов: п. м. 127204 Рос. Федерация № 2012150865/28; заявл. 27.11.12; опубл. 20.04.13, Бюл. № 11. 2 с.
- [18] Установка для исследования эффективности определения расположения трубопроводов: п. м. 145136 Рос. Федерация № 2014106810/28; заявл. 24.02.14; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25. 2 с.
- [19] Установка для исследования эффективности определения расположения трубопроводов: п. м. 145137 Рос. Федерация № 2014106813/28; заявл. 24.02.14; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25. 2 с.
- [20] Устройство для определения скрытых полостей: п. м. 129655 Рос. Федерация № 2013103664/28; заявл. 28.01.13; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18. 2 с.
- [21] Гапоненко С.О. Установка для калибровки прибора низкочастотного виброакустического контроля // *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2016. С. 288–292.*
- [22] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Универсальная методика определения трассировки скрытых трубопроводов // *Тинчуринские чтения: матер. XII Междунар. молод. науч. конф. Казань, 2017. Т. 2. С. 74–76.*
- [23] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика поиска скрытых полых объектов в грунте // *Научному прогрессу – творчество молодых. Поволжский государственный технологический университет*. 2017. № 2-4. С. 115–118.
- [24] Гапоненко С.О. Применение новых методов для обнаружения заглубленных полых объектов. Казань: Изд-во «Фолиант», 2016. С. 570–575.
- [25] Комплексный способ обнаружения неметаллических трубопроводов и повреждений на них: пат. 2328020 Рос. Федерация № 2005131762/28; заявл. 13.10.05; опубл. 20.04.07, Бюл. № 11.
- [26] Программный комплекс для обнаружения полых объектов по их резонансной частоте: свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2013610546 от 09.01.13.
- [27] Программный комплекс для определения расположения полых объектов по их резонансной частоте: свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2012661393 от 13.12.12.

# РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Гура Д.Н., Тучина Д.С., Яловой В.Я., Корольков А.Л.  
ФГАОУ ВО СКФУ, ФГБОУ ВО РГУПС, Филиал АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ  
Пятигорск, Ростов-на-Дону, Россия  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В связи с широким распространением электромобилей актуальным становится вопрос правильного заряда аккумуляторной батареи.

**Материалы и методы:** Было разработано и опробовано зарядное устройство с широтно-импульсной модуляцией.

**Результаты:** Был проведен эксперимент на автомобильных аккумуляторах, имеющих напряжение 12 В.

**Выводы:** Использование разработанного устройства достигается увеличение срока службы аккумуляторов.

**Ключевые слова:** электромобиль, аккумуляторная батарея, зарядка аккумулятора.

## THE SOLUTION TO THE PROBLEM OF CONSERVATION OF CHARGE OF THE BATTERY OF THE ELECTRIC VEHICLE

D. Gura, D. Tuchina, V. Yalovoy, A. Korolkov  
FSAEI HE NCFU, FSAEI HE RSRTU, JSC "SO UPS" North Caucasus RDU  
Pytigorsk, Rostov-on-Don, Russia  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

## Abstract

**Background:** In connection with the widespread use of electric cars is a topical issue right battery.

**Materials and methods:** Was developed and tested charger with pulse width modulation.

**Results:** An experiment was conducted at the automobile batteries have a voltage of 12 Volts.

**Conclusions:** Using the developed device is achieved by the increased battery life.

**Key words:** electric car, battery, battery charging.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аккумуляторы и аккумуляторные батареи (АКБ) широко применяются в различных сферах нашей жизни. Источники питания портативных устройств, стартерные батареи в автотранспорте, источники бесперебойного питания – не полный спектр их применения [1].

Всем известно, что расстояние, которое может преодолеть электромобиль, зависит не от количества бензина в баке, а от процента заряда аккумулятора. АКБ – одна из главных составляющих электромобиля, поэтому сохранение ее неизменной емкости является первоочередной задачей.

### II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА АКБ

Проблема заключается в том, что рабочая емкость всех основных типов и классов аккумуляторов и собранных из них батарей при низких наружных температурах значительно снижается. Это приводит к периодическому проведению восстановительных зарядных циклов, требующих больших временных затрат.

Помимо этого, хронический недозаряд АКБ при отрицательных температурах приводит к необратимой потере рабочей емкости и быстрому выходу аккумуляторов из строя из-за пассивации активных масс электродов у щелочных батарей и сульфатации у кислотных батарей, обусловленных неправильной эксплуатацией [2].

### III. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

1. Зарядка от бытовой сети.
2. Одно- или трехфазная зарядка (используется специальный разъем).
3. Зарядка быстрым током.

### IV. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью сокращения затрат на изготовление для проведения эксперимента выбран компьютерный блок питания, являющийся наиболее важной частью системного блока [3]. На его базе собрано устройство для зарядки АКБ (рис.1). Блок мощностью 300 Вт позволяет нагружать его до 20 А, что хватает с запасом для автомобильного аккумулятора.



Рис. 1 – Устройство для зарядки АКБ

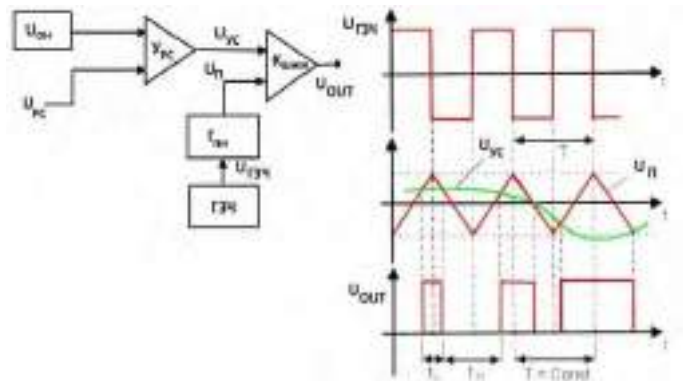


Рис. 2 – Структурная схема ШИМ-контролера и осциллограммы основных сигналов

Учитывая, что зарядка должна происходить при напряжении 13,9–14,4 В, главной доработкой в блоке станет поднятие напряжение на линии 12 В до 14,4 В. Это достигается путем доработки схемы.

Применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – это процесс управления мощностью, подводимой к нагрузке, осуществляемый путём видоизменения скважности импульсов при постоянной частоте.

Существует несколько типов широтно-импульсной модуляции, такие как аналоговый, цифровой, двоичный (двухуровневый), троичный (трехуровневый).

Структурная схема ШИМ-контролера и осциллограммы основных сигналов представлены на рис. 2.

Генератор задающей частоты формирует серию прямоугольных сигналов, частота которых соответствует опорной. На основе этого сигнала формируется сигнал  $U_{\Pi}$  пилообразной формы, поступающий на вход компаратора  $K_{ШИМ}$ . Ко второму входу этого устройства подводится сигнал  $U_{UC}$ , поступающий с регулирующего усилителя. Сформированный этим усилителем сигнал соответствует пропорциональной разности  $U_{\Pi}$  (опорное напряжение) и  $U_{PC}$  (регулирующий сигнал от цепи обратной связи). Т. е. управляющий сигнал  $U_{UC}$  является по сути напряжением рассогласования с уровнем, зависящим как от тока нагрузки, так и напряжения на ней  $U_{OUT}$ .

Данный способ реализации позволяет организовать замкнутую цепь, которая позволяет управлять напряжением на выходе, т. е. с использованием линейно-дискретного функционального узла. На его выходе

формируются импульсы с длительностью, зависящей от разницы между опорным и управляющим сигналом. На его основе создается напряжение для управления ключевым транзистором инвертора.

Процесс стабилизации напряжения на выходе производится путем отслеживания его уровня, при его изменении пропорционально меняется напряжение регулирующего сигнала, что приводит к увеличению или уменьшению длительности между импульсами. Таким образом, последовательно происходит заряд и разряд батареи, уменьшается сульфатация положительных пластин и, как следствие, увеличивается срок службы.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет собой первый этап серии экспериментов, направленных на разработку и опробование зарядного устройства с ШИМ. Она имеет практическое значение для электроэнергетики.

Одним из вариантов увеличения срока службы может быть использование при профилактических работах по обслуживанию аккумуляторов зарядного устройства с ШИМ.

Увеличение срока эксплуатации аккумуляторов позволит сократить финансовые затраты на приобретение новых взамен выработавших свой ресурс.

## Список литературы

- [1] Чупин Д.П. Исследование методов диагностики аккумуляторных батарей // Омский научный вестник. 2013. № 1(117). С. 253–257.
- [2] Кривецкий А.А. Заряд кислотных аккумуляторов // Компоненты и технологии. 2004. № 39. С. 62–64.
- [3] Кучеров Д.П. Источники питания ПК и периферии. СПб.: Наука и Техника, 2005. 429 с.

# АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЗАДАЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ С РАЗБРОСОМ ПАРАМЕТРОВ

Гурьев И.А., Новиков Е.А.  
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
99999-1988@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Для обеспечения равномерного распределения тока между несколькими модулями одной системы, работающей на общую нагрузку, необходима синхронизация устройств, вырабатывающих поступающие на инверторы сигналы. Также существует необходимость в получении выходных импульсов, вырабатываемых задающими генераторами, с требуемыми параметрами. В данной работе проводится анализ выходных характеристик параллельно работающих задающих генераторов на основе мультивибратора на операционном усилителе с фильтрами низких частот и подбор необходимых по номиналу элементов схемы.

**Материалы и методы:** Использовался графоаналитический метод.

**Результаты:** Проведён анализ всевозможных методов включения задающих генераторов на параллельную работу, выявлены достоинства и недостатки этих методов.

**Выводы:** Проанализировав особенности параллельной работы задающих генераторов, был подробно описан и реализован на схеме метод прямой импульсной синхронизации ввиду явного преимущества перед методом фазовой автоподстройки частоты.

**Ключевые слова:** мультивибратор, операционный усилитель, задающий генератор, параллельная работа задающих генераторов.

# ANALYSIS OF METHODS OF PARALLEL OPERATION OF SETTING GENERATORS WITH A VARIATION OF PARAMETERS

I. Guriev, E. Novikov  
Omsk state technical University  
Omsk, Russian Federation  
99999-1988@mail.ru

## Abstract

**Background:** To ensure the uniform distribution of current between several modules of the same system, running on the total load, it is necessary to synchronize the devices that produce the signals coming to the inverters. There is also a need to obtain the output pulses produced by the master oscillators with the required parameters. In this work the analysis of output characteristics of parallel operating generators based on a multivibrator operating amplifier with low-pass filters, and the selection of the required nominal circuit elements.

**Materials and methods:** Used graphic-analytical method.

**Results:** The analysis of all existing methods of parallel operation of master generators, identified advantages and disadvantages of these methods.

**Conclusions:** After analyzing the features of the parallel operation of the driving generators, the method of direct pulse synchronization was described in detail and implemented on the scheme in view of the obvious advantages over the method of phase frequency auto-tuning.

**Key words:** multivibrator, operational amplifier, the master generator, parallel operation of master generators.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается активный рост потребителей электроэнергии переменного тока, в частности: на бортовых носителях, наземных авиационных комплексах и т. д. На смену гидравлическим и пневматическим системам приходят электротехнические комплексы. Вместе с тем из-за постоянно возрастающих требований к качеству

переменного тока возникает необходимость в разработке более мощных систем генерации энергии. Есть два пути решения: разработка более мощных силовых компонентов инверторов либо построение модульных инверторных систем с выходным напряжением и мощностью заданного уровня. У второго способа есть ряд преимуществ перед первым [6].

Так как задающий генератор является обязательной составной частью инвертора, то одним из основополагающих факторов для возможности разработки таких систем является синхронизация параметров напряжения, выходящего с задающих генераторов, таких как фаза, частота и амплитуда. Например, в случае рассогласования выходящих с параллельно работающих инверторов напряжений по амплитуде и фазе возникают активные и реактивные уравнительные токи [2]. Такая же ситуация наблюдается и в задающих генераторах.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Чтобы добиться синхронизации параметров выходного напряжения параллельно работающих задающих генераторов, необходимо проанализировать все существующие методы, выбрать наиболее рациональный и собрать принципиальную схему в программе для разработки и моделирования электронных схем «Multisim 12.0».

## III. АНАЛИЗ

В настоящее время используются два метода синхронизации задающих генераторов [3]:

### 1. Метод фазовой автоподстройки частоты.

Суть метода заключается в изменении частоты в зависимости от знака и значения фазового рассогласования генераторов с плавно перестраиваемой частотой. Недостаток такой системы в том, что в случае поломки «главного» генератора выходит из строя вся система.

### 2. Метод прямой импульсной синхронизации.

В этом случае, для того чтобы частота релаксационной автоколебательной схемы оставалась неизменной, необходимо либо поддерживать замкнутое кольцо синхронизации, либо разомкнутую цепь.

На рис. 1. показаны различные способы связи задающих генераторов. Также в [1] предлагается ещё один способ синхронизации (рис. 2).

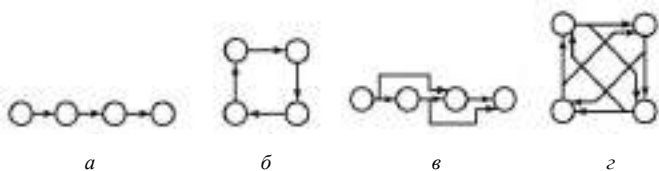


Рис. 1 – Структуры синхронных связей задающих генераторов: а – линейка; б – кольцо (используется в 1-м метода); в – линейка с обходами (используется во 2-м метода); з – кольцо с обходами

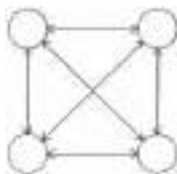


Рис. 2 – Структура синхронных связей задающих генераторов, используемая во 2-м методе

Структура синхронных связей, представленная на рис. 2, имеет ряд преимуществ перед структурами, представленными на рис. 1. Все они описаны в [1]. Поэтому для подбора компонентов схемы будет использоваться модель задающего генератора, представленная на рис. 3.

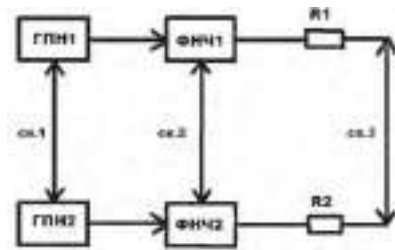


Рис. 3 – Модель задающего генератора: ГПН1 и ГПН2 – генераторы пилообразных напряжений; ФНЧ1 и ФНЧ2 – фильтры низких частот

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

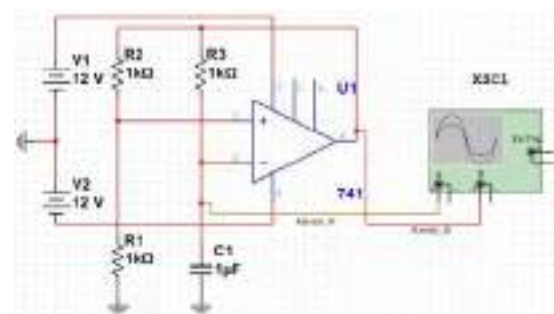
Эксперименты проводятся в программе для разработки и моделирования электронных схем «Multisim 12.0» [4]. Релаксационный генератор является источником пилообразных напряжений, схема и выходные характеристики которого представлены на рис. 4. В схеме используется операционный усилитель 741. Параметры работы таких компонентов подробно описаны в [5].

Добавив к схеме активный фильтр низких частот (рис. 5, а), получаем на осциллограмме синусоиду (рис. 5, б).

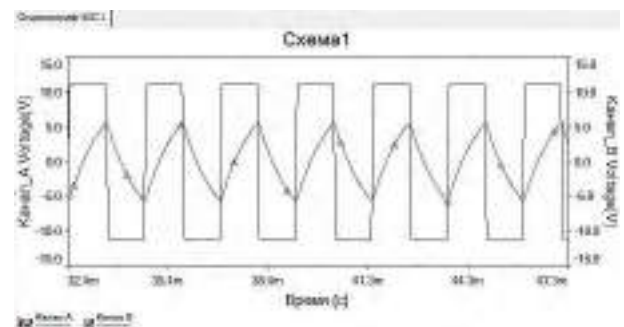
Далее обратим внимание на параллельную работу двух задающих генераторов, изменив характеристики некоторых компонентов одного из них (рис. 6).

После ввода двух компенсирующих связей между задающими генераторами сначала поочередно (рис. 7, а, б), а затем одновременно (рис. 7, в), напряжение на выходе получается равновесным по всем параметрам.

И наконец, проанализировав ещё одну схему, состоящую из трёх задающих генераторов с различными параметрами R- и C-компонентов, работающими на разную нагрузку, на четырёхканальном осциллографе можно заметить совпадение их выходных напряжений (рис. 8).

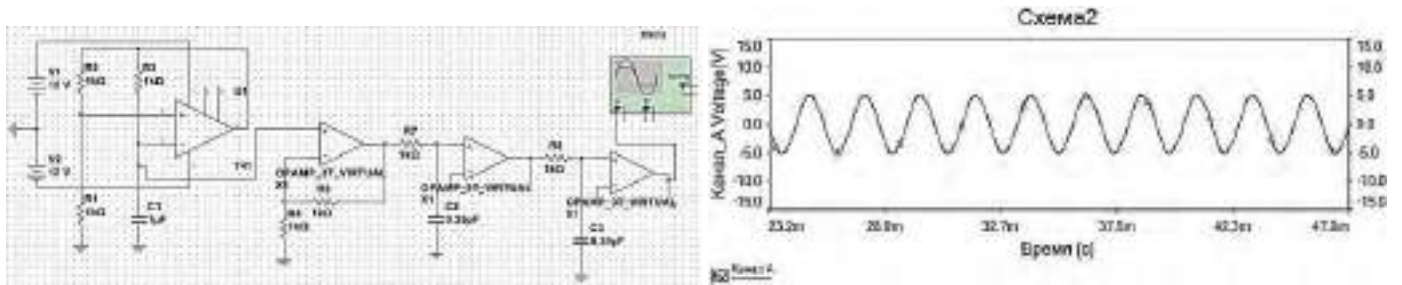


а



б

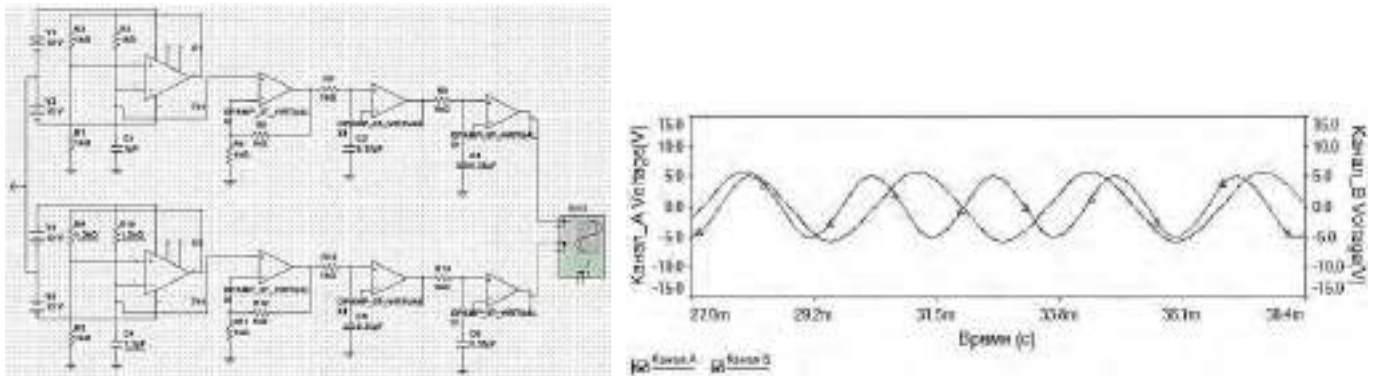
Рис. 4 – Модель релаксационного генератора (а) и показания (б), снятые с осциллографа (каналы А и В)



а

б

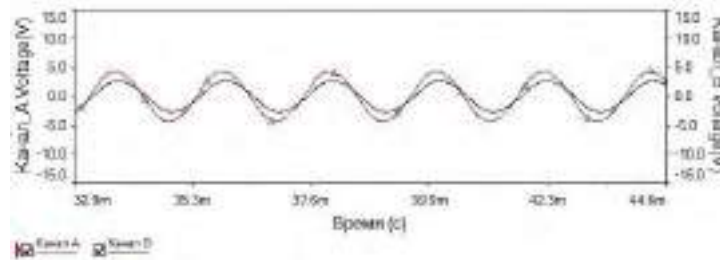
Рис. 5 – Схема (а) и показания напряжения на выходе с фильтра низких частот (б)



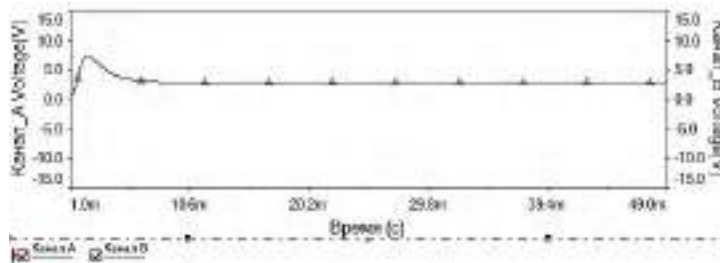
а

б

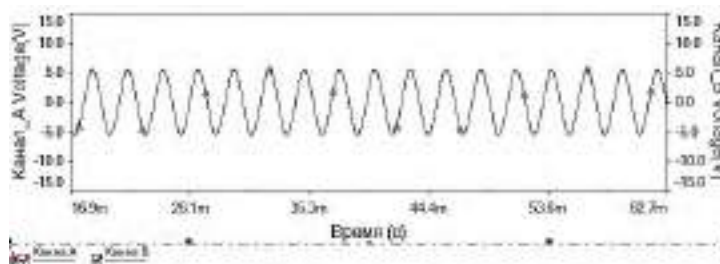
Рис. 6 – Схема параллельной работы задающих генераторов с различными параметрами компонентов (а) и их выходные характеристики (б)



а



б



в

Рис. 7 – Задающие генераторы с различными параметрами компонентов, работающие параллельно и связанные между собой компенсирующими связями неинвертирующие входы № 3 (а) и инвертирующие входы № 2 (б) операционного носителя 741, а также добавлены обе связи (в)

## V. Выводы

Проанализировав существующие методы реализации параллельной работы задающих генераторов, можно сказать, что главное преимущество способа прямой импульсной синхронизации перед способом фазовой автоподстройки частоты заключается в том, что в последнем при выходе из строя «головного» генератора нарушается работа всей системы. В первом способе это исключено.

Как видно из рис. 8, структура синхронных связей задающих генераторов с различными параметрами (см. рис. 2) достаточно проста и в то же время очень надёжна.

## Список литературы

- [1] Воронина Л.Н., Швецов Д.А. Новый метод обеспечения параллельной работы инверторов // Вестник МАИ. 2012. Т. 19, № 5.
- [2] Кулик В.Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи: учеб. пособие. СПб., 2010. 90 с.
- [3] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. 2-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 632 с.
- [4] Терехин В.Б. Лабораторные работы в Multisim по курсу «Прикладная электроника»: практическое руководство. Северск: Изд-во СГТА, 2009. 87 с.
- [5] Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи: учеб. пособие. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 493 с.
- [6] Щетинин В.Е. Однофазные инверторы с многоячейковой структурой: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 137 с.

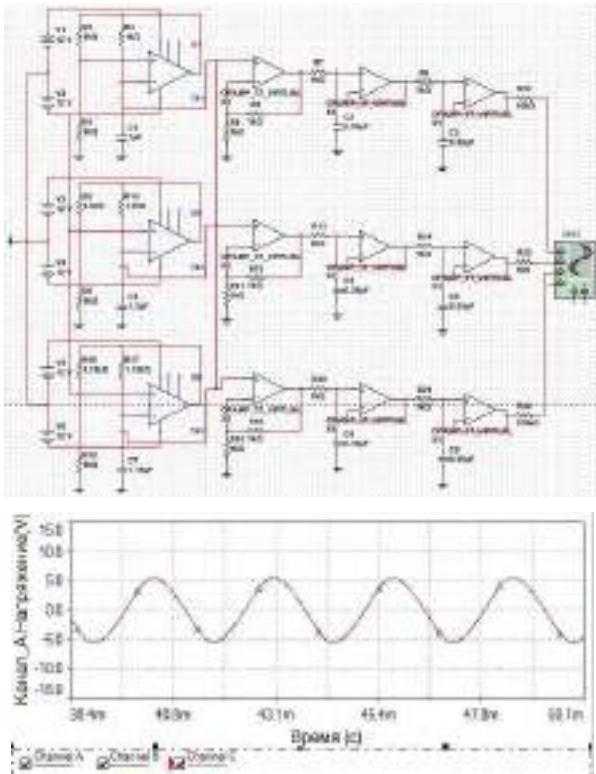


Рис. 8 – Схема трёх параллельно работающих задающих генераторов с различным номиналом компонентов на нагрузку различного сопротивления и осциллограмма выходных напряжений генераторов

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МИКРОСТРУКТУРЫ АНТРОПОГЕННЫХ ЗОЛЕЙ

Додов И.Р., Москаленко Н.И., Паржин С.Н., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия  
utisey@gmail.com

## Аннотация

Разработан измерительный комплекс для спектрометрических исследований атмосферных антропогенных выбросов. Измерительный комплекс имеет полное метрологическое обеспечение. Полученные сведения по спектральным зависимостям эффективных сечений поглощения, рассеяния и ослабления излучения использованы для восстановления микроструктуры антропогенных золей.

**Материалы и методы:** Спектрометрия продуктов сгорания и определение ингредиентного состава газовых компонентов и антропогенных золей.

**Результаты:** Разработан спектральный измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава продуктов сгорания и антропогенных выбросов в атмосферу для спектральной области 0,2–50 мкм.

**Выводы:** Разработанный измерительный комплекс опробован для измерений ингредиентного состава продуктов сгорания на ТЭЦ в лабораторных огневых испытаниях и при сжигании древесины.

**Ключевые слова:** функция спектрального пропускания, газовая фаза, дисперсная фаза, микроструктура золя, антропогенные выбросы, концентрация ингредиентов.

# MEASURING COMPLEX FOR THE INVESTIGATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS AND MICROSTRUCTURE OF ANTHROPOGENIC SOLS

N. Moskalenko, S. Parzhin, I. Dodov, M. Khamidullina, Ya. Safiullina

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russian Federation

utisey@gmail.com

## Abstract

A measuring complex for spectrometric studies of atmospheric anthropogenic emissions is considered. The developed measuring complex, used for studying the optical characteristics of anthropogenic sols, has full metrological support. The obtained data on the spectral dependences of the effective absorption, scattering, and attenuation cross sections were used for reconstruct the microstructure of anthropogenic sols.

**Materials and methods:** Spectrometry of combustion products and determination of the ingredient composition of gas components and anthropogenic sols.

**Results:** A spectral measuring complex has been developed to study the ingredient composition of combustion products and anthropogenic emissions into the atmosphere for the spectral range 0.2-50  $\mu\text{m}$ .

**Conclusions:** The developed measuring complex is tested for measuring the ingredient composition of combustion products at CHP in laboratory fire tests and burning wood.

**Key words:** spectral transmission function, gas phase, dispersed phase, sol microstructure, anthropogenic emissions, concentration of ingredients.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время природные и антропогенные выбросы в атмосферу, «поставщиками» последних являются предприятия энергетической отрасли, транспорта, продукты сгорания растительности, влияют на радиационный теплообмен в ней, погоду и климат Земли [1–3]. Информация по ингредиентному составу продуктов сгорания

энергетических топлив необходима также для расчетов радиационного теплообмена в камерах сгорания энергетических и энерготехнологических установок. Ниже рассмотрен спектральный измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава антропогенных выбросов в атмосферу.



## II. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНГРЕДИЕНТНОГО СОСТАВА АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава отобранных проб продуктов сгорания базируется на разработанной в СССР многоходовой газовой кювете, предназначенной для исследований функций спектрального пропускания (ФСП) ингредиентов газовой фазы атмосферы и продуктов сгорания автомобильных и авиационных двигателей. Спектрометрическая аналитическая лаборатория представляет собой подогревную спектрофотометрический комплекс, использующий в качестве рабочей камеры многоходовую рабочую камеру с внутренним и внешним обогревом. Система обогрева позволяет изменять температуру рабочей среды в диапазоне температур от 300 до 900 К, а вакуумированные монохроматор и осветитель обеспечивают репрезентативность выполнения анализов качественного и количественного состава продуктов сгорания отобранных проб. Необходимость разработки подогревной рабочей камеры возникла вследствие потребности измерения многокомпонентного состава продуктов сгорания, включающих в своем составе летучие и нелетучие в обычных атмосферных условиях компоненты с температурами конденсации в диапазоне от 30 до 150 °С, а также зольную фракцию дисперсной фазы. В обычных атмосферных условиях многие компоненты оказываются захваченными зольными частицами или растворяются в каплях воды. Тем самым результаты измерений широко используемыми технологиями становятся нерепрезентативными и не отражают реального ингредиентного состава продуктов сгорания.

Применение рабочей камеры с многоходовой схемой прохождения излучения позволяет изменять длину оптического пути (чувствительность измерений) в процессе выполнения измерений. В случае необходимости диапазон давлений в рабочей камере может быть расширен за счет разбавления пробы инертным оптически неактивным газом. Высокое спектральное разрешение позволяет идентифицировать компоненты продуктов сгорания по тонкой структуре спектров поглощения. МХК имеет как внутренний, так и внешний обогрев. При использовании внешнего обогрева внутренняя полость кюветы нагревается до температуры 120–150 °С, а внутренний электрический обогрев позволяет повысить температуру газов до 800 К. Внутренняя печь смонтирована между зеркалами оптической скамьи Уайта МХК в цилиндрическом теплоизоляционном кожухе, изготовленном из асбоцемента, прокаленного при температуре  $T = 1000$  К. На торцах печи поставлены отражающие диафрагмы. Температура вдоль оптического пути луча радиации контролируется пятью термопарами с погрешностью  $\pm 3$  °С. После установления равновесия перепад температуры на торцах печи по отношению к её центральной части при  $T = 300$  °С составляет  $\sim 20$  °С. Конструкция электрической печи и многоходовой кюветы выполнена таким образом, что при давлениях  $P < 0,1$  МПа и температуре газовой смеси  $T \leq 800$  К температура окон кюветы близка к комнатной, а температуры корпуса не превосходит 80 °С. Корпус кюветы представляет собой сборную конструкцию, изготовленную из нержавеющей стали. Все металлические узлы соединяются с помощью герметичных уплотнений, изготовленных из высокотемпературных резиновых пластин.

Степень нагрева регулируется величиной напряжения, подведенного к электроду от автотрансформатора типа АОМН-40-220. Откачка модулей измерительного комплекса и запуск исследуемой среды осуществляется вакуумно-дозировочной системой, которая соединяется с кюветой с помощью подогревных трубопроводов из нержавеющей стали. Перед введением пробы в МХК пробозаборники подогреваются до температуры  $T = 150$  °С. Проба вводится в предварительно нагретую до температуры  $T = 150$  °С и вакуумированную рабочую камеру.

Оптическая схема установки представлена на рис. 1. Осветитель *I* и монохроматор *III* с приемной камерой *IV* модернизированного спектрометра ИКС-31 разнесены относительно друг друга. Излучение, модулированное с частотой  $f = 12,5$  Гц, проходит через нагреваемую кювету *II* и зеркалами *10* и *11* фокусируется в плоскости входной щели *23* монохроматора, которая находится в фокусе сферического зеркала *15(I)*. Зеркалами *13* и *15(I)* излучение направляется на дифракционную решетку *14*. После дифракции пучок параллельных лучей собирается сферическим зеркалом *15(II)* и направляется поворотным зеркалом *16* в приемную камеру *IV* и далее зеркалом *18* – на приемную площадку приёмника *20* в модуле приёмников излучения *V*. Для срезания спектров налагающихся порядков дифракционной решетки после выходной щели монохроматора установлен блок сменных отрезающих светофильтров *17*. Применялась графическая форма регистрации спектров ослабления излучения. Спектральная область работы спектрометра ИКС-31 была расширена за счет дополнительной комплектации дифракционными решетками, сменными приёмниками излучения, отрезающими и полосовыми светофильтрами, обеспечивающими его функционирование в спектральном диапазоне от 0,25 до 50 мкм с пределом спектрального разрешения  $\Delta\nu = 0,2$  см<sup>-1</sup>.

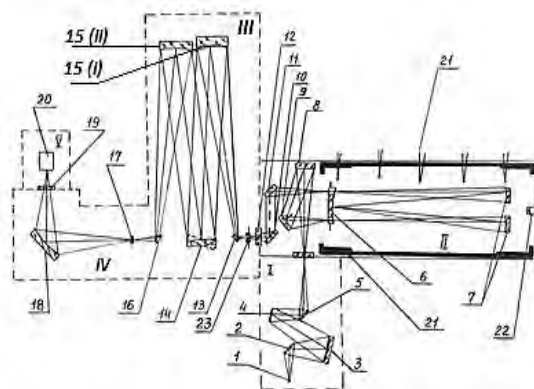


Рис. 1 – Оптическая схема спектрометрической установки: 2–5 – зеркала оптической приставки осветителя *I* с источником излучения *I* (глобара); 8–11 – зеркала оптической приставки для согласования МХК *II* с осветителем *I*; 12, 19 – защитные окна модулей камеры спектрометра ИКС-31; 6, 7 – переднее и задние сферические зеркала оптической скамьи Уайта МХК-1; 21 – термопары; 22 – окуляр для наблюдения числа многократного прохождения излучения в МХК

Аналитическая лаборатория была испытана при измерениях состава продуктов сгорания автомобильного топлива, продуктов сгорания соснового бруса в модельных огневых испытаниях в камерах сгорания [5–8], в натуральных огневых испытаниях фрагмента здания системы «ПЛАСТ-БАУ» [8]. В последнем случае измерения выполнялись в течение всего периода пожара при полном контроле температурного поля в точках отбора проб и в окрестностях

огневого эксперимента. Мониторинг ингредиентного состава продуктов сгорания осуществлялся методом тонкоструктурной спектрометрии с момента загорания до конца пожара. На основе данных спектрометрических измерений обнаружены и идентифицированы 34 оптически активных ингредиента, большую часть которых составляют летучие и тяжелые слаболетучие углеводороды.

На рис. 2. иллюстрируется пример записи спектрограммы ослабления излучения продуктами сгорания основного бруса при горении в свободной атмосфере (кривая 1) в спектральном диапазоне 3,9–5,5 мкм. Для получения спектральной функции ослабления излучения записывается базовая линия (кривая 2) осветителя при вакуумированной МХК и базовая линия для расчета спектра поглощения излучения газовой фазой отобранной пробы (кривая 3). Спектральная функция ослабления излучения золей  $\tau_{vs} = J_{3v}/J_{2v}$ , функция спектрального пропускания газовой фазы  $\tau_{va} = J_{1v}/J_{3v}$ . Ниже остановимся на исследованиях оптических характеристик и микроструктуры дисперсной фазы антропогенных атмосферных выбросов.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТРОПОГЕННЫХ ЗОЛЕЙ

Спектральная зависимость коэффициентов ослабления излучения дисперсной фазой продуктов сгорания позволяет разделить ее на фракции, отвечающие механизмам их генерации: золь минеральной составляющей частиц топлива; фракция, вызванная лопанием пленок при дегазации горящих частиц топлива; фракция, генерируемая механизмом ионной нуклеации частиц сажи из газовой фазы продуктов сгорания.

Микроструктура атмосферных выбросов антропогенного сажевого золя зависит от многих факторов: элементного состава топлива, времени пребывания продуктов сгорания в пламенной зоне, электрических свойств продуктов сгорания, которые определяют скорость коагуляции и агломерации первичного сажевого золя. Механизмы образования сажевого золя исследовались на пламенных измерительных комплексах, работающих в режимах спектрометрии и спектрометрической радиометрии, описанных в [4]. Гомогенная коагуляция частиц золя описывается простым соотношением:

$$\frac{r}{r_0} = \left[ 1 + \frac{1}{2} k n_0 \frac{\ln(1 + \alpha t)}{\alpha} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент броуновской коагуляции;  $n_0$  – число частиц в единице объема,  $\alpha^{-1}$  – время, в течение которого радиус частиц увеличивается в два раза.

Для гетерогенной многокомпонентной коагуляции частиц распределение числа частиц  $f[r(t)]$  определяется соотношением:

$$\frac{f[r(t)]}{f_0(t)} = \sum_i \left[ 1 + \frac{1}{2} k_i n_{0i} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_i t}{\alpha_i} \right\} \right]^{1/3} + \sum_{i \neq k} \left[ 1 + \frac{1}{2} k_{ik} (n_{0i} n_{0k})^{1/2} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_{ik} t}{\alpha_{ik}} \right\} \right]^{1/3}, \quad (2)$$

где  $f[r(t)]$  – временная зависимость распределения числа частиц по размерам;  $i$  – номер фракции;  $k_i$  – коэффициент броуновской коагуляции для компонента  $i$ ;  $k_{ik}$  – коэффициент броуновского взаимодействия частиц разных фракций  $i, k$ .

При выполнении расчетов  $f[r(t)]$  возможно применение итерационной процедуры в расчетах по времени с шагом  $\Delta t$ . Эксперименты показывают, что на коагуляцию частиц золя сильное влияние оказывают электрические свойства частиц.

При горении газового топлива наблюдается более тонкодисперсный золь с модальным радиусом  $r_m = 0,003$  мкм при сжигании метана. С увеличением в соотношении С/Н молекул углеводорода модальный радиус частиц сажи возрастает.

Оптимизация решения задачи восстановления микроструктуры золя из спектров ослабления излучения проводится, исходя из условия:

$$\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}} = \min, \quad (3)$$

где  $\Delta \sigma_{a\lambda i}$  – отклонение в спектральной зависимости коэффициента ослабления восстановленного спектра  $\sigma_{a\lambda i}$  от измеренного;  $i$  – номер канала измерений.

Процедура определения микроструктуры сажевого золя производится в следующем порядке. Задается микроструктура базы данных нулевых приближений и гамма-распределения для значений  $\tau_0 = \tau(\lambda = 0,55 \text{ мкм}) = 1$ . Выбирается нулевое приближение и определяются эффективные сечения ослабления излучения для выбранных каналов (длин волн). Вычисляются величины  $\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}}$  в зависимости от оптической толщины  $\tau_i$  выбранной микроструктуры  $N_1(r)$  [8] и определяется значение  $\tau_{\min}$ , для которого  $\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}} = \min$ . Далее вычисляется микроструктура  $N(r)$  по выражению:

$$N(r) = N_0(r)(1 - \tau_{\min}) + N_1(r)\tau_{\min}. \quad (4)$$

Полученному значению  $N(r)$  присваивается нулевое приближение и процедура повторяется для следующей выборки микроструктуры. Процедура определения  $N(r)$  завершается после полного перебора микроструктур гамма-распределений [8]. Погрешность вычислений оптической плотности  $\Delta \tau_i / \tau_i$  по восстановленным микроструктурам составляет от 3 до 4 %.

На рис. 3 приведены функции распределения числа частиц по размерам для метан-, пропан- и ацетилен-воздушных пламен в выбросах продуктов сгорания бензинового двигателя и соснового бруса. Нормировка  $f(r)$  выполнена по соотношению  $\int f(r) dr = 1$ .

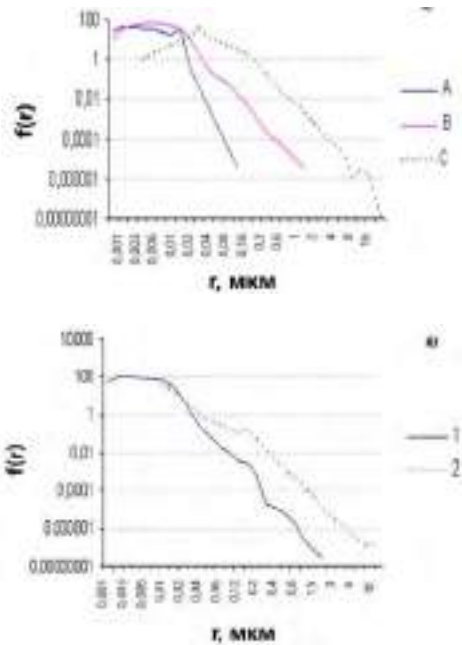


Рис. 3 – Функция распределения  $f(r)$  числа частиц по размерам:  $r$  – радиус частиц Пламени;  $A, B$  и  $C$  – соответственно метан-, пропан-бутан- и ацетилен-воздушные пламена;  $1$  – в выбросах продуктов сгорания бензинового двигателя;  $2$  – в продуктах сгорания соснового бруса

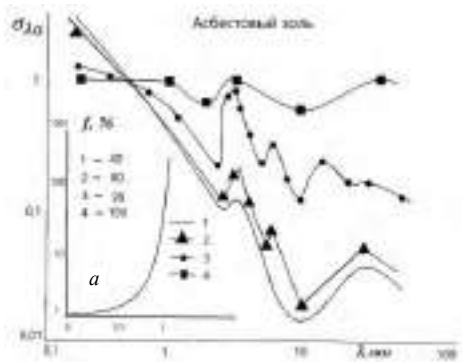


Рис. 4 – Нормированный спектральный коэффициент ослабления  $\sigma_{\lambda,d}$  асбестового золя для различных значений относительной влажности  $f$  воздуха:  $a$  – кривая роста оптической плотности

Кроме сажевого золя были выполнены экспериментальные исследования коэффициентов ослабления излучения асбестового золя, который образуется в результате разложения асбоцементных строительных материалов при температурах  $T > 500$  °С. Результаты представлены на рис. 4, из которого следует, что образующийся асбестовый золь в результате прокаливания асбоцементных плит является тонкодисперсным и сильно гигроскопичным, а его оптическая плотность возрастает с увеличением относительной влажности.

### Список литературы

- [1] Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферы и климат. М.: ВИНТИ, 1984. 264 с.
- [2] Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. Моделирование антропогенных воздействий на климат // Техника и технологии в XXI веке: современное состояние и перспективы развития. Кн. 4. Новосибирск: ЦРНС 2009. С. 155–158.
- [3] Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Садыкова М.С. Зональное моделирование парникового эффекта атмосферы и антропогенных изменений климата // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 2. С. 43–54.
- [4] Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен / Н.И. Москаленко [и др.]. Казань: Изд-во КГЭУ, 2014. 260 с.
- [5] Determination ingredient composition of turbojet engine combustion gases by the fine structure spectroscopy / N.I. Moskalenko [et al.] // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59, № 3. P. 116–121.
- [6] Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Загидуллин Р.А. Микроструктура и радиационные характеристики сажевого золя в пламенах и антропогенных выбросах продуктов сгорания // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 23–32.
- [7] Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. III. Возможные климатические последствия постядерных конфликтов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 9-10. С. 21–30.
- [8] Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С. Применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11-12. С. 22–32.

# СЕЗОННЫЕ, ВОДЯНЫЕ СИСТЕМЫ АНТИОБЛЕДЕНЕНИЯ КРОВЕЛЬ И УДАЛЕНИЯ СНЕГА

Желудков А.А., Кадыров Р.Н.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

zheludkovl@mail.ru, 2606699@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Водяные системы антиобледенения крыш зданий аналогичны по своему устройству системам снеготаяния. Их рационально использовать на больших площадях, крышах, где применять кабели экономически невыгодно. Она обеспечивает все те же преимущества, что и кабельная система, но в обслуживании обходится намного дешевле. Оборудование холодильной установки от ледового дворца спорта «Татнефть Арена» подключено к централизованной системе автоматизации. Эта система допускает распределять поток горячего теплоносителя между всеми теплообменниками отапливаемого здания.

**Материалы и методы:** Сезонные, водяные системы антиобледенения кровель и удаления снега, построение модели в многофункциональном ледовом дворце спорта «Татнефть Арена».

**Результаты:** Произведены экономические расчеты, выбран циркуляционный насос и теплообменник, произведена модель построения отопления в зимний период крыши.

**Выводы:** Актуальность работы заключается в использовании вторичного тепла для нагревания воды в трубах для растопления наледи и снега на крыше многофункционального ледового дворца спорта «Татнефть Арена» за счет сокращения драйкулеров до 11 штук из 17 возможных.

**Ключевые слова:** электроснабжение, антиобледенение.

# SEASONAL, WATER SYSTEMS OF ANTI-FROSTING OF ROOFS AND REMOVAL OF SNOW

A. Zheludkov, R. Kadyrov

KSPEU

Kazan, Russia

zheludkovl@mail.ru, 2606699@gmail.com

## Abstract

**Background:** The water systems of anti-frosting of roofs of buildings are similar on the device to the systems of snowmelt. It is rational to use them on big squares, roofs where it isn't favorable to apply cables economically. The essence of water system consists in use for heating of a roof of pipes on which hot water circulates. Advantages of such system are the high efficiency and profitability. It provides the same advantages, as cable system, but in service costs much more cheaper. The equipment of the refrigeration unit from the Ice arena "Tatneft the Arena" is connected to the centralized system of automation. For heating of the pool draykuler and automatic control of the system of recovery of heat will be used. This system allows to distribute a stream of the hot heat carrier between all heat exchangers of the heated building.

**Materials and Methods:** The seasonal, water systems of anti-frosting of roofs and removal of snow, creation of model in multipurpose ice arena "Tatneft the Arena".

**Results:** Economic calculations are made, the circulation pulser and the heat exchanger is chosen, the model of creation of heating during the winter period of a roof is made.

**Conclusions:** The relevance of work consists in use of secondary heat for heating of water in pipes for a kindling of frost and snow on a roof of multipurpose ice arena "Tatneft the Arena", due to reduction of draykuler up to 11 pieces from 17 possible.

**Key words:** power supply, anti-frosting.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В наше время, когда резко меняется температура, практически на всех крышах зданий появляется толстая ледяная корка, скапливается снег, замерзают водостоки,

появляются опасные наледи и сосульки, которые внезапно могут обрушиться на землю или на крытое пространство при порывах ветра. Поэтому пешеходные дорожки, проходы, находящиеся вблизи здания, являются самыми опасными.

Эта проблема решается сбиванием сосулек или очисткой крыши от снега. Но всё это временный эффект.

При сезонном (осеннем и весеннем периоде) дневном быстром потеплении начинается таяние снега на крыше, она может быстро стечь в землю, затекая в щели и стыки. И при похолодании замерзает, тем самым ломая поверхность. Снег, собрав в себя влагу, становится тяжелее, начинает сползать, тем самым забивает желоба и водостоки, не выдержав тяжести, падает вниз.

Установка системы, препятствующей обледенению и образованию снежных масс на кровли, необходима, потому что призвана повысить безопасность для эксплуатации здания, передвижения автотранспорта и пешеходов.

Система антиобледенения крыш и водостоков очень сложная задача для инженеров, которая должна учитывать климатические зоны местности, тип крыши.

## II. ВЫЧИСЛЕНИЕ

При обилии всевозможных изданий, посвящённых вопросам энергосбережения в промышленности и бытовом секторе, научно-технические работники, специалисты электроэнергетических служб предприятий практически не располагают систематизированными сведениями о методах и технологических средствах, позволяющих снизить либо оптимизировать реальное электропотребление при разработке, изготовлении и эксплуатации конкретного технологического оборудования [1].

К сожалению, даже в наши дни в связи с довольно низкими ценами за 1 кВт·ч полученной электроэнергии для большинства крупных и энергоёмких производств задача её снижения потребления не стала острой, что находит своё отражение в сугубо декларативном характере проводимых мероприятий по энергосбережению. Пока основной акцент работы делается на внедрение современных энергоэффективных оборудования. В отличие от этого, авторами предлагается деятельность, направленная на оптимизацию и снижение электропотребления за счёт инженерно-технических решений, а именно: изменение режимов работы электрооборудования, использование альтернативных малозатратных технологических решений и внедрение средств управления оборудованием и т. д. [2].

Очевидны три направления энергосбережения:

1. Прямые ограничения подачи электроэнергии.
2. Снижение потерь электроэнергии.
3. Оптимизация электропотребления без ухудшения условий работы потребителей за счёт внедрения новейших технологических решений в системе электроснабжения [3].

Длина крыши Ледового дворца спорта «Татнефть АРЕНА» составляет 116,8 м, ширина – 109,8 м, а площадь – 12821,9 м<sup>2</sup>.

За счет сокращения драйкуллеров с 17 до 11 штук экономия за электропотребление составит:

$$324000 \cdot 3 = 972000 \text{ руб./месяц.}$$

Дополнительно в здание Ледового дворца спорта «Татнефть АРЕНА» устанавливаем теплообменник и два циркуляционных насоса. Температура на выходе из (теплообменника) 45 °С. Данная температура будет достаточной для обогрева кровли и устранения наледи в самый холодный период в г. Казань. Вода постоянно циркулирует от входа на крышу и обратно до теплообменника.

Применяем трубы компании Evoh – 16×2 мм, цена за 1 трубу (1 труба – 100 м) – 9 806 руб.

Необходимо 100 труб, длина одной 100 м, шаг между трубами равен 1 м, плюс соединители между еще 50 трубами. Итого 150 труб по 100 м.

$$\text{Стоимость: } 150 \cdot 9806 = 1\,470\,900 \text{ руб.}$$

Насосы марки Krypton KRF 1510B в количестве двух штук (цена за 1 шт. составляет 203 006 руб.):

$$203\,006 \cdot 2 = 406\,012 \text{ руб.}$$

Стоимость теплообменника TRANTER GL-430N составляет 30 000 руб.

Итого общие затраты составили 1 906 912 руб.

Окупаемость за счет сокращения драйкуллеров:

$$324000 \cdot 3 = 972000 \text{ руб./месяц.}$$

Данная работа системы предназначена на сезон с ноября по апрель (6 месяцев) и составляет 5 832 000 руб.

## Список литературы

- [1] Клевцов А.В. Средство оптимизации потребителя электроэнергии: справочно-информационное пособие, 2010. 5 с.
- [2] Курылев Е.С., Оносовский В.В., Румянцев Ю.Д. Холодильные установки: учеб. пособие. М.: Политехника, 2004. С. 54–56.
- [3] Денисов-Винский Н. LAP Lambert Academic Publishing. Анализ вторичного тепла промышленных предприятий и его использования, 2014. 27 с.

# КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ТОПЛИВНОГО ДОЗАТОРА ДВС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА–ХУАНГА

Загретдинов А.Р., Базукова Э.Р.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
azagretdinov@eandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Во многих современных системах диагностики проблема частотно-временного преобразования сигналов решается применением вейвлет-анализа. Однако достоверность такого анализа во многом зависит от выбора базисной функции, с помощью которой происходит преобразование сигнала. В связи с этим возникает проблема формирования адаптивного базиса частотно-временного преобразования, функционально зависящего от содержания самих виброакустических сигналов. Решить проблему можно применением преобразования Гильберта-Хуанга.

**Материалы и методы:** Использовался метод Гильберта-Хуанга, среда программирования LabVIEW.

**Результаты:** Проведена серия экспериментов на моторном стенде (восьмицилиндровом двухтактном двигателе). Получены результаты обработки виброакустических сигналов с применением преобразования Гильберта-Хуанга.

**Выводы:** Установлено, что 9-я IMF несет в себе основные гармонические составляющие сигнала. При отключении топливного дозатора одного из цилиндров появляется асимметрия распределения мгновенных частот 9-й IMF относительно их среднего значения. Анализируя их центральный момент третьего порядка можно достоверно установить состояние контролируемого объекта.

**Ключевые слова:** преобразование Гильберта-Хуанга, эмпирическая модовая декомпозиция по ансамблю, мгновенная частота, центральный момент третьего порядка, неразрушающий контроль, двигатель внутреннего сгорания, виброакустический сигнал.

## CONTROL OF OPERATION OF THE FUEL BATCHER OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH GILBERT-HUANG TRANSFORMATION

A. Zagretdinov, E. Bozukova  
Kazan state power engineering university,  
Kazan, Russian Federation  
azagretdinov@eandex.ru

## Abstract

**Background:** In many modern systems of diagnostics the problem of time-and-frequency transformation of signals is solved by application of the veyvlet-analysis. However the reliability of such analysis in many respects depends on the choice of basic function by means of which there is a transformation of a signal. In this regard there is a problem of formation of adaptive basis of the time-and-frequency transformation functionally dependent on the maintenance of vibroacoustic signals. It is possible to solve a problem application of transformation of Gilbert-Huang.

**Materials and methods:** Gilbert-Huang method, the LabVIEW programming environment was used.

**Results:** A series of experiments at the motor stand (the eight-cylinder two-stroke engine) is conducted. Results of processing of vibroacoustic signals with application of transformation of Gilbert-Huang are received.

**Conclusions:** It is set that the 9th IMF bears in itself the main harmonic components of a signal. In case of switch-off of the fuel dispenser of one of cylinders the asymmetry of distribution of the instantaneous frequencies of the 9th IMF concerning their mean value appears. Analyzing their central moment of the third order it is possible to set a status of a controlled object authentically.

**Key words:** Gilbert-Huanga transform, empirical modal decomposition on ensemble, the instantaneous frequency, the central moment of the third order, non-destructive testing, the internal combustion engine, a vibroaudible tone.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы энергетических объектов напрямую зависит от их технического состояния. Наличие неисправностей деталей и узлов оборудования может привести к появлению нерасчетных режимов работы и снижению коэффициента полезного действия.

С повышением требований к энергетической эффективности оборудования растут и требования к методам оценки технического состояния. На предприятиях широко используются методы вибродиагностики. Это связано с тем, что вибросигнал обладает достаточно емкой информацией о состоянии оборудования и его элементов. Для обеспечения эффективного применения вибродиагностики необходимо, чтобы эта информация была должным образом извлечена из вибросигналов.

Традиционно для обработки вибросигналов используется преобразование Фурье. В некоторых случаях для оценки состояния объекта контроля этого недостаточно. Это связано с тем, что преобразование Фурье не раскрывает особенности поведения спектральных составляющих во времени.

Во многих современных системах диагностики проблема частотно-временного преобразования сигналов решается применением вейвлет-анализа [1–3]. Однако достоверность такого анализа во многом зависит от выбора базисной функции, с помощью которой происходит преобразование сигнала. В связи с этим возникает проблема формирования адаптивного базиса частотно-временного преобразования, функционально зависящего от содержания самих виброакустических сигналов. Эту проблему можно решить применением преобразования Гильберта-Хуанга, не требующего априорного функционального базиса преобразования [4–13]. Здесь функции базиса получаются адаптивно непосредственно из самих сигналов процедурами отсеивания эмпирических мод (Intrinsic Mode Functions, IMF). Метод был предложен Норденом Хуангом в 1995 в США (NASA) для изучения поверхностных волн тайфунов, с обобщением на анализ произвольных временных рядов коллективом соавторов в 1998 г. В последние годы метод находит активное применение в геофизике, медицине, радиотехнике и т. п.

Цель работы: рассмотреть возможность применения преобразования Гильберта-Хуанга для виброакустического контроля работа топливного дозатора двигателя внутреннего сгорания.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Серия экспериментов проводилась в испытательной лаборатории на моторном стенде (восьмицилиндровом двухтактном двигателе).

Измерения виброакустических сигналов проводились для периодов, когда двигатель работает в нормальном режиме и когда один из цилиндров не исправен (отключена подача питания на топливный дозатор). Структурная схема измерительной системы [14, 15] представлена на рис. 1.

Лазерный виброметр устанавливался на расстоянии 2 м от моторного стенда и его луч наводился на головку цилиндра, отключение которого предполагалось в процессе экспериментов.

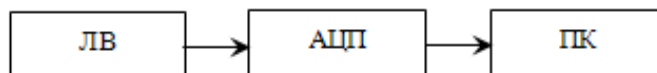


Рис. 1 – Структурная схема измерительной системы: ЛВ – лазерный виброметр LV-2; АЦП – аналого-цифровой преобразователь NI USB-6251 с 16-битным разрешением; ПК – персональный компьютер с программным обеспечением LabVIEW

Работа моторного стенда проводилась с частотой оборотов коленвала 2200 об/мин. Регистрация виброакустических сигналов осуществлялась с частотой дискретизации 40 000 Гц.

## III. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для обработки виброакустических сигналов применялся метод Гильберта-Хуанга, включающий в себя процедуру модовой декомпозиции по ансамблю, который заключается в следующем [4, 16–18].

1. К сигналу  $y(t)$  добавляется белый шум  $\xi_n$  с заданным соотношением сигнал/шум:

$$y_{\xi}(t) = y(t) + \xi_n. \quad (1)$$

2. В сигнале  $y_{\xi}(t)$  определяется положение локальных экстремумов (определяются все пики и впадины).

3. Кубическим сплайном вычисляется верхняя  $u_a(t)$  и нижняя  $u_b(t)$  огибающие процесса, соответственно, проходящие через максимумы и минимумы нормированного сигнала. Определяется функция средних значений  $m_1(t)$  между огибающими:

$$m_1(t) = \frac{u_a(t) + u_b(t)}{2}. \quad (2)$$

Разность между сигналом  $y_{\xi}(t)$  и функцией  $m_1(t)$  дает первую компоненту отсеивания – функцию  $h_1(t)$ , которая является первым приближением к первой функции IMF:

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t). \quad (3)$$

4. Повторяются шаги 2 и 3, принимая вместо  $y(t)$  функцию  $h_1(t)$ , и находится второе приближение к первой функции IMF – функция  $h_2(t)$ :

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t). \quad (4)$$

Останов операций отсеивания осуществляется по заданному ограничению числа итераций (не более 10).

5. Последнее значение  $h_i(t)$  итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию  $c_1(t) = h_i(t)$  семейства IMF, которая непосредственно входит в состав сигнала  $y_{\xi}(t)$ . Это позволяет вычесть  $c_1(t)$  из состава сигнала и оставить в нем более низкочастотные составляющие  $r_1(t)$ :

$$r_1(t) = y_{\xi}(t) - c_1(t). \quad (5)$$

6. Полученный остаток  $r_1(t)$  становится новым временным рядом для декомпозиции, повторяются шаги 2–5. Декомпозиция завершается, когда остаток  $r_n(t)$  является монотонной функцией.

7. Шаги 1–6 повторяются  $N_E$  раз (где  $N_E$  – ансамблевое число). Здесь каждый раз к сигналу  $y(t)$  добавляется заново генерированный шум  $\xi_n$ , на каждом шаге запоминается результат декомпозиции.

8. Выделенные моды усредняются по ансамблю:

$$s_i(t) = \tilde{c}_i(t), \quad (6)$$

где  $\tilde{c}_i(t)$  – усредненная по ансамблю  $i$ -я функция IMF.

9. Определяется функция  $v(t)$ , сопряженная к IMF по Гильберту:

$$v(t) = F^{-1} \{-j \operatorname{sgn}(f) X(f)\}, \quad (7)$$

где  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье;  $X(f)$  – результат преобразования Фурье функции  $s(t)$  IMF,  $\operatorname{sgn} = \begin{cases} 1 & f > 0 \\ 0 & f = 0, \\ -1 & f < 0 \end{cases}$

$f$  – гармоника сигнала.

10. Для каждой IMF вычисляются значения мгновенной частоты  $w(t)$  и амплитуды  $a(t)$ .

Мгновенная амплитуда:

$$a(t) = \sqrt{s^2(t) + v^2(t)}, \quad (8)$$

где  $s(t)$  – усредненная по ансамблю функция IMF,  $v(t)$  – функция, сопряженная к IMF по Гильберту.

Мгновенная частота:

$$w(t) = \dot{\varphi}(t) = \frac{s(t)v'(t) - \dot{s}(t)v(t)}{a^2(t)}, \quad (9)$$

где  $\varphi(t) = \arctg\left(\frac{v(t)}{s(t)}\right)$  – мгновенная фаза.

Сигналы обрабатывались и анализировались с помощью программ, написанных в среде программирования LabVIEW.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе обработки сигналов в соответствии с процедурой модовой декомпозиции по ансамблю к сигналу добавлялся белый шум  $\xi_n$  с соотношением сигнал/шум 18,7 дБ, ансамблевое число  $N_E = 100$ .

Результаты обработки виброакустических сигналов можно представить на графиках интенсивности (получить спектры Гильберта), где на частотно-временной плоскости значение амплитуды обозначается соответствующим цветом. Однако графики изменения мгновенных частот IMF по времени не уступают по наглядности спектрам Гильберта и более удобны с точки зрения анализа численными методами.

Было установлено, что 9-я IMF содержит в себе основные гармонические составляющие сигнала.

Графики изменения мгновенных частот 9-й IMF представлены на рис. 2, 3.

Из рис. 2,3 видно, что гармонические составляющие 9-й IMF сосредоточены относительно отметки 36,7 Гц. Эта частота соответствует заданной во время экспериментов частоте оборотов коленчатого вала (2 000 об/мин). При отключении топливного дозатора одного из цилиндров

появляется асимметрия распределения мгновенных частот относительно их среднего значения. Для оценки степени их симметрии можно использовать центральный момент третьего порядка:

$$\sigma_w^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (w_i - \bar{w})^3, \quad (10)$$

где  $n$  – число элементов последовательности частот  $w$ ;  $\bar{w}$  – среднее значение.

Для классификации объекта контроля на «годен» или «брак» предложен подход, характерный для процедуры отбраковки аномалий [14,19,20]. Для этого совокупность вычисленных значений центрального момента третьего порядка интерпретируется как множество измеренных значений  $(p_1, p_2, \dots, p_m)$  некоторого абстрактного параметра, и применяется следующий алгоритм:

- 1) вычисляется оценка положения  $\bar{p}$ ;
- 2) вычисляется оценка разброса  $S$  как среднее абсолютное отклонение;
- 3) для заданного уровня значимости  $\alpha$  строится доверительный интервал:

$$\bar{p} \pm St\left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2\right), \quad (11)$$

где  $t(\alpha, m)$  –  $\alpha$ -квантиль распределения Стьюдента с  $m$  степенями свободы.

На рис. 4 представлены результаты сравнения значений центральных моментов (для 9-й IMF) с границами доверительного интервала, сформированными в соответствии с уровнем значимости 0,05. Длина выборки для определения  $\sigma_w^3$  принята равной 6 тыс. отсчетов.

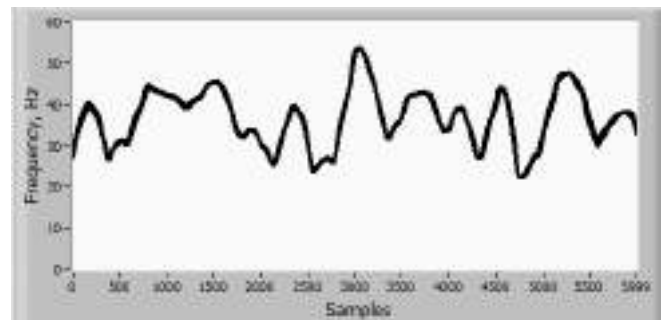


Рис. 2 – Мгновенные частоты 9-й IMF исправно работающего двигателя

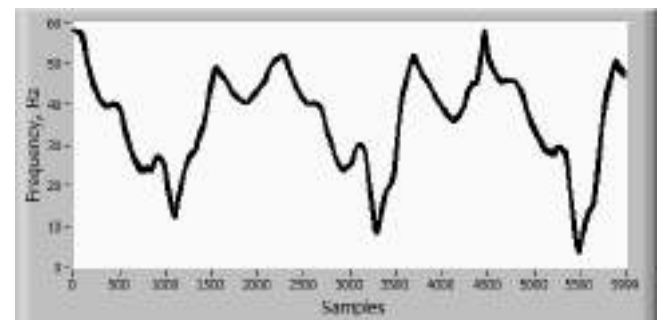


Рис. 3 – Мгновенные частоты 9-й IMF двигателя с отключенным топливным дозатором одного из цилиндров



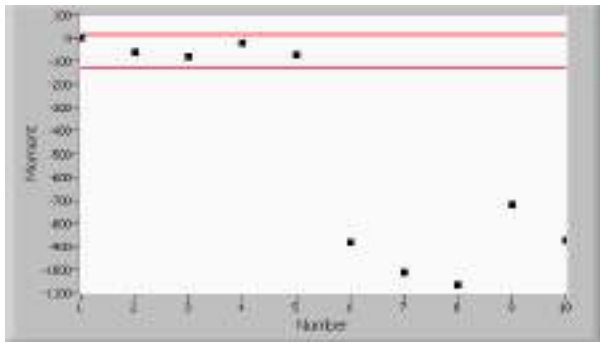


Рис. 4 – Сравнения значений центральных моментов третьего порядка с границами доверительного интервала (красные линии)

Первые пять значений на рис. 4 соответствуют сигналам исправно работающего двигателя, а значения с номерами 6–10 – сигналам двигателя с отключенным топливным дозатором одного из цилиндров.

Центральные моменты  $\sigma_w^3$ , расположенные близко к нулю, характеризуют исправное состояние двигателя и говорят о симметрии распределения мгновенных частот относительно их среднего значения. При отключении топливного дозатора одного из цилиндров появляется существенная асимметрия, при которой значения  $\sigma_w^3$  выходят за границы доверительного интервала.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преобразование Гильберта-Хуанга позволяет извлечь из сигналов информацию о быстрых временных изменениях их спектрального состава. При этом не требуется выбора базисной функции разложения, от которой во многом зависит разрешающая способность частотно-временного преобразования. Графики изменения мгновенных частот IMF не уступают по наглядности спектрам Гильберта и более удобны с точки зрения анализа численными методами. Установлено, что 9-я IMF несет в себе основные гармонические составляющие сигнала. При отключении топливного дозатора одного из цилиндров появляется асимметрия распределения мгновенных частот 9-й IMF относительно их среднего значения. Анализируя их центральный момент третьего порядка можно достоверно установить состояние контролируемого объекта.

#### Список литературы

[1] Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом / М.В. Акутин [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 2. С. 55–57.  
 [2] Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 2. С. 141–157.

[3] Brémaud P. Mathematical Principles of Signal Processing. Fourier and Wavelet Analysis // Springer Science & Business Media. 2002. 263 p.  
 [4] [Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.  
 [5] Huang N. E., Wu M. C., Long S. R. et al. A confidence limit for empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 2003. № 459. P. 2317–2345.  
 [6] Huang N. E., Shen Z., Long S. R. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 1998. P. 903–995.  
 [7] Huang N. E., Wu Z., Long S. R. et al. On Instantaneous Frequency // Advances in Adaptive Data Analysis. 2009. Vol. 1, № 2. P. 177–229.  
 [8] [8] Wu Z., Huang N. E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Proc. R. Soc. Lond. A. 2004. № 460. P. 1597–1611.  
 [9] Wu Z., Huang N. E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Proc. R. Soc. Lond. A. 2004. № 460. P. 1597–1611.  
 [10] [10] Kaslovsky D. N., Meyer F. G. Noise corruption of Empirical Mode Decomposition and its effect on Instantaneous Frequency // Advances in Adaptive Data Analysis. 2010. Vol. 2, № 3. P. 373–396.  
 [11] Sharpley R. C., Vatchev V. Analysis of intrinsic mode functions // Constr. Approx. 2006. № 24. P. 17–47.  
 [12] [12] Tsui P.-H., Chang C.-C. Noise-Modulated Empirical Mode Decomposition // Advances in Adaptive Data Analysis. 2010. Vol. 2, № 1. P. 25–37.  
 [13] Анализ и диагностика многокомпонентных сигналов сейсмограмм с использованием преобразования Гильберта-Хуанга / А.Н. Павлов [и др.] // Вестник ТГУ. 2012. № 4. С. 1122–1124.  
 [14] Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ / Ю.В. Ваньков [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 5. С. 141–143.  
 [15] Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3–4. С. 108.  
 [16] Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2015. 193 с.  
 [17] Загреддинов А.Р., Гапоненко С.О., Серов В.В. Концепция оценки технического состояния оборудования на основе ННТ-преобразования виброакустических сигналов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3243.  
 [18] Загреддинов А.Р., Бусаров А.В., Бусаров В.В. Сравнение методов останова операций отсеивания при эмпирической модовой декомпозиции сигналов // Инженерный вестник Дона. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238.  
 [19] Автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения лопаток газотурбинной установки / А.В. Бусаров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 12. С. 37–40.  
 [20] Загреддинов А.Р., Кондратьев А.Е., Ваньков Ю.В. Разработка прибора и методики ударно-акустического контроля многослойных композиционных конструкций // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 9–10. С. 97–104.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИМЕРЕ ТРУБОПРОВОДА

Ибадов А.А., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Нигматулина А.Ф.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
amil-i@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В век современных технологий, когда трассу кабеля или трубопровод можно отразить при помощи 3D моделирования с привязкой по GPS, к сожалению вопрос о том, скрыта ли коммуникация на конкретном участке строительных или иных работ или ее там нет, остается чрезвычайно актуальным. Инженерные изыскания, прокладка новых коммуникаций с рытьем траншей и каналов, прокладка скрытых коммуникаций методом горизонтально направленного бурения (ГНБ) зачастую оказываются под угрозой срыва или проводятся со значительными финансовыми затратами по причине отсутствия информации и случайного повреждения силовых кабельных линий или трубопроводов. При этом круг задач подрядных организаций сводится не только к выполнению строительно-ремонтных работ, но и к предоставлению подробной информации (планов, карт и схем) о том, где пролегают инженерные сети. Во избежание таких ситуаций необходимо осуществлять контроль местоположения инженерных коммуникаций.

**Материалы и методы:** В данной работе предложен новый метод контроля местоположения заглубленных трубопроводов и проведено математическое моделирование в программе конечноэлементного анализа ANSYS, подтверждающее эффективность предлагаемого технического решения.

**Результаты:** Определены результаты гармонического анализа трубопроводов с разными параметрами. Исходя от полученных спектров, выявлены значения информативной частоты для трубопроводов и других подобных объектов с различными диаметрами и толщиной стенки. В программном комплексе ANSYS было выведено на экран визуальное представление информативной частоты.

**Выводы:** Предложенная математическая модель объекта контроля для заглубленных полипропиленовых, полиэтиленовых и стальных трубопроводов на различной глубине залегания с диаметром от 40 до 1000 мм с применением метода конечноэлементного моделирования для определения информативных частотных диапазонов применима для подобных систем учета и мониторинга для энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов.

**Ключевые слова:** LabVIEW, ANSYS, виброакустические сигналы, трубопровод, контроль, эластичная оболочка.

## MATHEMATICAL MODELING OF ELASTIC SHELL VIBRATIONS WITH EXTERNAL IMPACT ON THE EXAMPLE OF A PIPELINE

A. Ibadov, S. Gaponenko, A. Kondratiev, A. Nigmatulina  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
amil-i@mail.ru

## Abstract

**Background:** Nowadays, in the era of modern technologies, when the route of a cable or pipeline can be reflected using 3D modeling with the GPS reference, unfortunately, the question of whether the connection is hidden on a particular section of the structure or not remains extremely urgent. Prospecting, laying new communications with digging trenches and channels, laying hidden messages by the method of horizontally directed drilling (HDD) are often exposed to failures or performed with significant financial costs due to the lack of information or accidental damaging of power cable lines and pipelines. At the same time, the scope of the tasks of contractors is limited not only by the performance of construction and repair work, but also by providing detailed information (plans, maps and diagrams) about the place of lying of the engineering networks. To avoid such situations, it is necessary to monitor the location of engineering communications.

**Materials and methods:** In this article, the new method for monitoring the location of buried pipelines was proposed, and mathematical modeling was performed in the ANSYS program for finite elements, which confirms the effectiveness of the proposed technical solution.

**Results:** The results of harmonic analysis of pipelines with different parameters are determined. Based on the number of spectra, the revealed values of the informative frequency for pipelines and other similar objects with different diameters and volumes. In the software complex ANSYS, a visual representation of the informative frequency was displayed.

**Conclusions:** The proposed mathematical model of the control object for buried polypropylene, polyethylene and steel pipelines at various depths with a diameter of 40 to 1000 mm, using the finite element method for determining informative frequency ranges, is applicable for similar metering and monitoring systems for energy saving and consumption of fuel and energy resources.

**Key words:** LabVIEW, ANSYS, vibro-acoustic signals, pipeline, control, elastic shell.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый метод контроля местоположения заглубленных трубопроводов [3] заключается в генерации резонансных звуковых колебаний в полости искомого объекта, при этом оконтуривание этого объекта осуществляется путем перемещения чувствительного элемента (микрофона или пьезоэлектрического датчика) над зоной поиска.

До проведения выработки и до возведения подземного трубопровода в грунт в неограниченном массиве находится в состоянии естественного или геостатического равновесия при действии собственного веса. При этом на глубине в массиве грунта (рис. 1) действуют следующие сжимающие напряжения (давления): вертикальные  $q_v$  и горизонтальные  $q_g$ .

Давление грунта на подземный трубопровод оказывается иным, чем давление в нетронутом массиве на той же глубине, так как: во-первых, трубопровод обладает другой жесткостью, чем грунт, во-вторых, перемещения грунта успевают произойти в период времени между разработкой грунта и возведением трубопровода, наконец, в-третьих, между трубопроводом и массивами остаются зазоры, допускающие некоторые перемещения грунта.

Давление, оказываемое грунтом на трубопровод, зависит от глубины заложения и жесткости последнего, влажности и степени уплотнения грунта над трубопроводом и особенно рядом с ним, а также от способа возведения трубопровода. Следует различать три основных способа возведения трубопровода:

### 1. Трубопровод в насыпи (рис. 2, а).

Возведенный или уложенный непосредственно на поверхности земли или в очень небольшом по сравнению с шириной выемки углублении трубопровод с последующей засыпкой. Так обычно сооружаются водопропускные трубы под дорожными насыпями.

### 2. Трубопровод в выемке или траншее (рис 2, б).

Трубопровод возводится или укладывается в открытой выработке, имеющей небольшую по сравнению с глубиной ширину и ограниченную более или менее твердыми стенками. Пространство рядом с трубопроводами и над ним заполняется грунтом. Так обычно укладываются трубопроводы водоснабжения, канализационные коллекторы, водостоки и др.

### 3. Трубопровод, возведенный закрытым способом (рис. 2, в).

В этом случае прокладка осуществляется без вскрытия грунта. Этот способ применяется при строительстве туннелей и при бестраншейной прокладке трубопроводов.

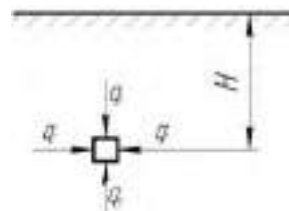


Рис. 1 – Подземный трубопровод в грунте

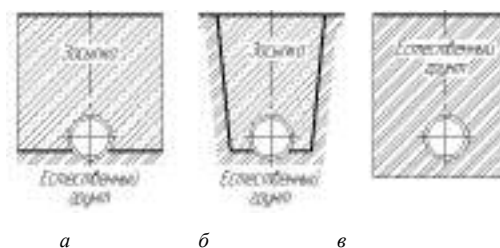


Рис. 2 – Способы возведения трубопроводов в грунте

Давление грунта на подземный трубопровод постоянно меняется, что является следствием ползучести грунта и изменения температурно-влажностных условий. В большинстве случаев с течением времени давление грунта на сооружение постепенно увеличивается, достигая через некоторый промежуток времени максимального значения, иногда с последующим уменьшением.

Для определения давления грунта на подземные трубопроводы грунт рассматривают либо в качестве упругой, либо в качестве сыпучей среды [1].

Равнодействующая расчетной вертикальной нагрузки на единицу длины трубопровода от давления грунта определяется по формулам:

- при укладке в траншее:  $Q_T = n\gamma H B K_{TP} \psi$ ;
- при укладке в насыпи:  $Q_H = n\gamma H D_n K_H$ .

## II. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка математической модели объекта контроля для заглубленных полипропиленовых, полиэтиленовых и стальных трубопроводов на различной глубине залегания с диаметром от 40 до 1000 мм с применением метода конечноэлементного моделирования для определения информативных частотных диапазонов [2, 4].

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

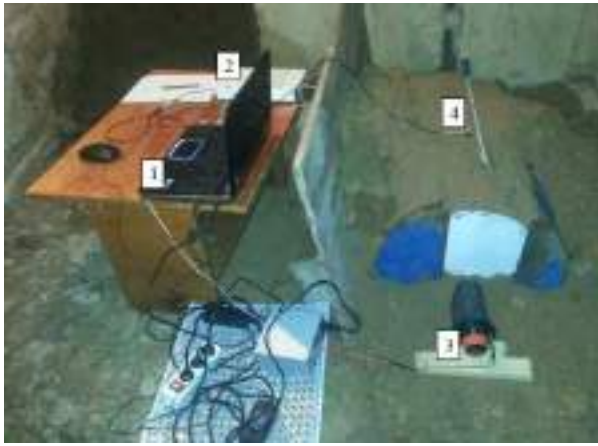


Рис. 3 – Экспериментальная установка: 1 – персональный компьютер; 2 – АЦП-ЦАП; 3 – акустический излучатель; 4 – пьезодатчик

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В программном комплексе ANSYS были построены модели трубопроводов различных геометрических размеров (длина × диаметр трубы × толщина стенки) [3, 5–7]:

- 2 000×40×6 мм, 2 000×75×2 мм, 2 000×110×2,2 мм;
- 5 000×40×6 мм, 5 000×75×2 мм, 5 000×110×2,2 мм;
- 8 000×40×6 мм, 8 000×75×2 мм, 8 000×110×2,2 мм.

Расчеты проведены для всех указанных типоразмеров трубопроводов из трех различных материалов:

#### 1. Полипропилен:

- коэффициент Пуассона  $\psi = 0,45$ ;
- модуль упругости  $E = 8,9 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ;
- плотность  $\rho = 946 \text{ кг/м}^3$ .

#### 2. Полиэтилен:

- коэффициент Пуассона  $\psi = 0,42$ ;
- модуль упругости  $E = 11 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ;
- плотность составляет  $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ .

#### 3. Сталь:

- коэффициент Пуассона  $\psi = 0,3$ ;
- модуль упругости  $E = 20 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;
- плотность составляет  $\rho = 7 860 \text{ кг/м}^3$ .

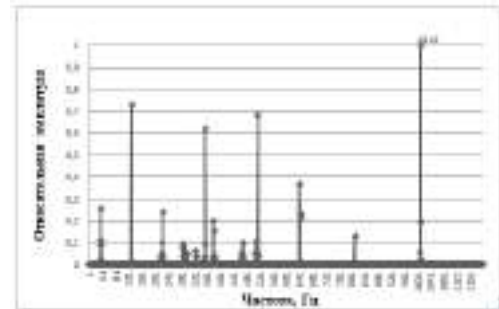
Различная глубина залегания трубопровода и тип грунта моделировались изменением давления на его стенки (рис. 4, таблица).



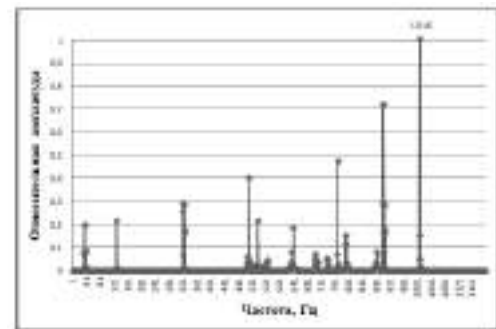
Рис. 4 – Модель трубопровода с приложенным давлением

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ГРУНТА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЕ ЗАЛЕГАНИЯ

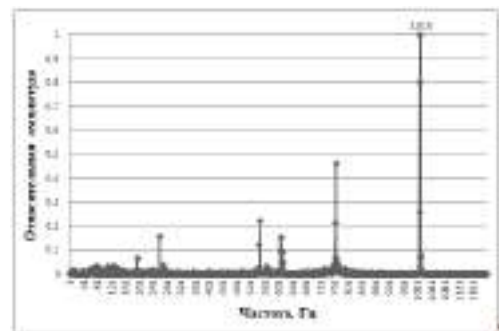
Тип грунта	Глубина залегания, м				
	0,7	1	1,3	2	2,5
Пески: мелкие пылеватые	27,418	39,243	51,068	78,659	98,366
	29,063	41,597	54,131	83,378	104,268
Глины	30,543	43,715	56,889	87,263	109,578
Суглинки	30,49	43,7	56,888	87,624	109,57
Глины тяжелые	31,2	44,66	58,112	89,509	111,935



а



б



в

Рис. 5 – Результаты гармонического анализа трубопроводов из полипропилена: а – 2000×40×6 мм; б – 5000×40×6 мм; в – 8000×40×6 мм

Из спектров, представленных на рис. 5, видно, что информативной частотой для трубопровода является 1 010 Гц, и визуальное представление этой частоты было выведено на экран (рис. 6).

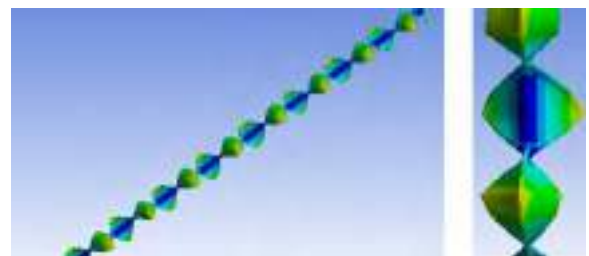
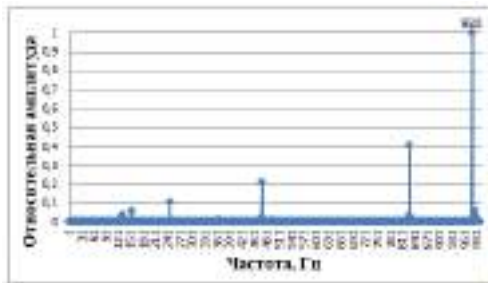
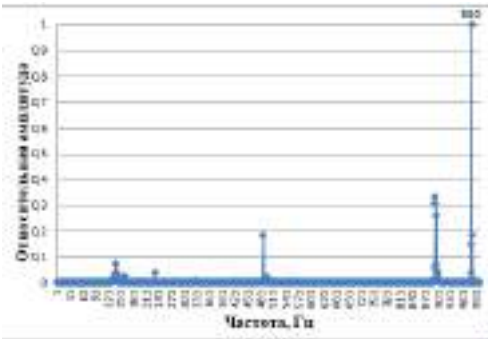


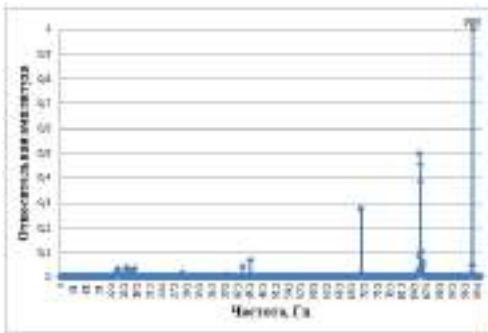
Рис. 6 – Форма колебаний исследуемого трубопровода на частоте 1010 Гц



а

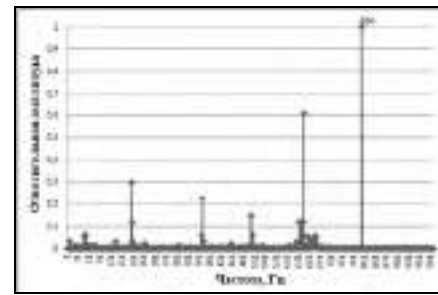


б

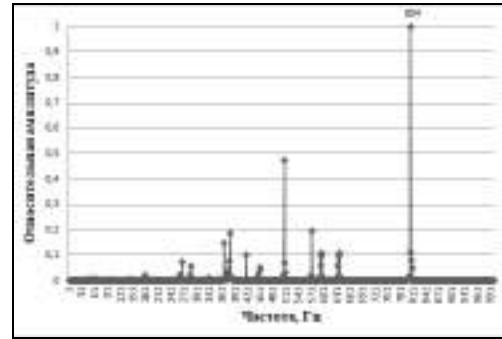


в

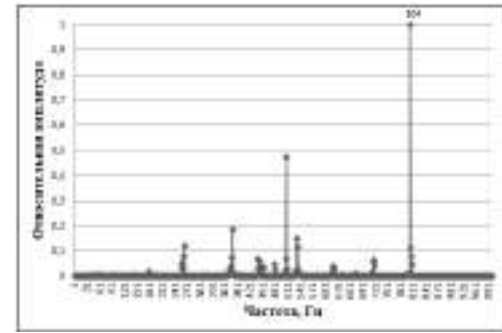
Рис. 6 – Результаты гармонического анализа трубопроводов из полиэтилена: а – 2000×75×2 мм; б – 5000×75×2 мм; в – 8000×75×2 мм



а



б



в

Рис. 7 – Результаты гармонического анализа трубопроводов из стали Ст3: а – 2000×110×2,2 мм; б – 5000×110×2,2 мм; в – 8000×110×2,2 мм

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8 представлены информативные частотные диапазоны контроля местоположения смоделированных трубопроводов различной длины, диаметра и материала.

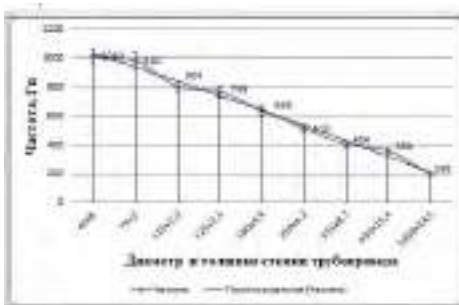


Рис. 8 – Информативные частотные диапазоны контроля местоположения заглубленных трубопроводов

#### Список литературы

- [1] Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Перспективные методы и методики поиска скрытых каналов, полостей и трубопроводов виброакустическим методом // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2015. № 2(47). С. 8–15.
- [2] Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.
- [3] Кондратьев А.Е., Загретдинов А.Р., Гапоненко С.О. Способ определения расположения трубопроводов: пат. 2482515 Рос. Федерация № 2011151380/28; заявл. 15.12.11; опубл. 20.05.13, Бюл. № 14.
- [4] Leontyev N.V. Application of ANSYS system to solve the problems of modal and harmonic analysis. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, 2006. 102 p.
- [5] ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
- [6] ГОСТ Р 52134-2003. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия.
- [7] ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямшовные. М.: Стандартинформ, 2007.

# СМАРТ-ДРАЙВЕР ДЛЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Садыков М.Ф., Галиева Т.Г., Исламова Г.Н.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
Guleni6@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На данный момент актуальна тема энергосбережения, в связи с этим за последние четыре года мировой рынок светодиодного оборудования растет с заметной прогрессией. В данной работе раскрывается решение таких проблем, как продление срока службы светодиодных светильников, импортозамещение комплектующих материалов, доступность интеллектуальной системы освещения.

**Материалы и методы:** Используется микроконтроллер, беспроводная передача данных по протоколу Zigbee, матричный ИК-датчик для точного определения действий человека.

**Результаты:** Создан модуль беспроводной передачи данных, программное обеспечение.

**Выводы:** Предложен недорогой инструмент для организации сетевого управления параметрами искусственного освещения в офисах, производственных и торговых помещениях.

**Ключевые слова:** интеллектуальное освещение, светодиодный светильник, энергосбережение, беспроводная система освещения.

## SMART-DRIVER FOR INTELLIGENT LIGHTING SYSTEM BASED ON MICROCONTROLLER

M. Sadykov, T. Galieva, G. Islamova  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
Guleni6@mail.ru

## Abstract

**Background:** At the moment, the topic of energy saving is topical, in connection with which over the past four years the world market of LED equipment has been growing with a noticeable progression. In this paper, solutions are disclosed for such problems as: extending the service life of LED fixtures, import substitution of component materials, the availability of an intelligent lighting system.

**Materials and Methods:** A microcontroller, wireless data transmission using the Zigbee protocol, a matrix IR sensor for accurate determination of human actions.

**Results:** A wireless data transmission module, software .

**Conclusions:** A low-cost tool for organizing network management of artificial lighting parameters in offices, industrial and commercial premises is offered.

**Key words:** intelligent lighting, LED lamp, energy saving, wireless lighting system.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день энергосбережению и повышению энергетической эффективности уделяют высокое внимание, так как расточительное расходование энергоресурсов достигло грандиозных масштабов. Государство различными способами пытается перейти на энергосберегающие источники освещения. В 2009 г. принят закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» [1], стимулирующий рациональное использование ресурсов.

Переход на светодиодное освещение является одним из самых распространенных способов энергосбережения.

Использование диммируемого освещения позволит повысить энергоэффективность как минимум на 15 % по сравнению с недиммируемым. Наилучшим объектом диммируемого источника излучения является светодиод, так как позволяет производить несколько тысяч переключений в секунду, не влияя на работоспособность и характеристики прибора.

Для повышения энергоэффективности уже диммируемого освещения используется интеллектуальный метод освещения. За последний год доля интеллектуального освещения возросла с 9 до 28 % [2]. Сейчас же актуален вопрос о ее доступности и дальнейшей модернизации.

## II. ЗАДАЧИ

Известно, что долговечность светодиодных светильников зависит от блока питания, а не от самих светодиодов. И поэтому производитель вместо срока службы светодиодов, которые служат дольше, устанавливает срок гарантии, равный сроку работы блока питания приблизительно 5 лет, также можно отметить, что сейчас интеллектуальные системы освещения можно считать устаревшими.

## III. РЕШЕНИЕ

Для решения вышеперечисленных проблем предлагается разработать диммирующий драйвер на основе микроконтроллера, содержащий модуль беспроводной радиосвязи и матричный ИК-датчик освещенности и движения [3]. В отличие от существующей интеллектуальной системы освещения, датчик позволит не только измерять и поддерживать необходимую норму освещения в помещении, но и реагировать на присутствие людей, отличая их от других движущихся предметов, распознавать направление движения, действия человека с целью применения нужного сценария. Беспроводная связь позволит организовать согласованную систему управления освещением [4], анализировать и реагировать на различные изменения в помещении. Уникальность разработки в том, что решения по освещению могут приниматься не только путем человеческого вмешательства через сеть «Интернет», но и коллективным решением самой системы освещения.

Благодаря высокой степени интеграции использованных микросхем можно достичь низкой стоимости продукта, не превышающей стоимость недиммирующего драйвера на 40 %. При этом осветительный прибор подорожает не более чем на 14 %. Драйвер позволит получить недорогой инструмент для организации сетевого управления параметрами искусственного освещения в офисах, производственных и торговых помещениях. Управляемое искусственное освещение по нашим расчетам сократит затраты на электроэнергию до 40 %.

Система способна работать как по предложенному нами сценарию, так и по сценарию, заданному пользователем. Например, поддержание рабочего и дежурного уровня освещенности в зависимости от присутствия или отсутствия людей, включение светильников по направлению движения человека и др.

При фиксации датчиком присутствия человека система будет анализировать направление его движения и принимать дальнейшее решение по освещению. Беспроводная связь по протоколу Zigbee [5] позволит организовать согласованную систему управления освещением, анализировать и реагировать на различные изменения в помещении.

Потенциальными потребителями разрабатываемого продукта могут быть светотехнические компании, способные внедрить в свое производство разработанный драйвер и выпускать на рынке интеллектуальные системы освещения. Также потребителем может быть любая организация, желающая сэкономить на потреблении электроэнергии, затрачиваемой на освещение, либо рядовые граждане, так как разрабатываемый драйвер можно заменить на имеющийся в любом светодиодном светильнике.

На данный момент апробируется программное обеспечение и отлаживается механизм передачи данных с помощью разработанного модуля беспроводной связи [6]. В КГЭУ для этого создана экспериментальная установка, состоящая из 50 светильников со встроенными блоками управления.

## Список литературы

- [1] Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
- [2] Становление и развитие инновационного кластера «Энергоэффективная светотехника и интеллектуальные системы управления освещением» в Республике Мордовии / Федонина О.В. [и др.] // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 18.
- [3] Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники. М.: Изд-во МИИГАиК, 2011.
- [4] Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативного управления открытыми системами: истоки, состояние и перспективы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2.
- [5] Баскаков С. Стандарт ZigBee и платформа MeshLogic: эффективность маршрутизации в режиме «многие к одному» // Первая миля. 2008. Т. 5. № 2-3. С. 32–37.
- [6] Иванова В.Р., Садыков М.Ф. Интеллектуальная система управления искусственным освещением // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 1. № 6. С. 72–74.

# МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ТЕПЛОПРОВОДОВ СИСТЕМ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Кириллова Н.А.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

nadusha\_kirillova\_96@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Методы оценки надежности элементов тепловых сетей, применяемые сегодня, учитывают далеко не все факторы, так или иначе влияющих на надежность их работы. Существует необходимость в методике, учитывающей дополнительные факторы, влияющие на надежность работы теплосети.

**Материалы и методы:** При разработке методики расчета интенсивности отказов применялись методы математической статистики и моделирования. В качестве инструмента моделирования использовалась встроенная среда объектно-ориентированного программирования VBA. Исходными данными являлась статистическая информация об отказах различных участков тепловой сети города Казани.

**Результаты:** Определены функциональные зависимости интенсивности отказов элементов теплосети от дополнительных факторов, таких как: остаточная толщина металла стенки трубопровода, наличие предшествующих порывов на участке, коррозионная активность грунта, наличие или следы затопления участка, пересечение с коммуникациями. Данные зависимости были учтены при модернизации существующей математической модели и разработке компьютерной программы.

**Выводы:** Усовершенствованная методика позволяет по заданным исходным параметрам (протяженность, диаметр, продолжительность эксплуатации трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры, а также дополнительным факторам) рассчитать коэффициенты готовности и вероятности безотказной работы нерезервированных тепловых сетей. Реализация алгоритма программы во встроенной среде объектно-ориентированного программирования VBA максимально упрощает процессы обработки исходных статистических данных.

**Ключевые слова:** децентрализованное теплоснабжение, математическое моделирование, математическая статистика, интенсивность отказов теплопроводов.

# MODERNIZATION OF THE CALCULATION METHOD OF DECENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS FAILURE RATE

N. Kirillova

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russian Federation

nadusha\_kirillova\_96@mail.ru

## Abstract

**Background:** Used today methods for assessing the reliability of heat network elements do not take into account all factors that somehow affect the reliability of their operation. There is a need for a methodology that takes into account additional factors that affect the reliability of the heating network.

**Materials and Methods:** When developing the methodology for calculating the failure rate, methods of mathematical statistics and modeling were used. As a modeling tool built-in environment object-oriented VBA programming used. Statistical information on the failures of various sections of the heat network in the city of Kazan has been used as input data.

**Results:** The functional dependencies of the failure rate of the heating network elements on additional factors, such as the residual thickness of the pipeline wall metal, the presence of previous gusts on the site, the corrosivity of the soil, the presence or traces of flooding of the site, intersection with communications. These dependencies were taken into account when modernizing the existing mathematical model and developing a computer program.

**Conclusions:** The improved technique allows calculating the availability factors and the probability of failure-free operation of non-redundant heating networks based on the given initial parameters (length, diameter, duration of operation of pipelines and shut-off valves, and additional factors). Implementation of the program algorithm in the built-in environment of object-oriented programming VBA simplifies the process of processing input data.

**Key words:** decentralized heat supply, math modeling, math statistics, the intensity of heat pipe failures.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежной работы тепловых сетей является приоритетной задачей в процессе теплоснабжения потребителей теплоты.

Для оценки надежности тепловых сетей предприятием ОАО «Газпром промгаз» разработана методика [1], которая позволяет на основании таких исходных данных, как протяженность, диаметр и продолжительность эксплуатации участков трубопроводов системы, определить коэффициент готовности и вероятность безотказной работы теплосети.

Недостатком такого подхода является то, что при расчетах не учитываются целый ряд факторов, напрямую влияющих на надежность работы теплосети: остаточная толщина металла стенки трубопровода ( $K_1$ ), наличие предшествующих порывов на участке ( $K_2$ ), коррозионная активность грунта ( $K_3$ ), наличие или следы затопления участка ( $K_4$ ), пересечение с коммуникациями ( $K_5$ ).

Задача данной работы – учет всех этих факторов при определении интенсивности отказов трубопроводов тепловой сети, а также при расчете показателей надежности теплоснабжения потребителей. Задача эта решается путем модернизации существующего алгоритма расчета.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В принятой на сегодняшний день методике расчет интенсивности отказов элементов тепловой сети осуществляется следующим образом:

$$\lambda = \lambda^{\text{нач}} \left( 0,1\tau^{\text{экспл}} \right)^{\alpha-1}, \quad (1)$$

где  $\lambda^{\text{нач}}$  – начальная интенсивность отказов 1 км однолинейного теплопровода;  $\tau^{\text{экспл}}$  – продолжительность эксплуатации участка;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий продолжительность эксплуатации участка:

$$\alpha = \begin{cases} 0,8, & 0 < \tau^{\text{экспл}} \leq 3; \\ 1, & 3 < \tau^{\text{экспл}} \leq 17; \\ 0,5 \exp(0,05 \cdot \tau^{\text{экспл}}), & \tau^{\text{экспл}} > 17. \end{cases} \quad (2)$$

В усовершенствованной методике расчет интенсивности отказов элементов тепловой сети производится по формуле:

$$\lambda = \lambda^{\text{нач}} \left( \tau^{\text{экспл}} \right)^{\alpha-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий особенности монтажа и эксплуатации участка трубопровода:

$$\alpha = 0,5 \cdot e^{K_i} = 0,5 \cdot e^{f(K_1;K_2;K_3;K_4;K_5)}. \quad (4)$$

Для оценки влияния каждого коэффициента в (4), был проведен математический анализ статистических данных, предоставленных ОА «Казэнерго».

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании информации о порывах в различных участках тепловой сети города Казани были определены функциональные зависимости (таблица).

ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Наличие факторов	Функциональная зависимость
$K_1$	$K_i = 0,00673 K_1 + 0,954$
$K_1, K_2$	$K_i = 0,00703 K_1 + 0,891$
$K_1, K_3$	$K_i = 0,00664 K_1 + 0,964$
$K_1, K_4$	$K_i = 0,00494 K_1 + 0,949$
$K_1, K_5$	$K_i = 0,00641 K_1 + 0,973$
$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$	$K_i = 0,00689 K_1 + 0,905$

Данные функциональные зависимости были учтены при модернизации существующей математической модели, а также при разработке компьютерной программы на её основе [2].

## Список литературы

- [1] Сеннова Е.В., Кирюхин С.Н. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов. М.: ОАО «Газпром промгаз», 2013. 104 с.
- [2] Программа расчета показателей надежности теплоснабжения потребителей от нерезервированных тепловых сетей: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2017617386 от 4 июля 2017 г.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПУЛЬСАЦИЙ ФАКЕЛА В ТОПКАХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Кравец Э.А., Поздеев В.А., Кулдин Н.А.  
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»  
Петрозаводск, Россия  
kravets-elf@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На значительном количестве паровых котлов тепловых электростанций и котельных наблюдаются пульсации факела в топках. Данные пульсации приводят к нестабильной работе котлов и к погасанию факела. Интерес к данной проблеме вызван не только необходимостью обеспечения устойчивой работы котлов, но и тем обстоятельством, что на одной и той же станции однотипные котлы могут работать по-разному. На одном котле наблюдается устойчивый режим работы, на другом – наблюдаются пульсации факела.

Таким образом, необходим всесторонний анализ причин, вызывающих нестабильный режим работы паровых котлов.

**Материалы и методы:** Использовались методы проектирования газоздушных трактов паровых котлов, газотурбинных установок и авиационных двигателей.

**Результаты:** Определены причины пульсаций факела в топках паровых котлов БКЗ-420-140НГМ4 и ДЕ-25-14ГМ. Разработаны рекомендации по устранению указанных причин и по стабилизации факела в горелках данных котлов.

**Выводы:** Показано, что пульсации факела в топках паровых котлов вызваны, как правило, ошибками проектирования газоздушных трактов и нарушением технологии монтажа. Для устранения причин пульсаций факела в топках паровых котлов предложено использовать методы проектирования газоздушных трактов паровых котлов, газотурбинных установок и авиационных двигателей.

**Ключевые слова:** паровой котел, газоздушный тракт, дутьевой вентилятор, дымосос, пульсации факела, аэродинамическое сопротивление.

# INVESTIGATION OF THE CAUSES OF TORCH PULSATIONS IN THE FURNACES OF STEAM BOILERS

J. Kravec, V. Pozdeev, N. Kuldin  
Petrozavodsk State University  
Petrozavodsk, Russian Federation  
kravets-elf@yandex.ru

## Abstract

**Background:** On a significant number of steam boilers of thermal power plants and boiler-houses, torch pulsations in the furnaces are observed. These pulsations lead to unstable operation of the boilers and to the extinction of the torch. The interest in this problem is caused not only by the need to ensure the stable operation of boilers, but also by the fact that at the same thermal power plant the same type boilers can work in different ways. A stable mode of operation is observed on one boiler, while on the other boiler, torch pulsations are observed. Therefore, it is necessary to obtain a comprehensive analysis of the causes of the unstable operation of steam boilers.

**Materials and methods:** Methods for designing gas-air paths of steam boilers, gas turbine plants and aircraft engines were used.

**Results:** The causes of torch pulsations in the furnaces of steam boilers BKZ-420-140 and DE-25-14 have been determined. The recommendations for eliminating these reasons and for stabilizing the torch in the burners of these boilers have been developed.

**Conclusions:** It is shown that the torch pulsations in the furnaces of steam boilers are caused, as a rule, by errors in the design of gas-air paths and the violation of the installation technology. To eliminate the causes of the torch pulsations in the furnaces of steam boilers, it was suggested to use methods for designing gas-air paths of steam boilers, gas turbine plants and aircraft engines.

**Key words:** steam boiler, gas-air path, blowing fan, smoke exhauster, torch pulsations, aerodynamic drag.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Пульсации факела в топках приводят к нестабильному режиму работы паровых котлов. В одном случае пульсации факела приводят к низкочастотной вибрации котла,

которая передается на все несущие металлоконструкции и даже на щиты управления. В конечном итоге такая вибрация может привести к усталостному разрушению отдельных элементов котла. В другом случае пульсации факела могут приводить к его погасанию. В статье проведе-

по исследованию причин пульсаций факела на двух типах паровых котлов – ДЕ-25-14ГМ и БКЗ-420-140, а также предложены мероприятия по стабилизации фронта пламени в топках указанных котлов.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПУЛЬСАЦИЙ ФАКЕЛА НА КОТЛАХ ДЕ-25-14ГМ

На одной из котельных на котлах ДЕ-25-14ГМ второй очереди наблюдаются пульсации факела в топках, приводящие к его погасанию. На однотипных котлах первой очереди пульсации факела отсутствуют, режим работы котлов стабильный. С целью выяснения причин пульсаций факела был проведен анализ газовоздушных трактов котлов обеих котельных. В ходе анализа установлено, что газовоздушные тракты (ГВТ) котлов второй очереди имеют элементы, генерирующие процессы интенсивного вихреобразования. Образующиеся при протекании рабочей среды вихри являются источниками пульсаций скорости, давления и расхода воздуха и уходящих газов. На котлах первой очереди газовоздушный тракт выполнен более удачно с точки зрения аэродинамики. Ниже приведены отдельные элементы ГВТ котлов второй очереди, в которых происходит интенсивное вихреобразование.

1. Диффузор с большим углом раскрытия (рис. 1). Данный элемент расположен в напорном воздуховоде после дутьевого вентилятора.

Фактический угол раскрытия данного диффузора составляет  $54^\circ$ . Максимальное значение угла раскрытия диффузора, при котором не происходит срыва потока и образования вихрей, составляет  $20^\circ$  [1]. На котлах первой очереди диффузор выполнен с углами раскрытия, не превышающими  $20^\circ$ .

Для стабилизации режима обтекания диффузора и предотвращения срыва потока и образования вихрей, нами было предложено выполнить направляющие лопатки (рис. 2).

Угол поворота потока в каналах между лопатками не превышает  $20^\circ$ . Соответственно будут отсутствовать срывные явления и процессы вихреобразования.

2. Поворот воздушного тракта  $90^\circ$  с острой внутренней кромкой (рис. 3). Данный элемент расположен непосредственно перед горелкой котла.

На острой внутренней кромке происходит интенсивное образование вихрей. С целью исключения пульсаций давления воздуха завод-изготовитель котла сразу после данного элемента установил дырчатый лист (рис. 4). Однако эффективности дырчатого листа для гашения пульсаций воздуха недостаточно. Кроме того, дырчатый лист обладает повышенным аэродинамическим сопротивлением, что, в свою очередь, приводит к перерасходу электроэнергии на привод дутьевого вентилятора.

На однотипных котлах первой очереди указанный поворот выполнен также с острой внутренней кромкой. Несмотря на отсутствие дырчатого листа, пульсации воздуха и факела не наблюдаются. Объясняется это тем, что котлы первой очереди расположены на высоте 5 м относительно рассматриваемого поворота. При высоте воздуховода перед поворотом 300 мм на длине участка после поворота 5 м происходит стабилизация потока воздуха и выравнивание пульсаций давления и расхода воздуха. На котлах второй очереди воздуховод расположен непосредственно под котлом. Расстояние от поворота до горелки не превышает 1,5 м (рис. 5).

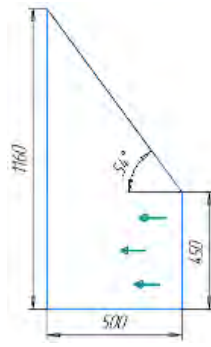


Рис. 1 – Диффузор с большим углом раскрытия

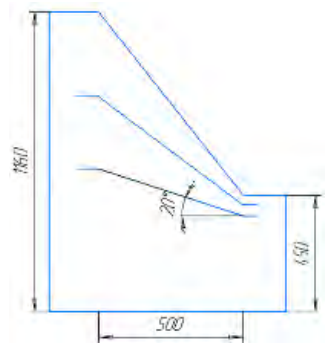


Рис. 2 – Схема диффузора с направляющими лопатками

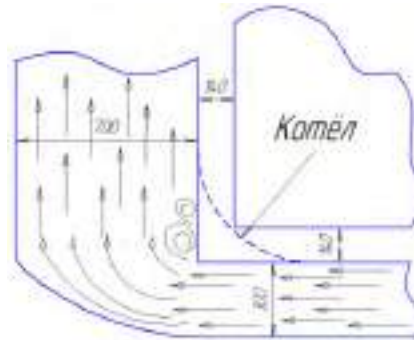


Рис. 3 – Поворот воздушного тракта  $90^\circ$

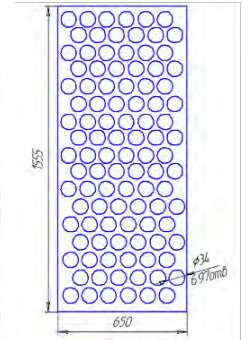


Рис. 4 – Дырчатый лист



Рис. 5. Схема расположения котлов 1-й и 2-й очереди

С целью исключения указанных выше недостатков нами было предложено внутреннюю кромку воздуховода выполнить по радиусу  $R$ , величина которого определяется из выражения [1]:

$$\frac{R}{B} \geq \frac{1}{2},$$

где  $R$  – радиус скругления;  $B$  – высота воздуховода перед поворотом.

В этом случае срыва потока на данном повороте происходить не будет.

## III. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПУЛЬСАЦИЙ ФАКЕЛА НА КОТЛАХ БКЗ-420-140

На одной из ТЭС наблюдаются пульсации факела в топках котлов БКЗ-420-140 (рис. 6). На однотипном котле той же станции пульсации воздуха отсутствуют (рис. 7).

С целью выяснения причин пульсаций проведен анализ газовоздушного тракта всех котлов, а также их горелочных устройств.

В результате анализа ГВТ установлено, что единственным источником пульсаций воздуха и факела является место стыковки напорных воздухопроводов с горелками. На всех



Рис. 6 – Пульсации факела в горелках котла БКЗ-420-140



Рис. 7 – Стабильный режим горения на котле БКЗ-420-140

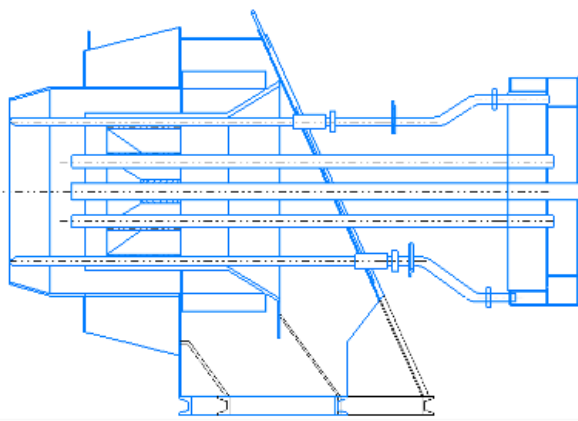


Рис. 8 – Схема горелки ГМУ-45М

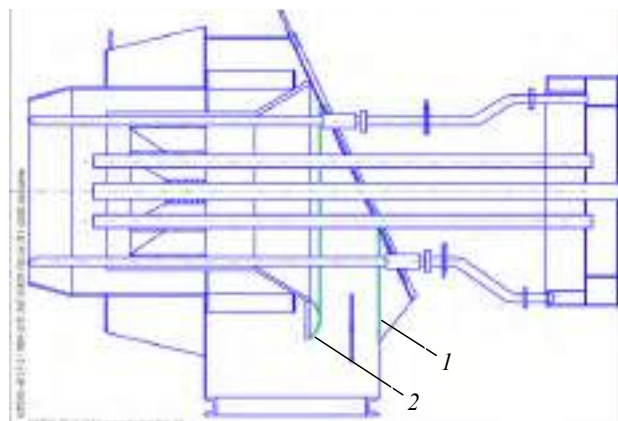


Рис. 9 – Схема установки обтекателей на горелке:  
1 – аэродинамический обтекатель; 2 – лемнискатный профиль

котлах установлены горелки ГМУ-45М. Вследствие конструктивных особенностей котлов монтаж горелок и их стыковка с воздуховодами были выполнены с незначительным изменением их конструкции. В соответствии с проектом подвод воздуха к горелкам производится под углом около  $60^\circ$  к оси горелки. После монтажа и изменения горелок угол подвода воздуха составляет  $90^\circ$ . На острых краях горелки возникают вихри, вызывающие пульсации давления и расхода воздуха (рис. 8). Для стабилизации потока воздуха нами были предложены следующие мероприятия (рис. 9):

- 1) на наружной стенке горелки смонтировать аэродинамический обтекатель;

- 2) на внутреннем канале горелки смонтировать аэродинамический обтекатель с лемнискатным профилем.

Лемнискатный профиль широко используется в газотурбинных установках и авиационных двигателях для обеспечения безотрывного подвода воздуха к компрессору [2].

Указанные мероприятия должны стабилизировать поток воздуха в горелке и, как результат, устранить пульсации факела в топке котлов.

#### Список литературы

- [1] Аэродинамический расчет котельных установок (Нормативный метод). Л.: Энергия, 1977. 256 с.
- [2] Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок экранопланов. СПб: Судостроение, 2011.

# СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА БАЛАНСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Ларионова А.А., Егоров А.О., Люханов Е.А.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия

a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com, ealuhanov@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Одной из приоритетных задач электроэнергетической отрасли является снижение потерь электроэнергии при её передаче и распределении. Решение этой задачи во многом зависит от оснащённости электросетевых компаний современными автоматизированными информационно-измерительными системами коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ). Высокую значимость проблема высоких потерь имеет для сетей 110, 35 кВ и ниже, где уровень потерь может достигать 10 % и более. Отслеживание динамики потерь электроэнергии возможно при наличии АИИС КУЭ генерирующих и электросетевых компаний, а также потребителей, являющихся субъектами оптового рынка электроэнергии. Все системы АИИС КУЭ работают на часовых интервалах времени. Такие системы позволяют вести оперативный контроль профилей графиков нагрузки и объёмов расхода электроэнергии.

**Материалы и методы:** Основным средством контроля достоверности расходов электроэнергии и исправности системы учёта электроэнергии является балансовый метод. Расходы электроэнергии, полученные от АИИС КУЭ, используются для расчёта балансов электроэнергии по контролируемому объекту, в основном, для месячных интервалов времени. На основе электрической схемы исследуемой сети и паспортных данных силового оборудования, выполняется построение геометрического профиля графиков нагрузки, выполняется оперативный расчёт потерь электроэнергии, рассчитываются технические и коммерческие потери электроэнергии, рассчитываются фактические и допустимые небалансы. Результаты оформлены в наглядный интерфейс, позволяющий оперативно принимать решения о достоверности коммерческих данных и исправности системы учёта электроэнергии.

**Результаты:** Выявлены интервалы времени, на которых система учёта работала исправно, выявлены небалансы электроэнергии. Все небалансы имеют привязку по месту и времени. В формате инфографики выполнен трёхуровневый прототип части системы контроля метрологических характеристик АИИС КУЭ.

**Выводы:** Оперативный расчёт баланса и потерь электроэнергии на часовых и менее интервалах времени позволяет своевременно выявлять неисправности в системах АИИС КУЭ и принимать меры по их устранению.

**Ключевые слова:** коммерческий учёт, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии, устранение коммерческих потерь электроэнергии.

## ON-LINE MONITORING SYSTEM OF ELECTRICAL ENERGY BALANCE OF ELECTRIC NETWORKS ENTERPRISE OBJECTS

A. Larionova, A. Egorov, E. Luhanov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
Ekaterinburg, Russian Federation

a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com, ealuhanov@yandex.ru

## Abstract

**Background:** One of the priority objectives in power industry is to reduce transmission and distribution energy losses. The solution for this problem depends largely on the electric utility company equipment featured by the modern AMR systems. The problem associated with the high level of energy losses is of great importance to networks of 110 kV, 35 kV and lower nominal voltage, where the level of losses can reach 10 % or more. Monitoring of the rate at which energy losses change is possible in the presence of AMR systems of generating and electric utility companies, as well as AMR systems of consumers sharing the wholesale electricity market. All AMR systems operate at hourly intervals. Some market users have an opportunity to receive electricity bills from the AMR systems operating with a cycle of 30 and 15 minutes. Such systems can monitor the load profiles and amount of energy consumption. But in case of failure of individual components of AMR systems, there are no means to detect malfunctions of its components and the validity of the information.

**Materials and Methods:** The basic method to monitor the validity of the information about the amount of energy consumed and correct operation of the energy metering system is the balance method. The electricity bills received from the AMR system are used to calculate the energy balance of the electric utility in question, mainly at monthly intervals. On the basis of the electrical circuit diagram of the network under study and the datasheet ratings of the power equipment the load profile is plotted, the energy losses, including losses associated with revenue metering, are calculated, the actual and permissible non-balance rates are calculated. The results are presented in a visual form via the interface that allows you to make decisions about the validity of the information received from the revenue metering and correct operation of the energy metering system in a quick manner.

**Results:** The intervals at which the energy metering system operates correctly were identified, the energy unbalance was detected. All the unbalances detected correspond to the specific place and time. The three-level prototype of the control system of metrological characteristics of AMR system was developed via infographics.

**Conclusions:** Calculation of energy balances and losses at hourly and shorter intervals in a rapid manner allows to detect malfunctions in AMR systems in a timely manner and to take measures to correct them.

**Key words:** revenue metering, automated information and revenue metering system, elimination of the energy losses associated with revenue metering.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Снижение объёмов переучёта электроэнергии на присоединениях электростанций и снижение объёмов недоучёта электроэнергии на присоединениях потребителей является важной частью задачи снижения потерь электроэнергии в сетях 110 и 35 кВ. Решение этой задачи возможно на основе классических методов баланса электроэнергии [1]. По [1] рекомендуется расчёт балансов электроэнергии проводить для месячных интервалов времени. Однако современное информационное оснащение задачи баланса электроэнергии позволяет решать эту задачу для часовых и менее интервалах времени, что серьёзно повышает эффективность задачи поиска очагов коммерческих потерь. Однако в настоящее время эта задача остаётся нерешённой. Также отсутствуют системы мониторинга, позволяющие контролировать достоверность измерительной информации от систем АИИС КУЭ всех субъектов рынка электроэнергии одновременно. На основе данных систем АИИС КУЭ, установленных на энергообъектах, осуществляются взаиморасчёты между субъектами рынка электрической энергии. Важно изыскать возможность применить такую высокодискретную информацию и вести контроль классической задачи расчёта баланса электроэнергии для часовых и менее интервалов времени.

## II. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При обработке расходов электроэнергии, поступивших от систем АИИС КУЭ и имеющих часовую дискретность, становится возможным оперативный (динамический) мониторинг показателей баланса электроэнергии. Это также позволяет вести видать исправные и неисправные измерительные комплексы электроэнергии (ИКЭЭ). Также важно визуализировать все параметры баланса электрической энергии во времени на мониторе диспетчера, что позволяет повысить эффективность всей АИИС КУЭ и встроить в неё систему контроля и проверки достоверности расходов электроэнергии.

В качестве исследуемой электрической сети выбран фрагмент, который обслуживает электросетевая компания, входящая в состав Объединённой энергосистемы Урала (ОЭС Урала). Воздушная линия электропередачи 110 кВ, состоящая из одной цепи и выполненная проводом с сечением АС-185, длина по трассе 13,3 км, обеспечивает транспорт электроэнергии от электростанции Макаровская ТЭЦ с установленной мощностью 420 МВт до ПС 110/35/6 кВ Промплощадка. На ПС 110/35/6 кВ установлен понижающий трёхобмоточный трансформатор 110/35/6 кВ мощностью 1×25 МВА, от шин низшего напряжения которого питается крупный промышленный металлургический потребитель (рис. 1).

Макаровская ТЭЦ-3 является субъектом оптового рынка электроэнергии, на её присоединениях установлены ИКЭЭ, работающие в составе системы АИИС КУЭ. ОРУ 110 кВ Макаровской ТЭЦ-3 находится на балансе

генерирующей компании. ПС 110/35/6 кВ находится на территории промышленного металлургического предприятия, вся ПС находится на балансе потребителя. На вводах низшего напряжения 35 и 6 кВ трансформатора установлены ИКЭЭ коммерческого учёта, которые входят в состав АИИС КУЭ потребителя. На отходящих фидерах 35 и 6 кВ установлены ИКЭЭ технического учёта электроэнергии (не входят в состав АИИС КУЭ). На балансе электросетевой компании, обеспечивающей транспорт электроэнергии, находится ВЛ-110 кВ «Макаровская ТЭЦ-3 – Промплощадка-2» (рис. 2).

На отпускающей электроэнергию в сеть электростанции установлен ИКЭЭ коммерческого учёта электроэнергии, который входит в состав АИИС КУЭ генерирующей компании. На вводах 35 и 6 кВ понижающего трансформатора 25 МВА установлены ИКЭЭ коммерческого учёта, которые входят в состав АИИС КУЭ промышленного потребителя. Итого на исследуемом фрагменте электрической сети установлены 3 ИКЭЭ коммерческого учёта. Все ИКЭЭ отвечают требованиям коммерческого учёта электроэнергии [3], в их составе установлены ТТ, ТН, КЛ и счётчики с классом точности 0,5 и 0,5S. Также на отходящих фидерах шин 35 и 6 кВ установлены ИКЭЭ технического учёта. От секции шин 35 кВ отходят 2 фидера, от секции шин 6 кВ отходят 8 фидеров 6 кВ. В составе ИКЭЭ технического учёта установлены трансформаторы тока и напряжения (ТТ и ТН), кабельные линии (КЛ) и счётчики с классом точности 0,5. Итого в составе систем АИИС КУЭ генерирующей компании и промышленного потребителя установлены 3 ИКЭЭ коммерческого и 10 ИКЭЭ технического учёта электроэнергии.

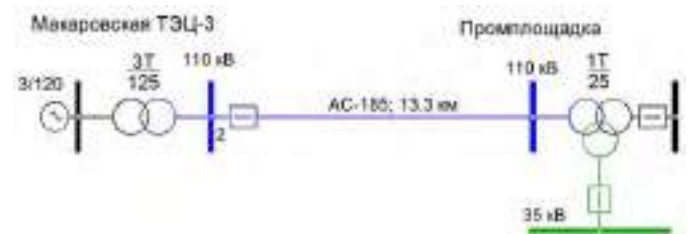


Рис. 1 – Схема электрических соединений исследуемой сети



Рис. 2 - Схема расстановки измерительных комплексов коммерческого и технического учёта электроэнергии в исследуемой электрической сети: красный – коммерческий, зелёный – технический учёт электроэнергии



Рис. 3 – Схема расстановки и привязки измерительных комплексов коммерческого и технического учёта электроэнергии в составе АИИС КУЭ в исследуемой электрической сети

Все собственники ИКЭЭ коммерческого учёта обеспечивают импорт данных на сервер местной энергосбытовой компании, к данным о расходах электроэнергии электросетевая компания имеет доступ. Также в добровольном порядке и в рамках партнёрских отношений с электросетевой компанией промышленный потребитель обеспечивает импорт данных о расходах электроэнергии от ИКЭЭ технического учёта (рис. 3).

Вся информация о расходах электроэнергии на присоединениях исследуемой электрической сети формирует виртуальную АИИС КУЭ электросетевой компании, все ИКЭЭ в составе которой имеют свои идентификаторы (голубой цвет), по которым все расходы электроэнергии имеют привязку ко времени и месту установки в схеме электрической сети (оранжевый и зелёный цвет). На основе [1] составленный месячный баланс имеет следующие показатели:

1. При отпуске электроэнергии от электростанции ВЛ-110 кВ в объёме 13 852 344 кВт·ч, при приёме электроэнергии на секции шин 35 и 6 кВ расход электроэнергии коммерческими ИКЭЭ зафиксирован на втором уровне в объёме 13 585 845 кВт·ч. На третьем уровне на отходящих фидерах 35 и 6 кВ расход электроэнергии, зафиксированный техническими ИКЭЭ, составил 13 589 258 кВт·ч.
2. За отчётный месяц потери по ВЛ-110 кВ и трансформатору составили 266 499 кВт·ч (+1,92 %). Расчётные потери по секции шин 35 кВ составили –3 402 кВт·ч (–0,02 %). Расчётные потери по секции шин 6 кВ составили –11 кВт·ч (–0,07 %).

Значительный научный и практический интерес представляет баланс электроэнергии, составляемый для меньших расчётных интервалах времени. Так, отчётный месяц поделён на двухнедельные отрезки времени и для первой половины месяца составлен развёрнутый баланс (таблица) в строгом соответствии с [1].

Данные о расходах электроэнергии по [1] признаются достоверными, если выполняется соотношение:

$$|НБ_{ф}| \leq НБ_{доп} \quad (1)$$

Сам факт низких отчётных и технических потерь на уровне 1,97 и 1,17 % является хорошим показателем. Также выполняется соотношение (1), поэтому в целом баланс за отчётные две недели является хорошим, а системы АИИС КУЭ электростанции и промышленного потребителя можно признать исправными.

№	Параметр	Обозначение	Значение, кВт·ч	%
<b>1.</b>	<b>Поступление в сеть, в т.ч.:</b>	$W_{ПЭ}$	6 498 008,00	
1.1	от электростанций	$W_{Г}$	6 498 008,00	
1.2	от смежных сетевых компаний	$W_{ЭС}$	0,00	
<b>2.</b>	<b>Отпущено из сети</b>	$W_{ОС}$	0,00	
<b>3.</b>	<b>Сальдо по сети</b>	$W_{СЭ}$	6 498 008,00	
<b>4.</b>	<b>Полезный отпуск, в т.ч.:</b>	$W_{ПОЭ}$	6 369 893,93	
4.1	отпуск потребителям	$W_{ОП}$	6 368 742,92	
4.2	собственные нужды	$W_{СН}$	1 151,02	
4.3	производственные нужды	$W_{ПН}$	0,00	
4.4	хозяйственные нужды	$W_{ХН}$	0,00	
<b>5.</b>	<b>Отчётные потери</b>	$\Delta W_{ОТЧ}$	+128 114,07	+1,97
<b>6.</b>	<b>Технические потери</b>	$\Delta W_{ТЕХ}$	+75 866,08	+1,17
6.1	потери в трансформаторах	$\Delta W_{ТР}$	+42 782,32	+0,66
6.2	потери в линиях	$\Delta W_{ВЛ}$	+33 052,76	+0,51
<b>7.</b>	<b>Коммерческие потери</b>	$\Delta W_{КОММ}$	+52 247,99	+0,80
<b>8.</b>	<b>Фактический небаланс</b>	$НБ_{факт}$	+52 247,99	+0,80
<b>9.</b>	<b>Допустимый небаланс</b>	$НБ_{доп}$	±87 500,54	±1,35
<b>10.</b>	<b>Нормативные потери</b>	$\Delta W_{НОРМ}$	+163 366,62	+2,51

Интегральный развёрнутый баланс электроэнергии имеет недостатки, связанные с невозможностью идентифицировать интервалы времени, в которых проводились оперативные переключения, а также невозможностью идентифицировать моменты хищения электрической энергии. Поэтому рекомендуемый инструкцией [1] алгоритм необходимо применить для расчётных интервалов времени в один час, а для расчёта потерь мощности применить [3]. Для баланса за две недели используется всего 3 измерения, для расчёта динамического баланса с применением почасовых расходов использованы  $3 \times 24 \times 16 = 1152$  измерения.

### III. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАЛАНСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

По параметрам схемы замещения объекта [4, 5] и данным систем АИИС КУЭ производится расчёт показателей баланса ЭЭ по [1] в три этапа, на основе которых далее формируется трёхуровневая система контроля. Расчёт динамического баланса с почасовой дискретностью производится на основе коммерческих ИКЭЭ, технические ИКЭЭ не используются:

- 1) построение и визуализация профилей электроэнергии по суммарному приёму и отдаче;
- 2) расчёт и визуализация состава отчётных потерь ЭЭ с выделением их структуры и делением на технические и коммерческие потери;
- 3) сравнение фактического и допустимого небаланса по исследуемой электрической сети.

**Уровень 1.** Контроль геометрии профиля графиков выдачи мощности электростанции и графика нагрузки промышленного потребителя производится путём их простого совмещения. Совпадение их геометрии при наложении друг на друга показывает отсутствие серьёзных влияний и воздействий на них (рис. 3). Красным цветом отмечен приём в ВЛ-110 кВ от электростанции, зелёным цветом отмечено суммарный расход электроэнергии по вводам 35 и 6 кВ на вводах трансформатора. Также на данном этапе можно визуально оценить величину отчётных потерь электроэнергии (разница между красным и зелёным графиками) и выявить времена оперативных переключений на объекте.

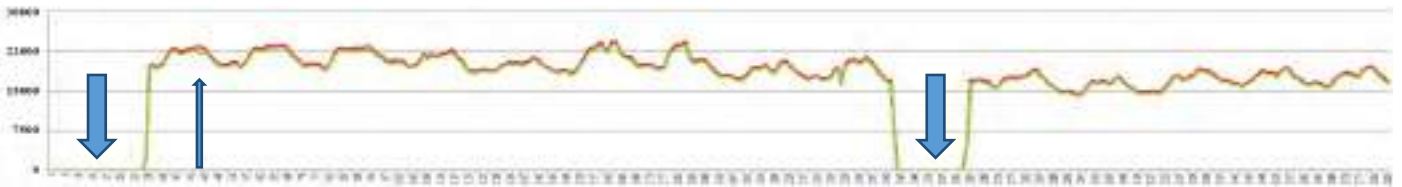


Рис. 4 – Уровень контроля 1. Контроль геометрии профилей почасовых графиков нагрузки

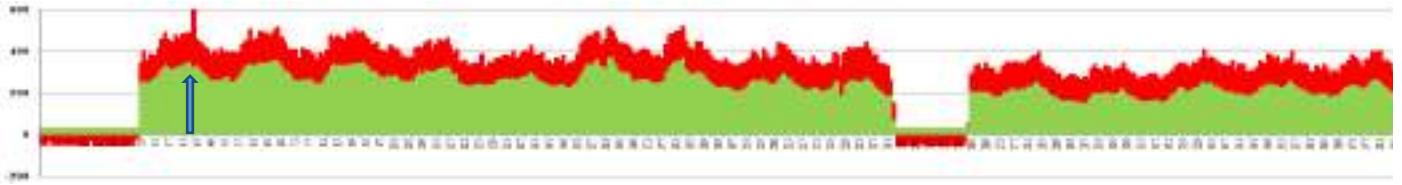


Рис. 5 – Уровень контроля 2. Расчёт отчётных потерь электроэнергии с делением на технические (зеленый) и коммерческие (красный) потери

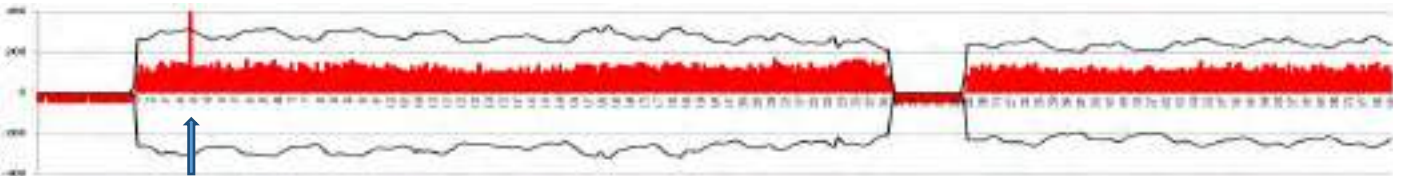


Рис. 6 – Уровень контроля 3. Расчёт фактического (красный) и допустимого (чёрный) небалансов электроэнергии

**Уровень 2.** Полученные от АИИС КУЭ для каждого часа расходы электроэнергии характеризуют установившийся режим на каждый час, в течение которого фиксируются значения отчётных, технических потерь и коммерческих потерь электроэнергии [1]. Последние, как фактический небаланс, рассчитываются как разница отчётных и технических потерь. Наличие фактического небаланса говорит о несовершенстве метрологических характеристик системы АИИС КУЭ, а также о возможных недобросовестных действиях субъектов рынка (рис. 5). Величина объёмов возможных хищений электроэнергии наглядно может быть оценена красной зоной как разница отчётных и технических потерь электроэнергии согласно инструкции [1] и соотношению (5).

**Уровень 3.** Измерительные трансформаторы тока и напряжения, соединительные кабели и счётчики электроэнергии, входящие в состав ИКЭЭ, обладают своими метрологическими погрешностями, которые формируют результирующий класс точности ИКЭЭ. На основе паспортов-протоколов ИКЭЭ по [1, 4], становится возможным оценить величину допустимого небаланса, которую становится возможным сравнить по (1) с величиной фактического небаланса электроэнергии на часовых интервалах времени. В случае превышения фактического небаланса над допустимым можно сделать вывод о наличии сверхнормативных потерь электроэнергии, обусловленных её хищением.

#### IV. КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ

Контроль достоверности динамических показателей баланса электроэнергии выполняется по типовым соотношениям [1], но с отслеживанием их почасовой динамики. Первым соотношением, характеризующим достоверные данные учёта, является соотношение, когда отчётные потери не превышают нормативные:

$$\Delta W_{\text{отч}} \leq \Delta W_{\text{норм}}; \quad (2)$$

$$\Delta W_{\text{норм}} = \Delta W_{\text{тех}} + \text{НБ}_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Вторым соотношением, на основе которого можно судить об условной достоверности учёта, является соотношение (3). В состав отчётных потерь входят технические и коммерческие потери и для контроля достоверности расходов электроэнергии целесообразно использовать соотношение:

$$\Delta W_{\text{комм}} \ll \Delta W_{\text{тех}}. \quad (4)$$

Об отсутствии хищений электроэнергии, т. е. об отсутствии коммерческих потерь, является их непревышение над допустимым небалансом, который определяется классами точности ИКЭЭ согласно [1]:

$$\Delta W_{\text{отч}} = \Delta W_{\text{тех}} + \Delta W_{\text{комм}}; \quad \Delta W_{\text{комм}} \leq \text{НБ}_{\text{доп}}. \quad (5)$$

Третьим соотношением, на основе которого можно судить об условной достоверности расходов электроэнергии, является соотношение (1) или его форма:

$$\Delta W_{\text{комм}} \leq \text{НБ}_{\text{доп}}. \quad (6)$$

Отслеживание почасовой динамики параметров баланса электроэнергии по [1], расходов электроэнергии по трёхуровневой системе и по соотношениям (2)–(5) в численном и графическом виде позволяет создать прототип системы принятия решений, отслеживающих динамику метрологических характеристик системы АИИС КУЭ на межповерочных интервалах времени её функционирования. Указанный формат является прототипом перспективной инфографики системы АИИС КУЭ, которая должна отображаться на мониторе диспетчера для принятия оперативных решений (рис. 4–6). Широкими стрелками на рисунках отмечены интервалы времени, на которых выполнялись оперативные переключения, узкими стрелками – зафиксированные значительные небалансы электроэнергии на часовых интервалах времени.



## У. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе расчёта показателей баланса электроэнергии и перехода к часовым расчётным интервалам времени были выявлены оперативные переключения и фактические небалансы, превышающие допустимые. В целом на исследуемом интервале времени соотношения (2)–(6) почти соблюдаются, что говорит об исправности систем АИИС КУЭ, но есть часы, когда величина фактического небаланса локально превышает допустимый небаланс. С одной стороны применение часовых интервалов времени для формирования баланса электроэнергии увеличивает влияние метрологической погрешности измерительных приборов в составе ИКЭЭ. А с другой стороны, позволяет вести оперативный контроль показателей баланса с учётом топологии сети в том числе. Таким образом, на основе данных системы оперативного мониторинга расходов электроэнергии становится возможным осуществлять динамический контроль баланса электроэнергии сетевого предприятия и по отдельным линиям электропередачи

в её составе. Перспективным развитием этого формата инфографики является привлечение расчётов с применением ИКЭЭ технического учёта с расчётом динамических фактических и допустимых небалансов электроэнергии по секциям шин низшего напряжения подстанций.

### Список литературы

- [1] РД 34.09.101-94. Типовая инструкция по учёту электроэнергии при её производстве, передаче и распределении. М Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
- [2] Раздел XII. Организация коммерческого учёта электрической энергии на оптовом рынке электроэнергии: постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 1172.
- [3] Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям: приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326.
- [4] Паздерин А.В., Егоров А.О. Балансы и потери электрической энергии: метод. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2008.
- [5] Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. 6-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012.

# ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАСОСОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Логунов А.В., Копырин В.А.  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»  
Тюмень, Россия  
kopyrinva@gmail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Магнитогиродинамические насосы для добычи углеводородов могут найти широкое применение в нефтедобывающей промышленности в связи с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов. Использование в основе своей работы магнитогиродинамического эффекта позволяет применять такой негативный фактор, как повышенное содержание солей в пластовой жидкости, с пользой. Тем не менее, в настоящее время вопрос об энергетической эффективности применения магнитогиродинамических насосов для добычи нефти не рассмотрен.

**Материалы и методы:** Использовались основные положения и законы теоретических основ электротехники.

**Результаты:** Получены поверхности функции энергетического эффекта от использования магнитогиродинамических насосов в сравнении с установками электроцентробежных насосов для различных параметров погружных установок.

**Выводы:** Установлено, что при использовании МГД насосов наблюдается снижение потребляемой активной мощности погружной установки для добычи нефти во всем диапазоне изменения мощности погружной установки, длин и сечений кабельной линии. Расчетный показатель энергетической эффективности варьируется от 1,1 до 19,2 %.

**Ключевые слова:** добыча нефти, магнитогиродинамический насос, электроцентробежный насос.

# EVALUATION OF ENERGETIC EFFICIENCY OF APPLICATION OF MAGNETOHYDRODYNAMIC PUMPS FOR HYDROCARBON PRODUCTION

A. Logunov, V. Kopyrin  
Industrial University of Tyumen  
Tyumen Russian Federation  
kopyrinva@gmail.ru

## Abstract

**Background:** Magnetohydrodynamic pumps for hydrocarbon production can be widely used in the oil production industry due to the increase in the proportion of difficult-to-extract reserves. The use of the magnetohydrodynamic effect on the basis of its operation makes it possible to apply such a negative factor, as the increased salt content in the formation fluid, with use. However, at present, there is no concern about the energy efficiency of the magnetohydrodynamic questions for the production of oil.

**Materials and methods:** The basic positions and laws of theoretical bases of electrical engineering have been used.

**Results:** The surface of the function of the energetic effect on the use of the magnetohydrodynamic pumps is obtained as compared with the installations of the electric centrifugal pumps for the different parameters of the submerged plants.

**Conclusions:** It has been found that when MHD Pumps are used, there is a reduction in the consumed active power by the submersible oil production plant throughout the range of the submersible plant power variation, lengths and sections of cable line. The calculated energy efficiency factor varies from 1,1 to 19,2 %.

**Key words:** oil production, magnetohydrodynamic pump, electric centrifugal pump.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных, быстро меняющихся условиях нефтяного рынка задача повышения надежности и энергоэффективности нефтедобывающего оборудования является одной из наиболее приоритетных в области развития топливно-энергетического комплекса России. На сегодняшний день свыше 80 % нефти в нашей стране добывается

установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), которыми оборудовано порядка 65 % действующего фонда нефтедобывающих скважин [1]. Безотказность работы УЭЦН зависит от многих факторов, и в первую очередь от скважинных условий. Нарботка на отказ УЭЦН в среднем составляет 500–700 суток и при эксплуатации в осложненных условиях может снижаться до 30–90 суток.

В качестве основных причин отказов погружного оборудования при механизированной добыче нефти установками электроцентробежных насосов выделяют следующие [2–4]:

- засорение механическими примесями – 63 %;
- коррозия УЭЦН и насосно-компрессорных труб (НКТ) – соответственно 10 и 14 %;
- солеотложение – 12 %;
- асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) – 1 %.

Таким образом, одной из наиболее серьезных причин отказов УЭЦН является солеотложение на рабочих органах насоса.

Основным источником выделения солей является вода, которая добывается совместно с нефтью. Процесс солеотложения непосредственно связан со значительным перенасыщением водной среды труднорастворимыми солями за счет изменения физико-химических параметров системы добычи нефти (температуры, давления, выделения газа, концентрации осадкообразующих ионов и т. д.) [5]. Интенсивное отложение солей на рабочих колесах электроцентробежного насоса происходит из-за повышения температуры потока добываемой жидкости, которое вызвано теплоотдачей работающего погружного электродвигателя.

При интенсивном процессе солеотложения или при эксплуатации низкопроизводительных насосов с минимальным размером проходных каналов, а также при некачественном мониторинге работы скважин возможно возникновение механического клина насоса или отказа УЭЦН от перегрева погружного электродвигателя [6]. При отказе установки электроцентробежных насосов затраты на спускоподъемные операции и последующий ремонт могут достигать стоимости новых установок.

Существующие методы борьбы с солеотложением можно разделить на три вида: химический (применение химических реагентов-ингибиторов); физический (воздействие на добываемую жидкость магнитным полем) и технологический (комплекс мероприятий, направленный на ограничение притока пластовых вод, и специальная водоподготовка).

Химический метод направлен на предотвращение солеотложения при помощи ингибиторов, например триполифосфат натрия ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ) гексаметафосфат натрия ( $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{20}$ ), как в чистом виде, так и с добавлением присадок. Вещество ингибитора сорбируется кристаллами солей, в результате чего на их поверхности образуется коллоидная оболочка, которая препятствует прилипанию кристаллов друг к другу и к поверхности оборудования. В некоторых случаях применяются кислоты, но данный способ имеет существенный недостаток – усиленная коррозия оборудования. Для борьбы с солевыми отложениями на оборудовании применяются композитные составы из различных ингибиторов, растворов кислот и ПАВ, сиолов.

Физический метод заключается в обработке воды магнитным полем. При данном методе создаются условия, исключающие образование крупных кристаллов солей, в результате образуется большое количество мелких кристаллов, которые затем выпадают в виде аморфного шлама, легко удаляемого потоком жидкости.

Технологический метод предполагает комплекс мероприятий, направленный на исключение или ограничение возможности смешения химически несовместимых вод,

так как в результате такого смешения появляются условия для повышенного солеобразования, а также специальную подготовку воды для использования в системе поддержания пластового давления (ППД). Последняя направлена на сдвиг карбонатного равновесия в ионную сторону. Для этого увеличивают давление в системе, вводят свободный диоксид углерода (т. е. повышают парциальное давление  $\text{CO}_2$ ) или подкачивают в скважину пресную воду (непрерывный подлив на забой и периодический) [7].

Наряду с достоинствами данные методы имеют и существенные недостатки: химический – высокая токсичность реагентов и необходимость в специальном дозирующем оборудовании; физический – сложно предсказуемый эффект воздействия, зависящий от многих условий; технологический – высокие трудозатраты и необходимость в создании специального хозяйства, что опять же влечет высокие финансовые затраты.

Для повышения эксплуатационной надежности и энергоэффективности погружных насосных установок добычи нефти авторами предлагается использовать магнитогидродинамические насосы (МГД-насосы), в основу работы которых положен магнитогидродинамический эффект.

Исследованием возможности применения данного эффекта в промышленности и других областях народного хозяйства активно занимались в 50–70-е годы прошлого столетия. Впервые магнитогидродинамический эффект был упомянут еще в работах М. Фарадея в 1832 году. Его исследования, как и большинство дальнейших работ по изучению этого эффекта учеными, были в области разработки установок для получения электроэнергии, но, как известно, магнитогидродинамический эффект является обратимым и может использоваться для перекачивания электропроводящих жидкостей и газов.

В настоящее время МГД-насосы находят применение в металлургии для перемещения расплавленного металла, в судостроении, в качестве движителей морских судов, и в установках атомной энергетики.

Простейший магнитогидродинамический насос включает, по меньшей мере, два электрода (разной полярности) и постоянные магниты. При этом электроды по отношению к магнитам рекомендуются располагать таким образом, чтобы линии магнитной индукции были направлены перпендикулярно протеканию электрического тока между электродами, при данном расположении обеспечивается максимальный коэффициент полезного действия (рис. 1).

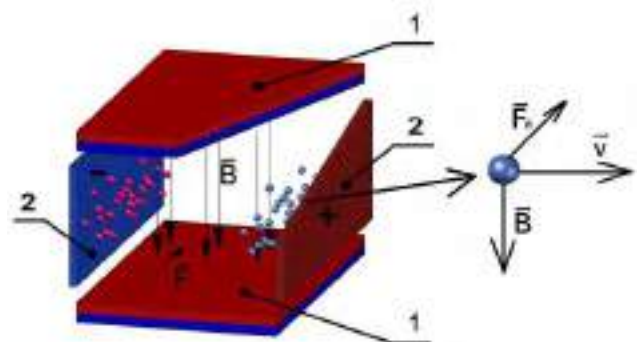


Рис. 1 – Простейшая конструкция магнитогидродинамического насоса: 1 – постоянные магниты; 2 – электроды;  $\vec{F}_L$  – сила Лоренца;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{v}$  – вектор скорости потока жидкости

Для работы в реальных скважинных условиях авторами была разработана модульная конструкция, которая может быть реализована в любом габарите существующего погружного оборудования (100, 103, 117, 130 мм и т. д.) и удовлетворяет следующим условиям работы: температура добываемой жидкости до 80 °С, а при использовании специальных магнитов – до 180 °С; давление до 40 МПа или в соответствии с требованиями нефтедобывающего предприятия.

Целью публикации является оценка энергетической эффективности применения магнитогидродинамических насосов для добычи нефти, путем их сравнения с установками электроцентробежных насосов.

## II. ТЕОРИЯ

МГД-насос работает следующим образом. При подаче постоянного напряжения на электроды в жидкости, представляющей раствор солей, кислот, нефти и т. д., происходит диссоциация солей на ионы (в качестве примера принимается водорастворимая соль хлорид натрия NaCl). Под действием напряженности электрического поля отрицательно заряженные анионы хлора Cl<sup>-</sup> двигаются в сторону положительно заряженного электрода (анода), а положительно заряженные катионы натрия Na<sup>+</sup> в сторону отрицательно заряженного электрода (катода).

При движении анионов хлора к положительно заряженному электроду (аноду) на них действует сила Лоренца, определяемая по выражению:

$$\vec{F}_л = q\vec{v}\vec{B} \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд, Кл;  $\vec{v}$  – скорость, м/с;  $\vec{B}$  – магнитная индукция, Тл;  $\alpha$  – угол между векторами скорости и магнитной индукции.

Согласно правилу левой руки, сила Лоренца направлена перпендикулярно линиям магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Под ее воздействием траектория движения анионов хлора изменяется, и они движутся вдоль канала, увлекая за собой жидкость.

По сравнению с УЭЦН коэффициент мощности МГД насосов, при использовании постоянных магнитов в качестве источников магнитного поля, практически равен 1, что выше, чем у УЭЦН (в среднем 0,735). Данное обстоятельство обусловлено тем, что при работе МГД-насоса реактивная мощность, необходимая для создания электромагнитного поля, не потребляется.

Коэффициент полезного действия сравниваемых установок для добычи нефти примерно одинаков и составляет порядка 30 % [8–11].

Потребляемая активная мощность УЭЦН определяется выражением [11, 12]:

$$P = P_d + \sum \Delta P = P_d + \Delta P_T + \Delta P_{к.л} + \Delta P_d, \quad (2)$$

где  $P_d$  – активная мощность, потребляемая погружным электродвигателем, кВт;  $\Delta P_T$ ,  $\Delta P_{к.л}$ ,  $\Delta P_d$  – потери активной мощности в питающем трансформаторе, кабельной линии и погружном электродвигателе соответственно, кВт.

Выражение для определения потерь активной мощности в питающем трансформаторе имеет вид:

$$\Delta P_T = 3(i_{1T}^2 R_{1T} + i_{2T}'^2 R_{2T}'), \quad (3)$$

где  $i_{1T}$ ,  $i_{2T}'$  – электрический ток первичной и вторичной обмоток, соответственно, А;  $R_{1T}$ ,  $R_{2T}'$  – активное и приведенное активное сопротивления первичной и вторичной обмоток, соответственно, Ом.

Тогда потери активной мощности в кабельной линии определяются выражением:

$$\Delta P_{к.л} = 3i_{к.л}^2 R_{к.л}, \quad (4)$$

где  $i_{к.л}$  – электрический ток, протекающий по кабельной линии, А;  $R_{к.л}$  – активное сопротивление токопроводящей жилы кабеля, Ом.

Активное сопротивление токопроводящей жилы кабеля определяется выражением:

$$R_{к.л} = 10^3 \rho \left( \frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right) [1 + 0,004(T - 20)], \quad (5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника при 20 °С, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l_1$  и  $l_2$  – соответственно длина основного кабеля и кабеля-удлинителя, км;  $S_1$  и  $S_2$  – соответственно сечение токопроводящей жилы основного кабеля и кабеля-удлинителя, мм<sup>2</sup>;  $T$  – температура токопроводящих жил кабелей, °С.

Потребляемую активную мощность МГД-насосов предлагается определять по выражению:

$$P = P_H + \sum \Delta P = P_H + \Delta P_{к.л} + \Delta P_H, \quad (6)$$

где  $P_H$  – активная мощность, потребляемая МГД-насосом, кВт;  $\Delta P_H$  – потери активной мощности в МГД-насосе, кВт.

Оценку энергетической эффективности применения МГД насосов для добычи нефти предлагается произвести по выражению:

$$\varepsilon_P = 1 - \frac{R_{МГД}}{R_{УЭЦН}}, \quad (7)$$

где  $R_{МГД}$  и  $R_{УЭЦН}$  – соответственно активные мощности, потребляемые МГД насосом и УЭЦН, кВт.

## III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В исследуемых установках для добычи нефти напряжение питания погружного асинхронного электродвигателя и магнитогидродинамического насоса осуществляется от источника питания напряжением 1000 В. Напряжение от источника питания (питающего трансформатора для УЭЦН или станции управления для МГД-насоса) до погружного электродвигателя и МГД-насоса подается по питающему кабелю марки КПБП с медными жилами. Температура пластовой жидкости принимается 70 °С.

В настоящее время, с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов углеводородов, длина кабельных линий может достигать 3000 м. В связи с этим для оценки влияния длины кабельной линии на величину энергосберегающего

эффекта  $\mathcal{E}_P$  диапазон длин кабельной линии принимается от 500 до 2000 м. Поверхности функции энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P$  для различных длин и сечений кабельной линии в зависимости от мощности погружной установки представлены на рис. 2.

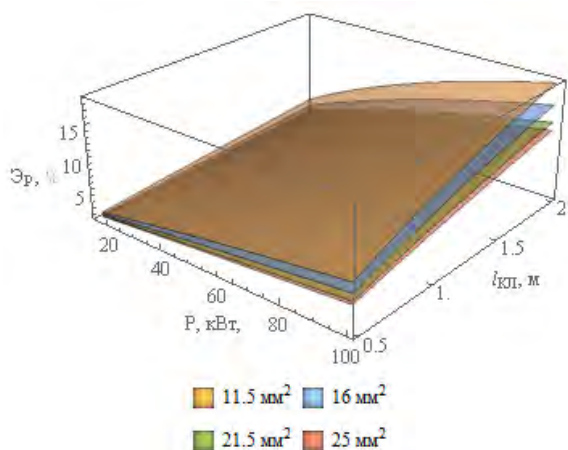


Рис. 2 – Поверхности функций энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P$

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ поверхностей (рис. 2) показал, что при использовании МГД-насосов происходит снижение потребляемой активной мощности погружной установкой для добычи нефти во всем диапазоне изменения мощности погружной установки, длин и сечений кабельной линии. В первую очередь, это обусловлено снижением электрического тока, потребляемого МГД-насосом, за счет высокого коэффициента мощности.

Например, для погружной установки, оснащенной МГД-насосом мощностью 60 кВт, кабельной линией длиной 1500 м сечением токопроводящей жилы 16 мм<sup>2</sup>, расчетный показатель энергетической эффективности составил 9,8 %. Расчетный показатель энергетической эффективности варьируется от 1,1 до 19,2 %.

Таким образом, применение магнитогидродинамических насосов позволяет повысить энергетическую эффективность добычи нефти.

Целесообразно провести дальнейшие исследования с целью установления оптимальной конструкции и режимов работы МГД-насоса для добычи углеводородов.

#### Список литературы

- [1] Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Деговцов А.В. и др. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 4. С. 25–30.
- [2] Сысоев А.А., Разумов А.И. Определение природы отложения солей на подземном насосном оборудовании скважин пластов группы ЮС после ГРП // Инженерная практика. 2017. № 3. С. 36–42.
- [3] Красноров Д.Н. Осложненный фонд скважин ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» // Инженерная практика. 2016. № 4. С. 28–33.
- [4] Ренев Д.Ю. Осложненный фонд скважин ООО «ЛУКОЙЛ» // Инженерная практика. 2016. № 4. С. 10–15.
- [5] Кудряшов С.И. Менеджмент солеотложения на месторождениях ОАО «НК «Роснефть» Текст // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. URL: [ogbus.ru/authors/Kudryashov/Kudryashov1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Kudryashov/Kudryashov1.pdf).
- [6] Хасанов И.Г. Итоги работы с механизированным фондом скважин ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» за 2012–2016 годы // Инженерная практика. 2017. № 11. С. 14–21.
- [7] Шангараева Л.А., Максютин А.В., Султанова Д.А. Способы предотвращения солеотложения при разработке и эксплуатации залежей нефти // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1, Ч. 1. С. 3–4.
- [8] Васильев Л.Г., Хожайнов А.И. Магнитная гидродинамика в судовой технике. М.: Судостроение, 1967.
- [9] Невоструев В.А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28–32.
- [10] Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. 2011. № 6. С. 18–26.
- [11] Копырин В.А., Смирнов О.В., Портнягин А.Л. Оценка энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // Омский научный вестник. 2018. № 2(158). С. 78–83.
- [12] Копырин В.А. Влияние параметров внутрискважинного компенсатора на энергетические показатели электротехнического комплекса добывающей скважины // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2017. С. 272–275.

# ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ БИОНАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КРУПНОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мубаракшин А.Х., Ахмеров А.В.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия

## Аннотация

**Состояние вопроса:** За последнее десятилетие в различных областях производства, в том числе и в переработке растительного сырья начали применяться наночастицы на основе оксидов металлов и на основе углеродных нанотрубок и нановолокон. К сожалению, в России отсутствует система применения научных биотехнологических разработок для целей промышленного производства.

**Материалы и методы:** Использована тематическая литература и метод пульсационного транспортирования твердых дисперсий.

**Результаты:** Найден оригинальный способ пульсационного технологического транспортирования твердых дисперсий в виде плотного слоя в противоточном режиме с жидкой средой, который представляет собой альтернативу традиционным механическим аппаратам различных отраслей промышленности, особенно для крупнотоннажных производств.

**Выводы:** Необходимо модернизировать существующие и разрабатывать новые аппараты, использующие в качестве системообразующего явления на основе развиваемого подхода конструирования многомерной физико-химической системы.

**Ключевые слова:** пульсационные технологии, транспортирование, тепло-массообмен.

## ENERGY-SAVING PULSATION APPARATUS FOR BIONANTECHNOLOGICAL LARGE-CAPACITY PRODUCTION

A. Akhmerov, A. Mubarakshin  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russia

## Abstract

**Background:** Over the past decade, nanoparticles based on metal oxides and based on carbon nanotubes and nanofibers have been used in various fields of production, including in the processing of plant raw materials. Unfortunately in Russia there is no system of application of scientific bio-technological developments for the purposes of industrial production.

**Materials and methods:** Thematic literature and method of pulsating transportation of solid dispersions.

**Results:** An original method of pulsating technological transportation of solid dispersions in the form of a dense layer in countercurrent mode with a liquid medium is found, which is an alternative to traditional mechanical devices in various industries, especially for large-scale industries.

**Conclusions:** It is necessary to modernize existing ones and develop new devices that use as a backbone phenomenon, based on the developed approach to designing a multidimensional physicochemical system.

**Key words:** Pulsating technologies, transportation, heat-mass transfer.

За последнее десятилетие в различных областях производства, в том числе и в переработке растительного сырья, начали применяться наночастицы на основе оксидов металлов и на основе углеродных нанотрубок и нановолокон.

Согласно современным представлениям о эволюции структуры материи [1,2] наночастицы занимают в схеме иерархии промежуточное положение между атомно-молекулярной системой с характерным размером объектов  $10^{-10}$  м и биологической со средним размером живой клетки порядка  $10^{-5}$  м. Эволюционное усложнение структуры материи из атомно-молекулярной системы в биоло-

гическую происходило в течение долгого времени на мелководье древних океанов Земли, где встречались потоки вещества различного химического состава с материков и водных глубин при непрерывном их взаимном перемешивании и при чередовании сезонов с их различными температурными режимами. Результатом такого взаимодействия стали органические молекулы аминокислот, с последующей их полимеризацией в белковые молекулы. Вершиной такого высокомолекулярного синтеза является двойная спираль молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), свернутую в клубок третичной структуры благодаря сульфидным связям между ее группами. Как

известно, соединение ДНК с белковыми биополимерами и породило первые одноклеточные организмы, способные превращать энергию межмолекулярных взаимодействий в энергию биологических связей.

Обладая высокой диэлектрической проницаемостью и полярностью, свернутая биомолекула создает сложное тензорное электрическое локальное поле высокой напряженности. Любая внешняя гидропульсация или импульсное воздействие приводит к перераспределению градиентов электрического поля, которые, в свою очередь, служат движущей силой для ионов в растворе, вызывая те или иные реакции метаболизма биологических организмов. При определенных амплитудно-частотных характеристиках внешнего воздействия возможно упорядочивание этих локальных полей в структуры, подобные которым встречаются у ферро- и ферромагнетиков, тогда локальные силовые поля складываются и могут совершать во много раз большую работу, чем каждая биомолекула в отдельности [3]. Подобный механизм взаимодействия наблюдается и у наноструктур с такими биологическими компонентами, как молекулы белков, что приводит к их уникальному распределению в биологических тканях и способности решать сложные задачи переработки и модифицирования растительного сырья. Например, углеродные трубки способны закреплять на своей поверхности переходные металлы, и полученные таким образом реактивы могут являться катализаторами реакций органического синтеза [4, 5].

Существует множество методов интенсификации процессов переработки растительного сырья с использованием низкочастотного колебательного импульса, подаваемого на реагенты от пульсатора, установленного вне аппарата [6]. Однако, «...в России полностью отсутствует система «масштабирования» научных биотехнологических разработок для целей промышленного производства и другие элементы биоэкономики, необходимые для преобразования научных знаний в коммерческие продукты...» (Платформа БИОТЕХ 2020). Как впрочем и во всем мире эта проблема не нашла удовлетворительного решения.

В современных условиях одна из ключевых научно-технических и экономических задач, решение которой обеспечит им высокую ресурсоэффективность и соответственно конкурентоспособность на мировом рынке, создание крупно тоннажных производств по переработке сырьевых источников с суточной производительностью 10–15 и более тысяч тонн в сутки. Решение этой задачи требует новых подходов при выборе способов проведения процессов и адекватных подходов к их аппаратурному оформлению узловых, наиболее загруженных участков крупно тоннажных технологических процессов. В таких

случаях технологический аппарат вместе с протекающими в нем процессами, явлениями и эффектами представляет собой сложную многофазную, многокомпонентную, трехмерную физико-химическую систему, в которой характер связей и взаимодействия между ними зависит от её масштаба. Так, например, в типовом массообменном аппарате – ректификационной колонне по масштабу выделяется пять уровней в общей сложности порядка пятидесяти процессов и элементарных явлений.

Традиционный априорный выбор конструкции технологического аппарата не позволяет обеспечить такой физико-химической системе устойчивость и моделируемость. Эти свойства система приобретает только в результате целенаправленного сопряжения её элементной физико-химической базы: определения системообразующего и определяющих явлений их агрегирования в соответствии с общим функциональным назначением.

Коллективом кафедры ЭЭ КГЭУ разработаны и внедрены проекты с использованием низкочастотных пульсаций жидких сред (порядка 0,1 Гц) в качестве системообразующего явления на основе развиваемого подхода конструирования ФХС как технологических операторов:

- создан новый класс динамически уравновешенных пульсационных экстракторов для жидкофазных тепломассообменных процессов;
- найден оригинальный способ пульсационного технологического транспортирования твердых дисперсий в виде плотного слоя в противоточном режиме с жидкой средой, который представляет собой альтернативу традиционным механическим аппаратам в фармацевтической, пищевой, химической и агропромышленных отраслях промышленности, особенно для крупнотоннажных производств.

### Список литературы

- [1] Непримеров Н.Н. Естествознание. Казань: ТаРИХ, 2000.
- [2] Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 517. 565 p.
- [3] Shanmugamurthy Lakshmanan, Gaurav K. Gupta, Pinar Avci, Rakkiyappan Chandran, Magesh Sadasivam, Ana Elisa Serafim Jorge, Michael R. Hamblin // *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2013.
- [4] Дьячков П.Н., Кепп О.М., Николаев А.В. // *ДАН.* 1999. Т. 365, № 2. С. 105–110.
- [5] Dun Liu, Lijun Wang, Zhigang Wang, Alfred Cuschieri // *Nano Letters.* 2012. № 12(10). P. 5117–5121.
- [6] Пульсационные технологии и аппаратура при производстве биологически активных веществ и пищевых добавок / В.Е. Бомштейн [и др.] // *Успехи современного естествознания.* 2004. № 2. С. 61–61.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПУЛЬСАЦИОННЫЙ БИОФИЛЬТР С ПОДВИЖНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (УЗВ)

Мубаракшин А.Х., Ахмеров А.В.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Современные биотехнологии существенно меняют методы очистки вод, делая их более доступными и менее энергозатратными. При этом степень очистки остается очень высокой. Однако в существующих на данный момент биофильтрах не решена проблема контроля роста биопленки и своевременной загрузки-выгрузки насадки. Данных недостатков лишен разрабатываемый пульсационный биофильтр.

**Материалы и методы:** Использована тематическая литература и метод пульсационной интенсификации.

**Результаты:** Подготовлена база для создания модели пульсационного биофильтра.

**Выводы:** Результаты исследования прогнозируют большую эффективность пульсационного биофильтра по сравнению с ранее предложенными аналогами.

**Ключевые слова:** пульсационные технологии, биофильтры.

## ENERGY-EFFICIENT IMPULSE BIOFILTER WITH MOVING CHARGE FOR CLOSED WATER INSTALLATIONS

A. Akhmerov, A. Mubarakshin

Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation

## Abstract

**Background:** Modern biotechnologies significantly change the methods of water purification, making them more accessible and less energy-consuming. The degree of purification remains very high. However, in existing biofilters, the problem of controlling the growth of a biological film and the timely loading and unloading of the nozzle has not been solved. The developed pulsation biofilter is devoid of these shortcomings.

**Materials and methods:** Thematic literature and the method of pulsation intensification are used.

**Results:** The basis for the creation of a pulsation biofilter model has been prepared

**Conclusions:** The results of the research predict a greater efficiency of the pulsation biofilter in comparison with the previously proposed analogues.

**Key words:** pulse technologies, biofilters.

Основной задачей установок замкнутого водоснабжения является создание искусственной среды обитания гидробионтов, обеспечивающей максимальный выход товарной продукции в наиболее короткие строки при сохранении качества товара. Более того, к такого вида установкам предъявляются требования эффективного использования энергетических ресурсов, в особенности водных: минимальное количество подпиточной воды и наибольший коэффициент ее оборотного использования.

Круглогодичное выращивание гидробионтов в закрытых аквакультурных фермах исключает остановку производства зимой, тем самым интенсифицируется процесс роста. Чем качественней технология, тем лучше среда обитания и, как следствие, выше скорость роста товара. Кроме того, качественно очищенная вода позволяет повысить плотность рассадки рыбы и более эффективно использовать ограниченные производственные площади. Важнейшая часть устройства замкнутого водоснабжения – многоступенчатая система очистки и подготовки воды: грубая очи-

стка от механических загрязнений, биологическая очистка от органических примесей, дезинфекция при помощи ультрафиолета, аэрация и подогрев воды.

В то время как капельные и погружные фильтры с неподвижной загрузкой известны уже давно, фильтры с подвижной загрузкой были разработаны только в 70-е годы. Слой дисперсной загрузки, например слой песка, в фильтре с восходящим потоком остается неподвижным до тех пор, пока градиент давления относительно мал. Если же давление в нижней части фильтра сравняется с весом расположенного выше слоя загрузки, произойдет сдвиг последнего, контакт между отдельными песчинками нарушается и они становятся подвижными. Такой фильтр, получивший название фильтр с расширенным слоем, используется на практике. Заполняющие его частицы все время трутся друг о друга, и биопленка остается тонкой. На настоящий момент собранной информации недостаточно для того, чтобы определить, насколько надежен подобный контроль за состоянием биопленки на практике.



Если скорость восходящего потока возрастает выше значения, при котором происходит сдвиг, загрузка фильтра расширяется и для данной скорости потока через фильтр достигается равновесие между скоростью восходящего потока и скоростью оседания частиц. Это равновесие зависит от плотности частиц. Заданной скорости потока, следовательно, соответствует определенная степень расширения. Частицы загрузки фильтра разъединяются и вращаются в турбулентном восходящем потоке. Это так называемые фильтры с псевдооживленным слоем. В указанных условиях достигается очень эффективный контакт между водой и биоплёнкой, но автоматический контроль за толщиной биопленки не обеспечивается. С целью осуществления такого контроля отбирается отдельный поток подвижной смеси воды и загрузки фильтра с биомассой.

Фильтры с псевдооживленным слоем являются наиболее эффективными (если исходить из возможной объемной нагрузки) из числа существующих в настоящее время биологических реакторов: количество биомассы на фильтре достигает 40 кг БВБ/м<sup>3</sup>. Однако работать с ними не так просто, тем более что и достаточного опыта пока не накоплено. Тем не менее эти реакторы безусловно имеют большой потенциал и займут подобающее им место в промышленности.

В фильтрах с псевдооживленным слоем загрузка поддерживается во взвешенном состоянии турбулентным восходящим потоком. Это взвешенное состояние может быть, конечно, достигнуто и без восходящего потока, а путем перемешивания. Реактор, в котором осуществляется такой принцип, называют реактором со взвешенной биоплёнкой. Здесь просматривается связь с реактором с активным илом. Различие состоит только в том, что в реактор со взвешенной биомассой специально помещают инертный носитель, на котором закрепляется биомасса. Таким образом, разделение в таком реакторе улучшается

потому, что либо загрузка «утяжеляет» каждую отдельную частицу, либо более крупные частицы с биоплёнкой легче удерживаются в реакторе (благодаря их более высокой скорости оседания). Однако для поддержания вещества в таком реакторе во взвешенном состоянии могут потребоваться большие затраты энергии на создание турбулентного потока. В то же время дело усложняется еще и тем, что добавляемая загрузка с выросшей на ней биомассой должна обрабатываться в иловой секции очистной станции. Таким образом, конструкции со специальным введением загрузки в «системы с активным илом» пока еще находятся в стадии разработки.

Биофильтр с подвижной загрузкой представляет собой, в рамках принятых значений биотехнологических переменных, режимных, конструктивных и геометрических параметров, сложную агрегированную на основе фундаментальных законов сохранения аппаратурно-биотехнологическую систему связанных и взаимодействующих между собой естественных процессов и явлений.

Использование регулярной нестационарности в качестве системообразующего гидродинамического явления позволило разработать пульсационный биофильтр с подвижной загрузкой.

Преимущества пульсационного биофильтра с подвижной загрузкой: контроль роста биологической пленки; улучшение качества очистки; снижение энергозатрат.

Пульсационные технологии хорошо зарекомендовали себя в промышленности и открыли новые горизонты для исследования энергоэффективных машин.

#### Список литературы

- [1] Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2006.
- [2] Лыкова О.Г., Гогина Е.С. Биофильтры. Их преимущества и недостатки // Вестник МГСУ. 2009. Спецвып. 1. С. 114–117.

# ПРОБЛЕМА СТАРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИЛОВОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нгуен Зуи Хынг, Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
sneq987@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Трансформаторное масло широко применяется в высоковольтном электрооборудовании и выполняет функции диэлектрика, а также является охлаждающей средой. Оно состоит из сложной смеси углеводородных композиций с различными примесными соединениями. В процессе эксплуатации маслонаполненного электрооборудования под воздействием технологических условий эксплуатации высоковольтных аппаратов, к которым относятся высокая напряженность электрического поля, кислород воздуха, влажная среда, температура, происходит старение как трансформаторного масла, так и твердой изоляции, к которой относится электротехнический картон. В этом случае диэлектрические свойства трансформаторного масла ухудшаются, что может вывести трансформаторное оборудование из строя. Для увеличения срока эксплуатации маслонаполненного электрооборудования в трансформаторное масло на стадии его изготовления вводится антиокислительная присадка, в качестве которой наиболее часто применяют ионол, концентрацию которого необходимо контролировать постоянно различными инструментальными методами.

**Материалы и методы:** Для контроля за содержанием ионола в трансформаторном масле использовали метод тонкослойной хроматографии в восходящем варианте на тонкослойных пластинках «Sorbfil» с нанесенными на них слоем силикагеля и люминофора. Проявления пятен ионола проводили в области ультрафиолета с длиной волны 245 нм, а также обработкой тонкослойных пластинок спиртовым раствором йода.

**Результаты:** Тонкослойная хроматография относится к одним из наиболее простых и эффективных методов контроля веществ в различных объектах, в том числе и в трансформаторном масле. Она характеризуется высокой избирательностью и низким пределом обнаружения анализируемых компонентов. Анализируемое трансформаторное масло марки ГК-1 экстрагировали этиловым спиртом для извлечения из него антиокислительной присадки ионол. Затем экстракт помещали в камеру с подвижной фазой, в качестве которой использовали различные по полярности органические растворители и их смеси. Использовали восходящий вариант тонкослойной хроматографии, когда растворитель за счёт капиллярных сил адсорбента тонкослойной пластинки поднимался вверх. После окончания процесса хроматографирования тонкослойную пластинку вынимали из камеры, отмечали линию фронта растворителя и высушивали и проводили визуализацию пятен в ультрафиолетовом свете, а также обработку спиртовым раствором йода, когда проявляются фиолетовые пятна на темном фоне. Для проявления полученных хроматограмм тонкослойную пластинку помещали в камеру с парами йода, после чего на ней появлялось пятно, которое соответствовало ионолу. Затем рассчитывали величину  $R_f$ , так как при стандартных условиях она является величиной. На тонкослойной пластинке измеряли площадь пятна и по заранее построенному градуировочному графику находили количество ионола в трансформаторном масле.

**Выводы:** Найдены селективные растворители для элюирования ионола из трансформаторного масла. Предложена методика контроля антиокислительной присадки в трансформаторном масле на основе тонкослойной хроматографии на пластинках «Sorbfil» и различными по полярности органическими растворителями.

**Ключевые слова:** старение, фурановые соединения, ионол, надежность трансформаторного оборудования, адсорбент диэлектрик, изоляционные свойства, электрооборудование, трансформаторное масло, частичные разряды, растворители, тонкослойная хроматография, антиокислительная присадка, объекты, градуировочный график, селективность, полярность, методика, контроль.

## THE PROBLEM OF AGING OF DIELECTRIC MATERIALS OF FORCE MULTIPLIED EQUIPMEN

Nguyen Duy Hung, U. Snigireva, V. Novikov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
sneq987@mail.ru

## Annotation

**Background:** Transformer oil is widely used in high-voltage electrical equipment and performs the functions of a dielectric, as well as a cooling medium. It consists of a complex mixture of hydrocarbon compositions with various impurity compounds. In the process of operation of oil-filled electrical equipment under the influence of technological operating conditions

of high-voltage devices, which include high voltage electric field, air oxygen, humid environment, temperature, aging occurs as transformer oil and solid insulation, which includes electrical cardboard. In this case, the dielectric properties of the transformer oil deteriorate, which can lead to the transformer equipment failure. To increase the service life of oil-filled electrical equipment, an antioxidant additive is introduced into the transformer oil at the stage of its manufacture, as it is most often used Ionol, the concentration of which must be constantly monitored by various instrumental methods.

**Materials and methods:** to control the content of Ionol in transformer oil, the method of thin-layer chromatography in the ascending version is used with thin-layer Sorbfil plates. Ionol stains were detected in the range of ultraviolet light with a wavelength of 245 nm.

**Results:** thin-layer chromatography is one of the most simple and effective methods of substance control in various objects, including transformer oil. It is characterized by high selectivity and low limit of detection of the analyzed components. The analyzed transformer oil of the brand GK-1 was extracted with ethyl alcohol to extract the antioxidant additive «Ionol» from it. Then the extract was placed in a chamber with a mobile phase, as which various organic solvents and their mixtures were used. An ascending variant of thin-layer chromatography was used when the solvent rose up due to capillary forces of the adsorbent of the thin-layer plate. After the end of the process of chromatography, a thin-layer plate was removed from the chamber, the solvent front line was noted and dried and visualization was performed in ultraviolet shining. For the manifestation of the obtained chromatograms, a thin-layer plate was placed in a chamber with iodine vapor, after which a brown spot appeared on it, which corresponded to Ionol. Then we calculated the value of  $R_f$ , since under standard conditions It is a real constant. On the thin-layer plate, the spot area was measured and the amount of ionol in the transformer oil was found using a pre-built calibration schedule.

**Conclusions:** we found differences in the selectivity of the solvent for elution Ionol of the transformer oil and the technique to control oxidation inhibitors in transformer oil based on thin-layer chromatography with thin-layer Sorbfil plates and various organic solvents.

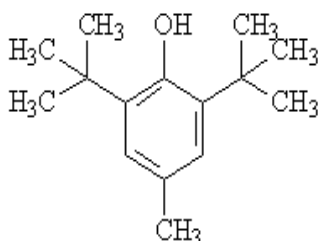
**Key words:** aging, furan compounds, ionol, reliability of transformer equipment, adsorbent dielectric, insulating properties, electrical equipment, transformer oil, partial discharges, solvents, thin layer chromatography, antioxidant additive, objects, calibration graph, selectivity, polarity, technique, control.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторное масло получают путем очистки фракции нефти, которую получают перегонкой. Трансформаторное масло имеет сложный углеводородный состав с температурой кипения от 300 до 400 °С. В зависимости от нефтяного месторождения трансформаторное масло отличается по физико-химическим свойствам. В своём составе трансформаторное масло содержит парафиновые углеводороды (10–15 %), нафтеновые углеводороды (60–70 %), ароматические углеводороды (15–20 %), асфальто-смолистые вещества (1–2 %), сернистые соединения (< 1 %), азотистые соединения (< 0,8 %), нафтеновые кислоты (< 0,002 %).

Электроизоляционные свойства трансформаторных масел определяются в основном тангенсом угла диэлектрических потерь. Для сохранения подвижности трансформаторного масла в условиях низких температур у них должна быть низкая температура застывания –45 °С и ниже [1, 2].

Наиболее важное свойство трансформаторного масла заключается в его стабильности против окисления, т. е. способности сохранять хорошие эксплуатационные характеристики при длительной эксплуатации. С этой целью все сорта используемых трансформаторных масел ингибируются антиокислительной присадкой 2,6-дитретичный бутил-паракрезол под фирменным названием «Ионол» структурная формула [3]:



Механизм действия антиокислительной присадки заключается в ее способности взаимодействовать с активными пероксидами радикалами, образующимися при цепной реакции окисления углеводородов. Как правило, трансформаторное масло, ингибированное антиокислительной присадкой, окисляется с ярко выраженным индукционным периодом. В начале трансформаторное масло, которое восприимчиво к присадкам, окисляется достаточно медленно. Это связано с тем, что зарождающиеся в объеме трансформаторного масла цепи окисления обрываются под влиянием антиокислительной присадки. После того, как антиокислительная присадка израсходовалась, трансформаторное масло начинает окисляться со скоростью, близкой к скорости окисления свежего масла. Влияние окислительной присадки проявляется тем эффективнее, чем оказывается более продолжительный индукционный период окисления. Эффективность этого процесса зависит от индивидуального углеводородного состава трансформаторного масла, наличия неуглеводородных примесей, а также промотирующего окисления, в процессе которого образуются азотистые основания, нафтеновые кислоты, кислородосодержащие продукты окисления, фурановые производные, низкомолекулярный спирт и др. [5, 6].

Стабильность ингибированного антиокислительной присадкой трансформаторного масла повышается при снижении концентрации ароматических углеводородов, которое обычно происходит при очистке нефтяных дистиллятов. Удаление из трансформаторного масла неуглеводородных включений также повышает стабильность ингибированного ионолом трансформаторного масла.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Старение диэлектрических материалов в маслонаполненном электрооборудовании сопровождается существенным ухудшением или полной потерей электроизоляционных

свойств этих материалов. Также старение вызывается рядом физико-химических реакций, обусловленных химическими, термическими, электрическими и механическими воздействиями на электроизоляционные материалы, которые взаимосвязаны и могут оказывать взаимное влияние практически одновременно [1, 2]. Ухудшение эксплуатационных характеристик электроизоляционных материалов обусловлено процессами окисления, гидролиза, катализа, термического воздействия с агрессивными компонентами окружающей среды. При этом повышении температуры в трансформаторном оборудовании и наличие влаги приводит к ускорению процесса старения электроизоляционных материалов, который сопровождается деструкцией вещества, увеличивается хрупкость и снижается диэлектрическая прочность.

Старение диэлектрических материалов может быть связано с причинами электрического характера, которые обусловлены ионизационными процессами, например частичными разрядами в трансформаторном оборудовании. Кроме того, механические воздействия могут привести к деструкции твёрдого изоляционного материала, что также приводит к снижению электрической прочности диэлектрика. В процессе старения трансформаторного масла в нём образуются органические кислоты, которые как правило, приводят к образованию шлама. Этот процесс ускоряется под воздействием высокой температуры и влажности трансформаторного масла [3, 4].

Таким образом, старение трансформаторного масла приводит к снижению диэлектрических характеристик маслонаполненного электрооборудования в результате процессов деструкции и повышение кислотности системы. При этом осаждение шлама на металлических частях электроизоляционного оборудования ухудшает отвод тепла и увеличивает диэлектрические потери. Влага, содержащаяся в трансформаторном масле, формируется поверхностью твёрдого диэлектрика и усиливает в нём процесс деструкции. В этой связи актуальной проблемой является диагностика маслонаполненного электрооборудования, которая проводится, как правило, инструментальными методами, в том числе и с использованием различных вариантов хроматографии [5, 6].

Результаты: для оценки степени деструкции изоляции силового маслонаполненного электрооборудования была разработана модель, схема которой представлена на рисунке.

Из рисунка видно, что на процесс старения изоляции маслонаполненного электрооборудования оказывают влияние такие негативные факторы, как повышенная температура, при воздействии которой диэлектрические материалы могут подвергаться пиролизу, кислород, попадающий в трансформаторное масло из воздуха, способствующий окислению органических компонентов. При наличии в масле воды происходит гидролиз, который ускоряется под действием катализаторов, металлических частей трансформаторного оборудования.

При старении трансформаторного масла продуктами деструкции являются кислоты, вода и растворенные газы, к которым относится водород, метан, этилен, ацетилен, пропилен, пропан, оксид и диоксид углерода, а также кислород и азот. По соотношению концентрации этих газов обычно проводят диагностику маслонаполненного электрооборудования.

В результате деструкции целлюлозной изоляции, к которой относится электротехнический картон, выделяются фурановые производные, к числу которых относят фурфурол, 5 мл фурфурол, ацетил фуран, оксиметилфурфурол, фурфуриловый спирт, концентрация которых зависит от степени деградации бумажной изоляции. Эти фурановые соединения мигрируют в трансформаторное масло и ухудшают его диэлектрические характеристики. Поэтому для продления срока эксплуатации маслонаполненного электрооборудования в трансформаторное масло добавляют в небольшом количестве до 0,5 % масс. антиокислительной присадки, в качестве которой наиболее часто используют ионол.

Методом тонкослойной хроматографии определяли нижний предел обнаружения антиокислительной присадки. С этой целью готовили стандартный раствор ионола в этиловом спирте. Навеску ионола в количестве 0,1 г растворяли в 20 см<sup>3</sup> этилового спирта. Концентрацию ионола в градуировочном растворе определяли по формуле:

$$A_{и}^{ГР} = \frac{P_{и}}{P_{СП} + P_{и}} \cdot 100 \%,$$

где  $A_{и}^{ГР}$  – концентрация ионола в этиловом спирте, % масс.;  $P_{и}$  – навеска ионола, г;  $P_{СП}$  – навеска этанола, г.

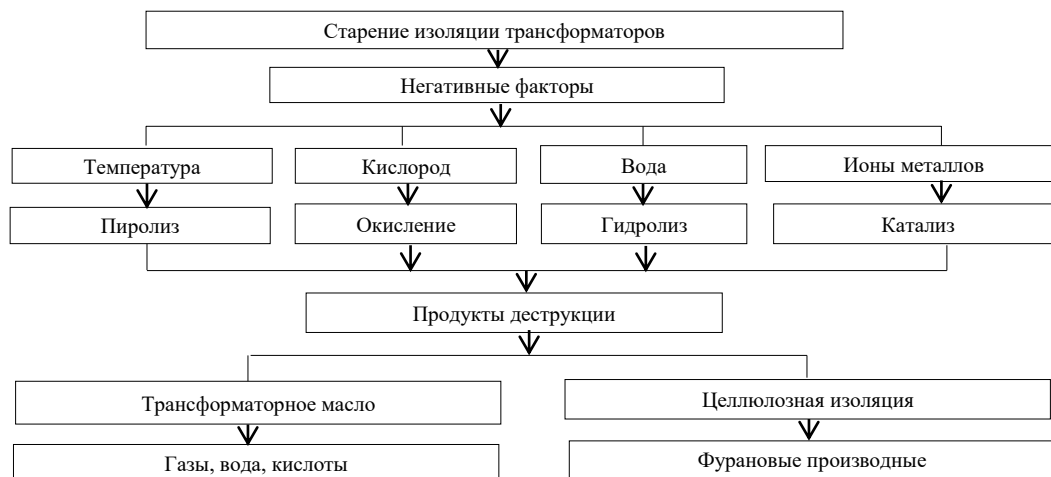


Схема модели старения изоляции силового трансформатора

### III. Выводы

Приготовленный градуировочный раствор в количестве 2,0 мкл микрошприцем наносили на стартовую линию тонкослойной пластинки, помещали её в хроматографическую камеру и элюировали различными растворителями. Затем пластинку подслушивали и обрабатывали спиртовым раствором йода для визуализации пятен. Проводили не менее пяти параллельных измерений и рассчитывали суммарную погрешность измерения содержания ионола в трансформаторном масле в соответствии с ГОСТ 8.207-76. Среднее квадратичное отклонение за счёт случайной погрешности измерения  $A_{и}^m$  рассчитывали по формуле:

$$S_{A_{и}^m} = \frac{S_{и0}}{B_{и}} \sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{lm} + \frac{lm(A_{и}^{an} - A_{и})^2}{B_{и}^2 [lm(S_{и}^2 - (\sum S_{и})^2)]}},$$

где  $S_{A_{и}^m}$  – среднее квадратичное отклонение за счёт суммарной погрешности измерения концентрации ионола в трансформаторном масле;  $S_{и0}$  – среднее квадратичное отклонение ионола от своих градуировочных характеристик;  $B_{и}$  – градуировочный коэффициент;  $\alpha$  – число параллельных анализов трансформаторного масла;  $l$  – число точек на градуировочной характеристике (две точки);  $m$  – число параллельных измерений в каждой точке градуировочного графика;  $A_{и}^{an}$  – концентрация ионола в трансформаторном масле, % масс.;  $A_{и}$  – среднее значение концентрации ионола при градуировке;  $S_{и}$  – площадь пятна ионола на тонкослойной пластинке.

Рассматривались вопросы старения трансформаторного масла в процессе эксплуатации маслonaполненного электрооборудования. Рекомендовано проводить научно-исследовательские работы, направленные на увеличение продолжительности эксплуатации электротехнического оборудования путем поиска новых антиокислительных присадок и исследования их эксплуатационных характеристик, в том числе и в промышленных условиях.

### Список литературы

- [1] Коробейников С.М. Диэлектрические материалы. Новосибирск: НГТУ, 2007. 67 с.
- [2] Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
- [3] Krause Ch., Piovon U., Tschudi D. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing // Proceedings of International Conference on UHV Transmission. Beijing, China, 2009. P. 28–34.
- [4] О разработке вариофикационных моделей для представления развития дефектов в силовых маслonaполненных трансформаторах / Г.В. Попов [и др.] // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 25–31.
- [5] Карташова А.А., Новиков В.Ф. Тонкослойная хроматография как метод контроля фурановых соединений в трансформаторном масле // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 138–145.
- [6] Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 99–103.
- [7] Бузаев В.В., Сапожников Ю.М., Смоленская Н.Ю. Методические указания по определению содержания Ионола в трансформаторных маслах методом газовой хроматографии. М., 2007. 24 с.

# СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИНИИ 0,4 кВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Рокина Е.Г., Сидорова В.Т.  
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»  
Йошкар-Ола, Россия  
veranig@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В России считается, что компенсация реактивной мощности в сетях низкого напряжения нецелесообразна в виду малой передаваемой мощности и отсутствия потребителей реактивной мощности. К тому же в большинстве таких сетей не существует информации о потоках мощностей и значениях напряжений, что усложняет задачу эффективной компенсации реактивной мощности.

**Материалы и методы:** Для исследования компенсации реактивной мощности в сетях 0,4 кВ была разработана модельная электрическая схема замещения линии 0,4 кВ. Модельная линия содержит трехфазный понижающий трансформатор (ТЗСИ-1,6 380/42), в качестве нагрузок использованы переменные резисторы и индуктивности, в качестве конденсаторных батарей – электрические конденсаторы. Все параметры линии – мощности нагрузок, значения напряжений и сопротивления проводов пропорциональны реальным параметрам линий 0,4 кВ.

**Результаты:** Разработана и создана модельная электрическая линия 0,4 кВ. Модельная линия содержит пофазную нагрузку, рассредоточенную по линии.

**Выводы:** Созданная модельная линия наиболее полно отражает процессы перетоков мощностей, потерь напряжений и мощностей в фазах линии, изменение коэффициента мощности при изменении характера нагрузок.

**Ключевые слова:** модель линии 0,4 кВ, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности

# CREATION OF THE ELECTRICAL MODEL OF THE LINE 0.4 kV FOR RESEARCH OF REACTIVE POWER COMPENSATION

E. Rokina, V. Sidorova  
Mari State University  
Yoshkar-Ola, Russian Federation  
veranig@yandex.ru

## Abstract

**Background:** In Russia it is considered that the compensation of reactive power in low voltage networks is inadvisable in view of the small transmitted power and the lack of reactive power consumers. In addition, most of these networks do not have information on power flows and voltage values, which complicates the task of effective reactive power compensation.

**Materials and Methods:** For the study of reactive power compensation in 0.4 kV networks, a model circuit for replacing the 0.4 kV line was developed and created. The model line contains a three-phase step-down transformer (TZSI-1,6 380/42), variable resistors and inductors are used as loads, and capacitors are electrical capacitors. All parameters of the line – the load powers, the values of the voltages and resistance of the wires are proportional to the real parameters of the 0.4 kV lines.

**Results:** A model electric line of 0.4 kV was developed and created. The model line contains a phase load, distributed along the line.

**Conclusions:** The created model line most fully reflects the processes of power flows, losses of voltages and powers in the phases of the line, a change in the power factor with a change in the nature of the loads.

**Key words:** model of the line 0.4 kV, reactive power compensation, power factor.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается быстрый рост строительства частного сектора. При этом повышается нагрузка коммунально-бытовых потребителей. Поскольку большинство электрических сетей 0,4 кВ спроектировано по нормам потребления прошлого столетия, наблюдается ухудшение значений коэффициента мощности, устано-

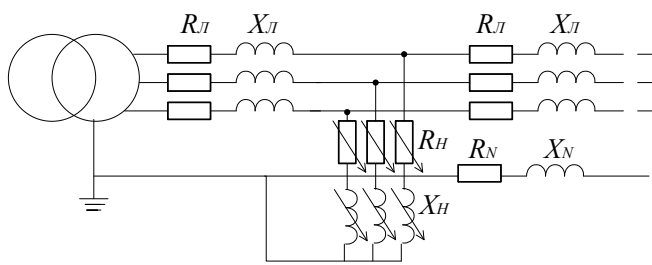
вившегося отклонения напряжения и др. показателей качества электроэнергии. Все это приводит к резкому увеличению потерь электроэнергии. Для эффективной компенсации реактивной мощности (КРМ) в воздушных сетях 0,4 кВ необходимо определить точки установки компенсирующих устройств с точки зрения экономической целесообразности [1]. При этом будут значительно улучшены такие важные показатели, как коэффициент

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта победителя Всероссийского конкурса молодежных проектов 2017 г. Федерального агентства по делам молодежи. Исполнитель Е.Г. Рокина, консультанты – В.Т. Сидорова, В.В. Карчин.

мощности и отклонение напряжения в точке присоединения потребителей [2]. Ввиду значительной несимметрии нагрузки в таких сетях [3] планируется исследование фазной компенсации реактивной мощности в сетях 0,4 кВ на созданной электрической модели линии.

## II. Модель линии 0,4 кВ

Для полного отображения процессов перетоков мощностей по фазам, потерь напряжения и мощностей были проанализированы значения этих величин в реальных линиях 0,4 кВ. Для модельной линии выбран трехфазный понижающий трансформатор ТЗСИ-1,6 380/42. В качестве фазных нагрузок использованы переменные резисторы и индуктивности, эквивалентные активным и реактивным мощностям группы потребителей. Сопротивления фазных проводов введены в линию через активно-индуктивные сопротивления, эквивалентные участкам провода А-50, длиной 240 м. На рисунке представлена схема модельной линии, где каждый участок с  $R_L$  и  $X_L$  эквивалентен сопротивлению провода А-50 длиной 240 м. Вся линия эквивалента линии длиной 960 м. Сопротивления нагрузок  $R_H$  и  $X_H$  могут меняться до значений, эквивалентных фазным мощностям группы 4 потребителей.



Часть схемы модельной линии

Фазное напряжение на выводах используемого трансформатора равно 24,5 В. Чтобы созданная модельная линия отражала процессы передачи энергии, необходимо чтобы мощности и сопротивления проводов участков линии были пропорциональны их реальным значениям в соответствии с используемым напряжением. Из анализа реальных сетей 0,4 кВ были получены максимальные значения передаваемых активной и реактивной мощностей в каждой фазе, равные 20 кВт и 12 кВАр, соответственно. При разделении всей нагрузки на 4 группы вдоль линии

получается, что мощности каждой группы должны меняться до 5 кВт и 3 кВАр, соответственно. В соответствии с выражениями (при  $\cos \varphi = 1$ ) [4]:

$$P = U^2/R; \quad (1)$$

$$Q = U^2/X_L. \quad (2)$$

При уменьшении напряжения на выводах трансформатора примерно в 10 раз мощность должна уменьшиться в 100 раз. Таким образом, максимальные активная и реактивная мощности каждой группы нагрузок будут иметь значения 50 Вт и 30 Вар, соответственно.

Из выражений (1) и (2) были определены минимальные значения активного и реактивного сопротивлений нагрузок, соответствующие максимальным мощностям:  $R_{\min} = 12$  Ом,  $X_{L\min} = 20$  Ом. Для определения максимальных значений сопротивлений нагрузок взяли активную мощность, равную 10 Вт, а реактивную мощность – 8 Вар. В соответствии с выражениями (1) и (2) значения сопротивлений равны:  $R_{\max} = 60$  Ом,  $X_{L\max} = 75$  Ом. В соответствии со стандартным выражением [4]:

$$X_L = \omega L,$$

определяем минимальное и максимальное значение индуктивности нагрузки:  $L_{\min} = 64$  мГн,  $L_{\max} = 238$  мГн.

Таким образом, при изменении сопротивлений резисторов и индуктивностей нагрузок возможно изменять потоки мощностей в фазах линии и коэффициент мощности. Созданная электрическая модель линии 0,4 кВ позволит провести исследование компенсации реактивной мощности и ее эффективности.

## Список литературы

- [1] Паули В.К., Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // Энергоэксперт. 2007. № 2.
- [2] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- [3] Управление качеством электроэнергии / Карташев И.И. [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 354 с.
- [4] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. 12-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2014. 701 с. (Сер. Бакалавр. Углубленный курс).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ВОДОПОДГОТОВКИ ТЭС С ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ

Саитов С.Р.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
saapel@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Обратный осмос, используемый в качестве технологии водоподготовки на ТЭС, даёт большой объем стоков из-за низкого коэффициента использования исходной воды. Для решения этой проблемы применяются различные приёмы, большая часть из которых подразумевает существенные капитальные затраты на свою реализацию. В настоящее время не существует методики, позволяющей без каких-либо капитальных затрат сократить размер стоков в схемах водоподготовительных установок (ВПУ) ТЭС за счет оптимизации режимов работы исходного оборудования и перераспределения потоков в системе.

**Материалы и методы:** При разработке алгоритма использовались методы системного анализа и математической статистики. Методом исследования при выполнении экспериментальной части являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялась встроенная среда объектно-ориентированного программирования VBA. Исходными данными являлись массивы комплексных значений расходов и электропроводимостей потоков в узлах схемы ВПУ ТЭС, полученные из таблиц суточного контроля рабочих параметров в контрольных точках.

**Результаты:** Разработан особый алгоритм распределения исходной воды по блокам системы, благодаря которому более экономичное оборудование чаще всего работает при номинальной нагрузке. Предложена методика определения констант селективности при обработке массива реальных опытных данных по обратноосмотическим модулям. Выявлены пути снижения потери воды в схеме ВПУ ТЭС.

**Выводы:** Разработанный алгоритм позволяет по заданным исходным параметрам (коэффициенты преобразования всех блоков УОО и требуемый расход обессоленной воды) рассчитать необходимый расход исходной воды, расход и электропроводность пермеата и концентрата во всех узлах схемы, количество и процент стоков, что является актуальным при определении оптимального режима работы схемы ВПУ. Реализация алгоритма во встроенной среде объектно-ориентированного программирования VBA максимально упрощает процессы обработки исходных данных и получения констант селективности.

**Ключевые слова:** баромембранные технологии, обратный осмос, тепловые электрические станции, водоподготовка, бессточные водоподготовительные установки.

## MODELING AND OPTIMIZATION OF WATER TREATMENT SCHEMES WITH REVERSE OSMOSIS MODULES OF THERMAL POWER PLANTS

S. Saitov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation  
saapel@mail.ru

## Abstract

**Background:** Reverse osmosis is used as a water treatment technology to the power station, it provides a large amount of discharge water due to the low utilization rate of raw water. To solve this problem, there are different methods, most of which involves significant capital costs of their implementation. Currently, there is no technique that allows no capital costs to reduce the size of waste water treatment plants in the schemes of thermal power plants due to the optimization of operating modes of the original equipment and the redistribution of flows in the system.

**Materials and Methods:** In the development of the algorithm methods of system analysis and mathematical statistics were used. The method of study in the performance of the experimental part was to mathematical modeling. As a modeling tool the object-oriented environment VBA programming was used. A large set of complex values of consumption and electrical flows in nodes of the circuit water treatment of thermal power plants from daily monitoring performance tables at the control points has been used as input data.



**Results:** A special algorithm source water distribution system units, was worked out whereby a more economical equipment often operates at a rated load. The method of determining the selectivity of the constants in the processing of with a large amount of data on the reverse osmosis modules was suggested. The ways to reduce waste water in the scheme of water treatment of thermal power plants were given.

**Conclusions:** This algorithm makes it possible to the specify input parameters (transform coefficients of the RO-unit and the desired flow of desalinated water) to calculate the required flow rate of the feed water flow and electrical conductivity of the RO product water and reject water all circuit nodes, the number and the percentage of discharge water that is relevant in determining the optimal operation of the water treatment scheme. The implementation of the algorithm in VBA environment greatly simplifies the process of processing input data and obtain selectivity constants.

**Key words:** membrane desalination technology, reverse osmosis, thermal power plants, water treatment, zero discharge water desalination plant.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы требования к экологической безопасности промышленных предприятий становятся все строже [1–6], благодаря чему стали актуальными направления исследования, связанные с защитой окружающей среды и рационализацией природопользования.

Одним из перспективных направлений является защита водисточников от сбросов с водоподготовительных установок (ВПУ) тепловых электрических станций, согласно которому необходимо уменьшать потребление химических реагентов, а также сокращать объем сточных вод. Методы водоподготовки, применяемые сегодня (преимущественно ионный обмен), не достаточно экологичны и слабо автоматизированы.

С точки зрения защиты окружающей среды и повышения комфортности эксплуатации наиболее эффективно подходят баромембранные технологии, так как они осуществляют безреагентный метод обессоливания воды, при этом установки обратного осмоса (УОО) компактны, а главное высоко автоматизированы [7].

Но и здесь возникают проблемы. Обратный осмос даёт большой объем стоков за счет низкого коэффициента использования исходной воды, что делает данную технологию неэффективной с точки зрения водопотребления (в некоторых случаях до 60 % исходной воды сбрасывается в канализацию) [8]. Для того чтобы решить эту проблему, разработаны следующие приёмы: испарительная дистилляция потоков концентрата, электродеионизация стоков, использование дожимного блока, разбавление концентрата умягченной водой для подпитки теплосети [8], замыкание потоков и создание контуров рециркуляции и т. д. Большая часть этих решений подразумевает существенные капитальные затраты на свою реализацию.

Существует потребность в разработке решения, позволяющего сократить размеры стоков путём выявления скрытых внутренних резервов самой схемы, без использования существенных капитальных и дополнительных эксплуатационных затрат. Выявить такие резервы возможно, создав математическую модель схемы ВПУ ТЭС, а также проанализировав суточный контроль рабочих параметров [9].

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель, представленная в данной работе, построена на основе реально действующей схемы ВПУ Уфимской ТЭС-1. Данная схема считается одной из наиболее сложных с точки зрения расчёта параметров участвующих потоков, благодаря чему идеально подходит для демонстрации эффективности предлагаемого решения.

В основу математической модели заложены арифметические формулы для расчёта физико-химических процессов в мембранных блоках, коэффициенты селективности мембран, ограничивающие параметры по расходам и коэффициентам преобразования, а также специальный алгоритм распределения исходной воды по блокам системы. Макет схемы, по которому строилась математическая модель, приведён на рис. 1.

Условные обозначения на рис. 1:

- УОО 1, УОО 2.1, УОО 2.2, УОО 3 – блоки установки обратного осмоса (УОО);
- А, В, С, ..., i – ступени блоков УОО;
- X0, X1, X21, X22, X3, XА, XВ, ... Xi, XАК, XВК, ... XiК – узлы схемы, соответственно: X0(1) – расход воды в узле схемы (т/ч), электропроводимость воды в узле схемы (мкСм/см);
- Xi – пермеат i-й ступени блока УОО;
- XiК – концентрат i-й ступени блока УОО;
- Sel i – техническая характеристика i-й ступени УОО, соответственно: Sel i (1) – коэффициент преобразования i-ой ступени блока УОО, Sel i (j) – коэффициент селективности j-го компонента i-й ступени УОО;
- K1, K21, K22, K3 – коэффициенты преобразования блоков УОО.

Основной управляющий параметр всей программы – это коэффициент преобразования блока (модуля блока). Коэффициент преобразования блока представляет собой отношение расхода пермеата  $Q_{\text{перм}}$  за блоком к количеству исходной воды  $Q_{\text{исх}}$  перед блоком [7]:

$$K_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{перм}}}{Q_{\text{исх}}}. \quad (1)$$

Этот коэффициент показывает долю воды, полезно использованной блоком.

Таким образом, зная коэффициент преобразования блока и расход исходной воды, по (1) можно рассчитать расходы пермеата (фильтрата) и концентрата:

$$Q_{\text{перм}} = Q_{\text{исх}} K_{\text{п}}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{конц}} = Q_{\text{исх}} \cdot (1 - K_{\text{п}}). \quad (3)$$

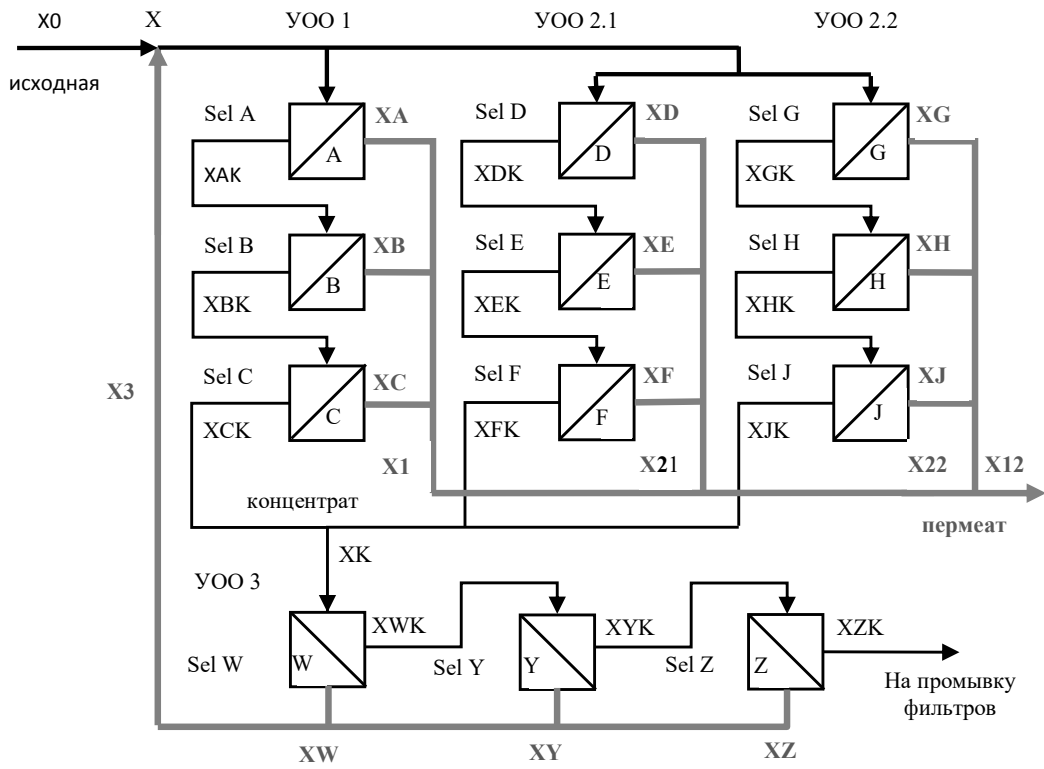


Рис. 1 – Макет схемы водоподготовительной установки уфимской ТЭЦ-1

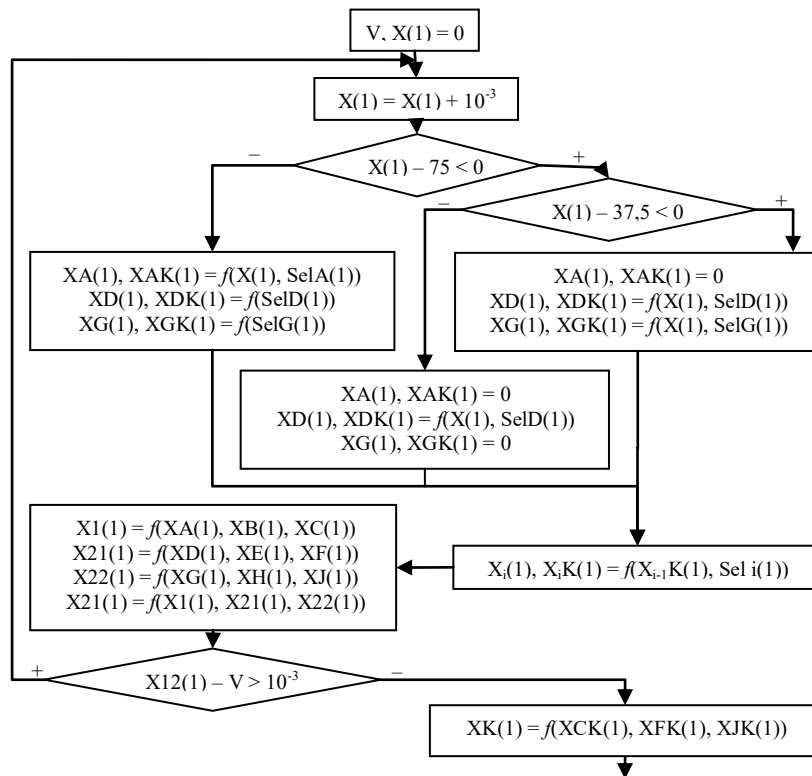


Рис. 2 – Блок-схема распределения исходной воды по блокам схемы

Ещё один не менее важный параметр, необходимый для работы программы, это коэффициент селективности модулей блока. Он показывает долю примесей, попавших из исходной воды в пермеат. Чтобы рассчитать коэффициент селективности модуля блока, существует следующая формула:

$$SelA(2) = \frac{(1 - (1 - SelA(1))^{1-\varphi})}{SelA(1)}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – селективность мембраны.

Селективность мембраны представляет собой константу, показывающую долю задержанных примесей  $j$ -го компонента на мембране. Она определяется экспериментально либо расчётным путем:

$$\varphi_j = \frac{C_{i_{\text{конц}}} \cdot Q_{\text{конц}}}{C_{i_{\text{подача}}} \cdot Q_{\text{подача}}} = \frac{pAK(j) \cdot XAK(1)}{pXO(j) \cdot XO(1)}. \quad (5)$$

Константы селективности для всех баромембранных модулей водоподготовительной установки Уфимской ТЭЦ-1 определялись расчётным путём с применением методов математической статистики на основании данных, представленных в таблицах суточного контроля рабочих параметров.

За распределение исходной воды между блоками УОО в программе отвечает специальный алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2.

Согласно данному алгоритму, в случае глубокого снижения расхода обессоленной воды происходит поэтапное отключение блоков. Оборудование с более низкой эффективностью выводится из работы в первую очередь. Напротив, блоки УОО с большей селективностью и маневренностью чаще всего оказываются задействованными, за счет чего существенно повышается экономичность схемы.

Для проверки адекватности математической модели были произведены расчеты физико-химических характеристик воды в различных узлах схемы. В качестве исходных данных брались сведения, указанные в таблицах суточного контроля рабочих параметров блоков УОО.

### III. РЕЗУЛЬТАТ

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные значения электропроводимости пермеата блока УОО 2 в разные дни месяца при различных коэффициентах преобразования модулей блока и характеристиках исходной воды.

Как видно из графика, отклонение расчетных значений от экспериментальных не столь существенно: усредненная погрешность составляет 0,14 %, среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от среднеарифметического выборки – 0,0364 мкСм/см, что в свою очередь даёт возможность на основании данной математической модели осуществлять достаточно точные прогнозы относительно показателей работы обратноосмотических модулей при заранее определенных исходных параметрах – электропроводимости исходной воды и коэффициента преобразования блоков. Программа [10] также позволяет

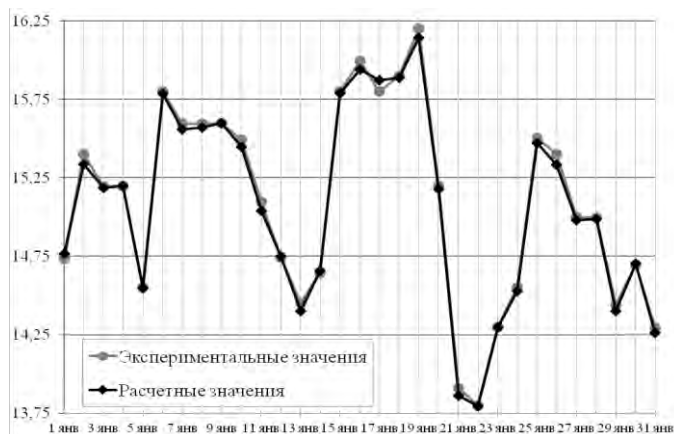


Рис. 3 – Показатели электропроводимости пермеата блока УОО 2 (январь 2015 года)

подобрать эти исходные параметры таким образом, чтобы получить наиболее оптимальные показатели качества первичного пермеата при минимальном объеме стоков (4–7 %).

### Список литературы

- [1] Плата за негативное воздействие на окружающую среду // Об охране окружающей среды: федер. закон от 10 января 2002 г. № 7. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [2] О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления: постановление Правительства от 12 июня 2003 г. № 344. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [3] Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон РФ от 23 ноября 2009 г. № 261. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [4] Об отходах производства и потребления: федер. закон РФ от 24 июня 1998 г. № 89. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [5] О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: федер. закон РФ от 30 марта 1999 г. № 52. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [6] О техническом регулировании: федер. закон РФ от 27 декабря 2002 г. № 184. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [7] Чичирова Н.Д., Власов С.М. Баромембранные технологии в энергетике: монография. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. 272 с.
- [8] Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Сайтов С.Р. Моделирование и оптимизация схемы водоподготовки ТЭС с обратноосмотическими модулями // Труды Академэнерго. 2016. № 2. С. 60–72.
- [9] Сайтов С.Р., Чичирова, Н.Д., Чичиров А.А. Баромембранные технологии в схеме водоподготовки Уфимской ТЭЦ-1 // Вестник КГЭУ. 2017. № 2(34). С. 58–67.
- [10] Программа расчета физико-химических процессов в схемах водоподготовки ТЭС с обратноосмотическими модулями: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016615906 от 2 июня 2016 г.
- [11] Программа расчета состава исходной воды, пермеата и концентрата установки обратного осмоса: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018611499 от 2 февраля 2018 г.
- [12] Enhancing the Ecological and Operational Characteristics of Water Treatment Units at TPPs Based on Baromembrane Technologies / N. Chichirova [et al.] // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64, № 12. P. 920–930.

# ПОЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НОВОГО СПОСОБА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

Таймаров М.А., Осипов А.Л., Тюряева С.А., Ялалов И.Ф.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
Sve\_t\_i\_ka@mail.ru, insaf-j@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Известна конструкция, содержащая газоотводящую и дутьевую скважины, газовую турбину, воздушный компрессор, электрогенератор, парогенератор, газоочиститель [1]. Недостатками данной конструкции являются:

1. Значительные потери угольного вещества в недрах при аварийном выведении из строя скважин вследствие затухания процесса подземной газификации угля, возникающего на участках использования установки с неблагоприятными условиями сложного горно-геологического строения: высокой зольностью более 40 % и толщиной газифицируемого пласта менее 3 м.

2. При затухании процесса горения не предусмотрено приспособлений и операций для вторичного розжига газифицируемого угольного пласта с использованием технических возможностей непосредственно самой установки, что приводит к дополнительным материальным и эксплуатационным затратам и к снижению эффективности подземной газификации.

3. Нестабильность получения газа заданной калорийности вследствие дестабилизации параметров газодутьевых потоков и непрерывного изменения формы и размеров реакционного канала, а также не предсказуемого во времени обрушения пород в выгазованное пространство, из-за чего непрерывно меняется температурный режим в реакционной зоне канала, что в конечном итоге снижает эффективности подземной газификации угля.

**Результаты:** Указанные недостатки устранены в предлагаемой технологии, которая направлена на решение задачи уменьшения потерь угольного вещества и повышения эффективности процесса подземной газификации угля.

**Выводы:** Схемы преобразования твердых углеводородных топлив, к которым относятся ископаемые угли, в газообразное топливо путем осуществления внутрипластовой подземной огневой газификации являются актуальным направлением в энергетике. Разработанная технология предназначена для использования в удаленных от промышленных центров районах залегания твердых углеводородных топлив, для которых транспортировка этих топлив экономически не рентабельна, и может быть использована для выработки тепловой и электрической энергии по месту их генерации.

**Ключевые слова:** газификация угля, скважины, эффективность процесса, энергоноситель.

# RECEIVING THE ENERGY CARRIER BASED ON A NEW METHOD OF GASIFICATION OF COAL

M. Tajmarov, A. Osipov, S. Tjurjaeva, I. Jalalov  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
insaf-j@mail.ru, Sve\_t\_i\_ka@mail.ru

## Abstract

**Background:** Known is a structure comprising a gas outlet well, a blowhole, a gas turbine, an air compressor, an electric generator, a steam generator, a gas scrubber [1]. Disadvantages of the known device:

1. Significant losses of coal matter in the bowels during emergency shutdown of wells due to extinction of the process of underground gasification of coal arising in the areas of use of the installation with unfavorable conditions of complex mining and geological structure: high ash content of more than 40 % and thickness of the gasified formation is less than 3 m.

2. At the attenuation of the combustion process, there are no devices and operations for secondary ignition of the gasified coal seam using the technical capabilities of the installation itself, which leads to additional material and operational costs and a decrease in the efficiency of underground gasification.

3. Instability of obtaining a gas of a given caloric value due to destabilization of the parameters of gas-blowing streams and a continuous change in the shape and size of the reaction channel, as well as the unpredictable breakdown of rocks into the vygazovannoe space, due to which the temperature regime in the reaction zone of the channel is continuously changing, which ultimately reduces the efficiency of underground coal gasification.

**Results:** These disadvantages are eliminated in the proposed technology, which is aimed at solving the problem of reducing losses of coal matter and increasing the efficiency of the process of underground gasification of coal.

**Conclusions:** The conversion schemes for solid hydrocarbon fuels, which include fossil fuels, into gaseous fuels through the implementation of in-situ underground fired gasification are a topical direction in the energy sector. The developed technology is intended for use in remote regions of solid hydrocarbon fuels for which the transportation of these fuels is economically unprofitable, and can be used to generate thermal and electric energy at the place of their generation.

**Key words:** gasification of coal, wells, process efficiency, energy carrier.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Имеется конструкция, содержащая газоотводящую и дутьевую скважины, газовую турбину, воздушный компрессор, электрогенератор, парогенератор, газоочиститель [1]. К недостаткам данной конструкции можно отнести:

1. Значительные потери угольного вещества в недрах при аварийном выведении из строя скважин вследствие затухания процесса подземной газификации угля, возникающего на участках использования установки с неблагоприятными условиями сложного горно-геологического строения: высокой зольностью более 40 % и толщиной газифицируемого пласта менее 3 м.

2. При затухании процесса горения не предусмотрено приспособлений и операций для вторичного розжига газифицируемого угольного пласта с использованием технических возможностей непосредственно самой установки, что приводит к дополнительным материальным и эксплуатационным затратам и к снижению эффективности подземной газификации.

3. Нестабильность получения газа заданной калорийности вследствие дестабилизации параметров газодутьевых потоков и непрерывного изменения формы и размеров реакционного канала, а также не предсказуемого во времени обрушения пород в выгазованное пространство, из-за чего непрерывно меняется температурный режим в реакционной зоне канала, что в конечном итоге снижает эффективности подземной газификации угля.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для удобства на рисунке представлен фрагмент с газифицируемым участком угольного пласта 1, состоящий из двух газоотводящих скважин 2 и двух дутьевых скважин 3 и одной наклонно-горизонтальной скважины 5 с условной границей 4 зоны сдвига пород. На практике число скважин и шаг между скважинами 2, 3 и 5 в направлениях по горизонтальной плоскости выбирается исходя из мощности и толщины угольного пласта с заранее обусловленным возможным обрушением пород вследствие с размерами выгазованного пространства, определяемого по границам 4 зоны сдвига.

Газоотводящие скважины 2 предназначены для удаления газообразных продуктов из реакционной зоны угольного пласта 1 через газовую турбину 7. Дутьевые скважины 3 служат для подачи сжатого воздуха от компрессора 8 и перегретого пара от парогенератора 10 в зону термохимической реакции при газификации угольного пласта 1.

Газоотводящие скважины 2 и дутьевые скважины 3 на надземном участке обвязаны между собой транспортирующими трубами с электроприводными задвижками 13, которые служат для обеспечения требуемых технологических параметров газификации по температуре и давлению и газодинамики дутьевых потоков.

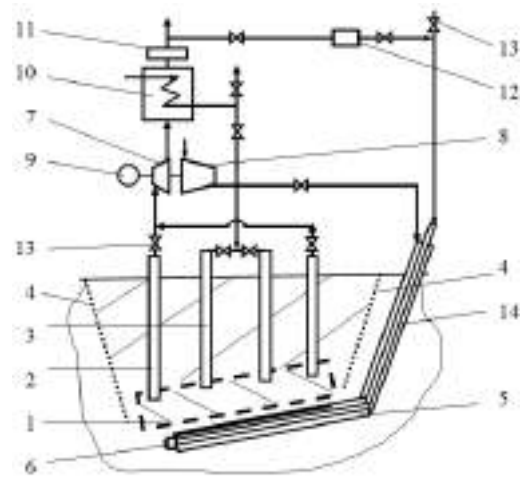


Схема получения энергоносителя на основе нового способа газификации угля: 1 – угольный пласт; 2 – газоотводящие скважины; 3 – дутьевые скважины; 4 – граница зоны сдвига; 5 – наклонно-горизонтальная скважина; 6 – газовая горелка-воспламенитель; 7 – газовая турбина; 8 – воздушный компрессор; 9 – стартер-генератор; 10 – парогенератор; 11 – газоочиститель; 12 – газовый ресивер; 13 – электроприводные задвижки, 14 – гибкая труба

Наклонно-горизонтальная скважина 5 служит для размещения в ней гибкой трубы с перемещаемой газовой горелкой-воспламенителем 6, которая предназначена для воспламенения угля в нижней части угольного пласта за счет сжигания определенного количества собственного газа, поступающего из газового ресивера 12 при частичном потухании основной реакционной зоны. Снаружи гибкой трубой 14 через наклонно-горизонтальную скважину подается воздух от компрессора 8 для реакции окисления угля. Факел от горелки 6 имеет выход к угольному пласту 1 через верхний вырез горизонтального участка скважины 5. При недостатке собственного газа топливный газ в горелку 6 может быть подан от внешнего стороннего источника через задвижку 13.

Газовая турбина 7 служит для отсасывания продуктов горения из реакционной зоны через скважины 2 при первоначальном пуске установки. При установившемся режиме работы газовая турбина выполняет функцию турбодетандера, преобразуя избыточное давление внутри пластового горения, составляющего около 3,5 МПа в механическую энергию вращения, которая преобразуется стартер-генератором 9 в электроэнергию и передается потребителям.

Стартер-генератор 9 служит для первоначального раскручивания вала турбины 7 и вала компрессора 8. После выхода установки на рабочий режим стартер-генератор 9 генерирует электроэнергию во внешнюю электросеть.

Парогенератор 10 служит для превращения поступающей питательной воды в перегретый пар, подаваемый непосредственно для осуществления реакции газификации угольного пласта 1 и внешним потребителям.

Газоочиститель 11 служит для очистки и охлаждения получаемого при газификации угля от вредных твердых и смолистых веществ и газообразных включений перед подачей вырабатываемого газа потребителям.

Газовый ресивер 12 служит для накопления и аккумуляции вырабатываемого топливного газа для собственных нужд.

Начальной стадии производится бурение серии газоотводящих 2, дутьевых 3 и наклонно-горизонтальных 5 скважин на весь предназначенный для выгазовывания участок угольного пласта 1. Газоотводящие 2 и дутьевые 3 скважины заканчиваются угольными стволами без обсадки трубами. Затрубное пространство тампонируется.

На первом подготовительном этапе запуска установки производится отжатие влаги из угольного пласта, при котором через скважины 2 осуществляется откачка грунтовой воды и одновременно нагнетается сжатый воздух в скважины 3 и 5. После осушки способом термогазохимического воздействия проводится фильтрационная сбойка скважин, то есть получение микротрещин в угольном пласте и между газоотводящими 2 и дутьевыми скважинами 3, 5.

Основой способа является организация прогрева и активизации трещинообразования в угольном пласте раскаленными газами, получаемыми в ходе реакции окисления угля кислородосодержащим веществом, в качестве которого используется аммиачная селитра, на обрабатываемом участке прискважинной зоны в радиусе до 20 м.

Высокая растворимость аммиачной селитры в воде, составляющая 363 г на 100 г воды при 32 °С, при тепловом эффекте горения 335 ккал/кг и кислородном балансе +20 % делает нечувствительной зону горения селитры к присутствию воды. При сгорании 1 кг аммиачной селитры образуется 419 л высших окислов азота. Кроме достижения термогазового разрыва угольного пласта продуктами горения аммиачной селитры, углерод угольного вещества вступает в реакцию с кислородом, образуя окись углерода и углекислый газ. Растворение двуоксида азота в воде образует азотную кислоту, а уголь, погруженный в нее, ярко разгорается.

Фильтрационная сбойка скважин 2 и 3 осуществляется закачиванием пересыщенного раствора аммиачной селитры в пласт 1 через скважины 2 и 3 и размещением в пласте электрической спирали с напряжением 12–24 В для нагрева кристаллов селитры. Кристаллизация происходит в течение трех суток. При подаче напряжения на спираль происходит нагрев селитры, и при 200 °С начинается реакция горения кристаллов селитры с нарастанием давления в микроканалах угольного пласта 1 между скважинами 2 и 3.

Скорость горения кристаллов аммиачной селитры при атмосферном давлении составляет 0,08 с. Скорость нарастания давления от 61 до 132 МПа/с. За очень короткий промежуток времени происходит полное выгорание аммиачной селитры с образованием большого количества микротрещин в тлеющем угле. При подаче от компрессора 8 воздуха в смеси с паром от парогенератора 10 или без него в зависимости от режима через дутьевую скважину 3 и одновременном отсосе продуктов газификации из пласта 1

происходит выход на расчетный режим работы с температурой в зоне термохимической реакции около 1000 °С и давлением 3,5 МПа. После выхода на расчетный режим газовая турбина 7 функционально работает как турбодетандер с генерированием электрической энергии стартер-генератором 9.

При дестабилизации параметров газодутьевых потоков из-за высокой зольности локального участка пласта 1 и получения низкокалорийного газа газоанализатор на газоотводящей скважине 2 выдает электрический сигнал на пульт управления. С пульта управления подаются электрические сигналы на электроприводные задвижки 13 и на горелку 6 для подачи собственного газа и дутьевого воздуха для воспламенения газа и прожига дополнительной реакционной зоны в угольном пласте 1 около газоотводящей скважины 2. При помощи этого обеспечивается положительный эффект заявляемого устройства по сравнению с известным устройством, в котором не имеется газовой горелки-воспламенителя 8.

При полном внезапном потухании реакционной зоны из-за обрушения пород в известной установке не имеется узлов для повторного быстрого воспламенения угля и прожига реакционного канала в толще пласта. Заявляемая установка имеет для повторного воспламенения наклонно-горизонтальную скважину, расположенную вне границы зоны сдвижения пород при обрушении. Эта скважина позволяет выполнить быстрое повторное воспламенение и прожиг реакционного канала воспроизводится путем дополнительной подачи собственного топливного газа из газового ресивера 12 и дополнительной подачи воздуха от компрессора 8 при работе стартер – генератора 9 в пусковом режиме. Продольное перемещение горелки 9 по каналу 5 обеспечивает непрерывный прожиг реакционного канала в угольном пласте 1 (на рисунке узел продольного перемещения не показан).

При получении некондиционного газа с низкой теплотой сгорания или с отклонениями химического состава от регламентированного в заявляемой установке в горелку-воспламенитель 6 подается избыточное количество собственного низкокалорийного газа, а в дутьевые скважины 3 подается избыточное количество перегретого водяного пара. Увеличивается подача дутьевого воздуха и сдвигается температурная зона ведения процесса газификации в область высоких температур и давлений с получением кондиционного газа. Известная установка не имеет данных узлов для повышения эффективности процесса газификации угля.

### III. РЕЗУЛЬТАТ

Недостатки устранены в предлагаемой технологии, которая направлена на решение задачи уменьшения потерь угольного вещества и повышения эффективности процесса подземной газификации угля.

#### Список литературы

- [1] Энергетическая установка для подземной газификации угля: п. м. 57422 Рос. Федерация № 2006118821/22; заявл. 30.05.06; опубл. 10.10.06, Бюл. № 28.

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ

Герасимов Д.О.<sup>1</sup>, Суслов К.В.<sup>1</sup>, Уколова Е.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН»

Иркутск, Россия

ukolovaekaterina@yandex.ru, gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Для уменьшения затрат на энергоносители возможно применение различных технико-экономических решений. Для использования концепции мультиэнергетических систем необходимо провести анализ различных функциональных схем мультиэнергетических систем.

**Материалы и методы:** Технико-экономический анализ.

**Результаты:** Предложен подход, при котором все энергетические параметры энергоносителей приводятся к единой системе единиц. Это позволяет проводить более наглядный анализ режимов энергопотребления и в случае моделирования систем проводить алгебраическое суммирование по различным каналам энергии.

**Выводы:** Технико-экономическое обоснование применения интегрированных систем электроснабжения может быть обосновано только исходя из целевых функций решаемых данных классов систем. В данном случае рассматривалась только экономическая целесообразность применения отдельных элементов данной концепции. Применение модели позволит сократить оплату за электроэнергию в соответствии с законодательством за счет оптимизации графика нагрузки по каналу электроснабжения.

**Ключевые слова:** интегрированная система энергоснабжения, преобразователи энергии, оптимизация энергопотребления, экономическая эффективность использования энергоресурсов.

## TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION OF THE USE OF ELECTRIC ENERGY CONVERTERS IN THERMAL

D. Gerasimov<sup>1</sup>, K. Suslov<sup>1</sup>, E. Ukolova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University

<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Irkutsk, Russian Federation

ukolovaekaterina@yandex.ru, gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru

## Abstract

**Background:** To solve the problem of reducing energy costs, it is possible to use various technical and economic solutions. To use the concept of multi-energy systems, it is necessary to analyze various functional circuits of multi-energy systems.

**Materials and methods:** Technical and economic analysis

**Results:** An approach is proposed in which all energy parameters of energy carriers are reduced to a single system of units. This allows more intuitive analysis of the power modes in the case of simulation systems to the algebraic summation across channels of energy.

**Conclusions:** The feasibility study of the use of integrated power supply systems can be justified only on the basis of the target functions of the data being solved classes of systems. In this case, only the economic feasibility of the application of certain elements of the concept was considered. The application of the model will reduce the payment for El. energy according to the legislation due to optimization of the schedule of loading on the channel of power supply.

**Key words:** integrated power supply system, energy converters, energy consumption optimization, economic efficiency of energy use.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Целесообразность применения преобразователей электрической энергии в тепловую может быть обоснована только исходя из годовых графиков тепловых нагрузок. Поэтому оптимизационную задачу по снижению затрат, вызванных максимальными значениями тарифа за электроэнергию, можно решить, используя накопители электроэнергии.

## II. СТАДИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера выбрано одно из зданий кампуса университета, имеющее следующие графики электро- и теплопотребления, горячего и холодного водоснабжения (рис. 1, 2).

На основании полученных данных проведен экономический расчет и построены соответствующие графики (рис. 3).

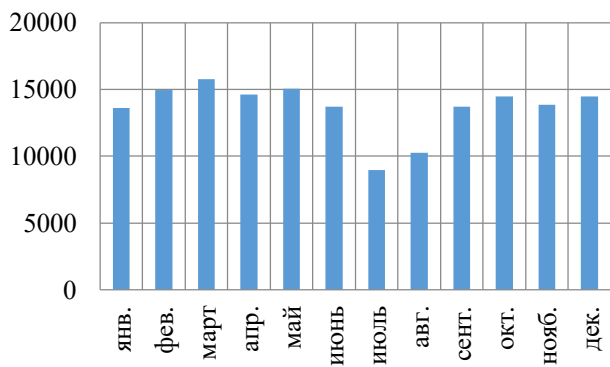


Рис. 1 – Потребление энергии (кВт·ч)

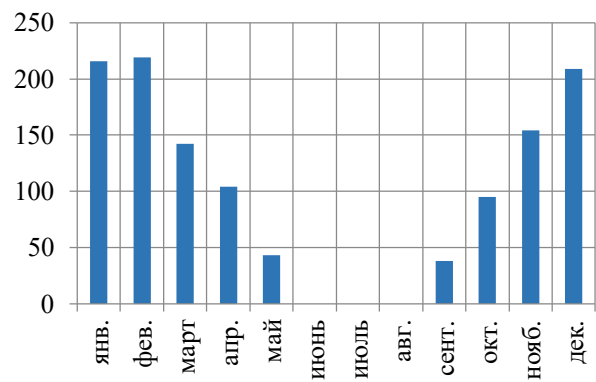
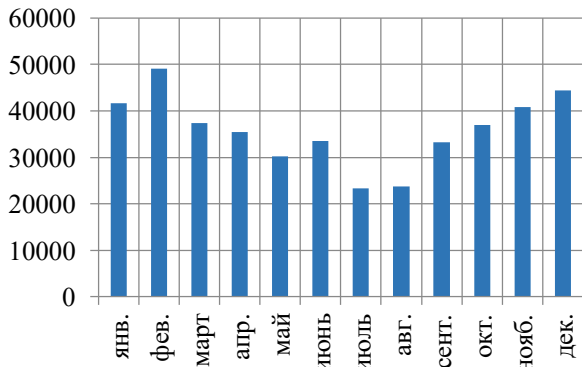
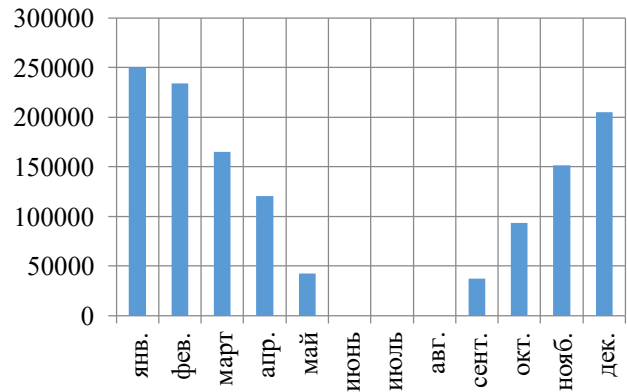


Рис. 2 – Теплопотребление (Гкал)



а



б

Рис. 3 – Оплата за электроэнергию (а) и теплопотребление (б) в рублях

Были выявлены среднегодовые данные по превышению нагрузки по времени. Прослеживается два временных диапазона максимальных величин тарифа при расчете платы за электроэнергию. Это позволило провести сравнение оплаты за электроэнергию без учета тарифа максимальной мощности.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

На рис. 5 наглядно представлено количество электроэнергии, которое возможно использовать для преобразования в тепловую или накопления для уменьшения экономических потерь в случае максимальных тарифов.

Анализ энергопотребления по месяцам позволил выделить временные диапазоны, в которых оплата за электроэнергию имеет максимальное значение. Можно снизить стоимость электроэнергии за счет управления потреблением, для этого необходимо в спрогнозированные часы максимума в регионе разгружать потребление предприятия.

#### Список литературы

[1] Voropai N. and Stennikov V. Smart integrated energy systems – A Russian dimension. CRIS Workshop, Berlin, 2013. P. 1–5.

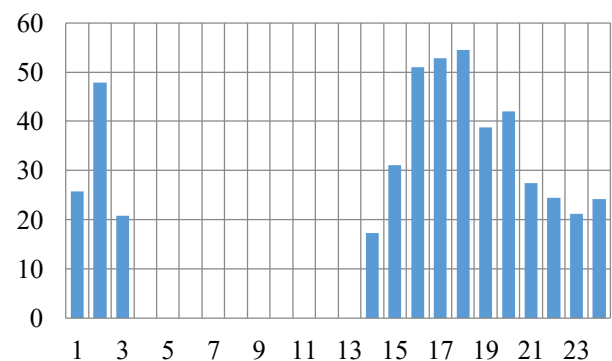


Рис. 4 – Количество электроэнергии, необходимой для преобразования

[2] Modelling and valuing multi-energy flexibility from community energy systems / H. Wang [et al.]. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2017.

[3] Analysis on economic operation of multi-energy flow system / Z. Wang // The Journal of Engineering. 2017. Issue 13. P. 1494–1498.

[4] Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. Имитационное моделирование мульти-энергетических систем // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 147–150.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИОАБСОРБЦИОННОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ С ЛЬДОАККУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЖИЛОГО ДОМА

Халлыев И.А., Платонова А.В.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
ezker@mail.ru

## Аннотация

Представлены результаты моделирования гелиоабсорбционной теплонасосной системы отопления с льдоаккумулятором (ЛА) для жилого дома малоэтажной застройки в климатических условиях Поволжья. Показано, что изучаемая система отопления имеет коэффициент эффективности около 1,2.

**Состояние вопроса:** Проведен математический расчет эффективности использования гелиоабсорбционной теплонасосной системы отопления для жилого дома.

**Материалы и методы:** Математическое моделирование.

**Результаты:** Солнечные коллекторы являются основным источником тепла для теплового насоса во всех временных интервалах. Доля тепла, извлеченного из льдоаккумулятора, небольшая, около 10 %. Разряженный (замороженный) к январю месяцу льдоаккумулятор регенерируется в апреле с помощью солнечного коллектора. Теплопритоки от грунта к льдоаккумулятору значительно ниже (менее 2 %) от общей тепловой нагрузки.

**Выводы:** Как и следовало ожидать, основная тепловая нагрузка на систему совпадает с осенне-зимним периодом, когда запаса энергии льдоаккумулятора и сезонной солнечной радиации недостаточно для покрытия потребностей на отопление. В таких условиях недостаток энергии восполняется включением пикового резервного электродогревателя.

**Ключевые слова:** солнечные коллекторы, малоэтажная застройка, отопление, тепловой насос, льдоаккумулятор, эффективность.

## MODELING OF THE HELIOR-ABSORPTION HEAT PUMPS HEATING SYSTEM WITH AN ICEBOX FOR A DWELLING HOUSE

I. Hallyev, A. Platonova  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
ezker@mail.ru

## Abstract

**Background:** The results of simulation of the helioabsorption heat pump heating system with an ice accumulator for a residential house of low-rise buildings in the climatic conditions of the Volga region are presented. It is shown that the heating system under study has an efficiency factor of about 1.2.

**Materials and methods:** Math modeling.

**Results:** Solar collectors are the main source of heat for a heat pump in all time intervals. The fraction of heat extracted from the ice accumulator is small, about 10%. Discharged (frozen) by January, the ice accumulator is regenerated in April with the help of a solar collector. Heat inflow from the ground to the ice accumulator is much lower (less than 2%) of the total heat load.

**Conclusions:** As expected, the main thermal load on the system coincides with the autumn-winter period, when the energy reserve of the accumulator and seasonal solar radiation is insufficient to cover the heating needs. In such conditions, the lack of energy is compensated by the inclusion of a peak backup electric boiler.

**Key words:** solar collectors, low-rise buildings, heating, heat pump, ice accumulator, efficiency.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Мы давно привыкли к тому, что в пригородных домах и коттеджах в качестве источника тепловой энергии стоит газовый или электрический котёл, который работает по принципу сжигания природных ископаемых. Однако,

для того чтобы установить такой котёл, к постройке необходимо провести выделенные тепловые и газовые сети, что приводит к большим затратам.

За границей давно используют альтернативные источники тепловой энергии – воздух, грунтовые воды, воды водоемов, энергию солнца. Извлекают теплоту из окружающей среды

с помощью теплонасосной системы теплоснабжения (ТСТ), основой которого является тепловой насос. Большими преимуществами данной системы является экологичность и экономичность.

Недавно были представлены эффективные теплонасосные системы отопления с применением ЛА, которые могут быть установлены там, где глубокое бурение невозможно или запрещено.

Центральным компонентом теплонасосной системы отопления с применением ЛА является тепловой насос «рассол/вода». Основным источником низкопотенциального тепла для теплового насоса является солнечный коллектор, который собирает солнечную радиацию и тепло окружающего воздуха. Подземный ЛА работает «буферным складом» тепловой энергии и источником тепла для теплового насоса при нехватке тепловой энергии от солнечного коллектора. ЛА накапливает тепло (около 80 %) в виде скрытой теплоты, т. е. в фазе перехода воды в лед. Кроме того, ЛА может получать тепло от грунта и стоков. В случае замораживания ЛА (около  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) тепловой насос выключается, и теплоснабжение обеспечивается пиковым электронагревателем.

Поддержание оптимального рабочего режима системы будет осуществлять программа, разработанная на основе нашей математической модели.

Комбинированное использование солнечных коллекторов и теплонасосных систем без ЛА получило популярность в последнее десятилетие, благодаря возможности увеличения использования возобновляемых источников энергии в области теплоснабжения и на объектах местной водоподготовки. Исследования систем солнечных коллекторов

и тепловых насосов ведутся на протяжении многих лет. Несмотря на это, только недавно было достигнуто значительное увеличение количества установленных таковых систем на Европейском промышленном рынке.

Первые попытки включения льдоаккумулятора в состав системы солнечного коллектора и теплового насоса были предприняты в 1970-х годах. Однако только на протяжении последнего десятилетия компании начали заказывать такой комплект отопительной системы.

Благоприятный поворот в развитии энергетической политики страны связан с широким внедрением в практику систем теплоснабжения, использующих возобновляемые источники энергии. Эффективные системы отопления и горячего водоснабжения возможны на основе коллекторов солнечной энергии совместно с тепловыми насосами. В отсутствие естественных водоемов самыми эффективными источниками тепла для теплонасосных систем теплоснабжения являются скважины, пробуренные до водоносного слоя, которые весьма дороги. Однако недавно были представлены эффективные теплонасосные системы отопления с ЛА, не требующие глубокого бурения, т. е. не связанные с рисками получения разрешения и в то же время имеющие сопоставимую стоимость [1–3]. Льдохранилище может быть установлено там, где глубокое бурение невозможно или запрещено, а также в водохранимых зонах, так как ЛА заполняется чистой водой. Цель работы – определить сезонную эффективность гелиоабсорбционной теплонасосной системы (ГАТНС) отопления с льдоаккумулятором жилого дома малоэтажной застройки в климатических условиях Поволжья. Схема энергетических потоков в ГАТНС представлена на рис. 1.

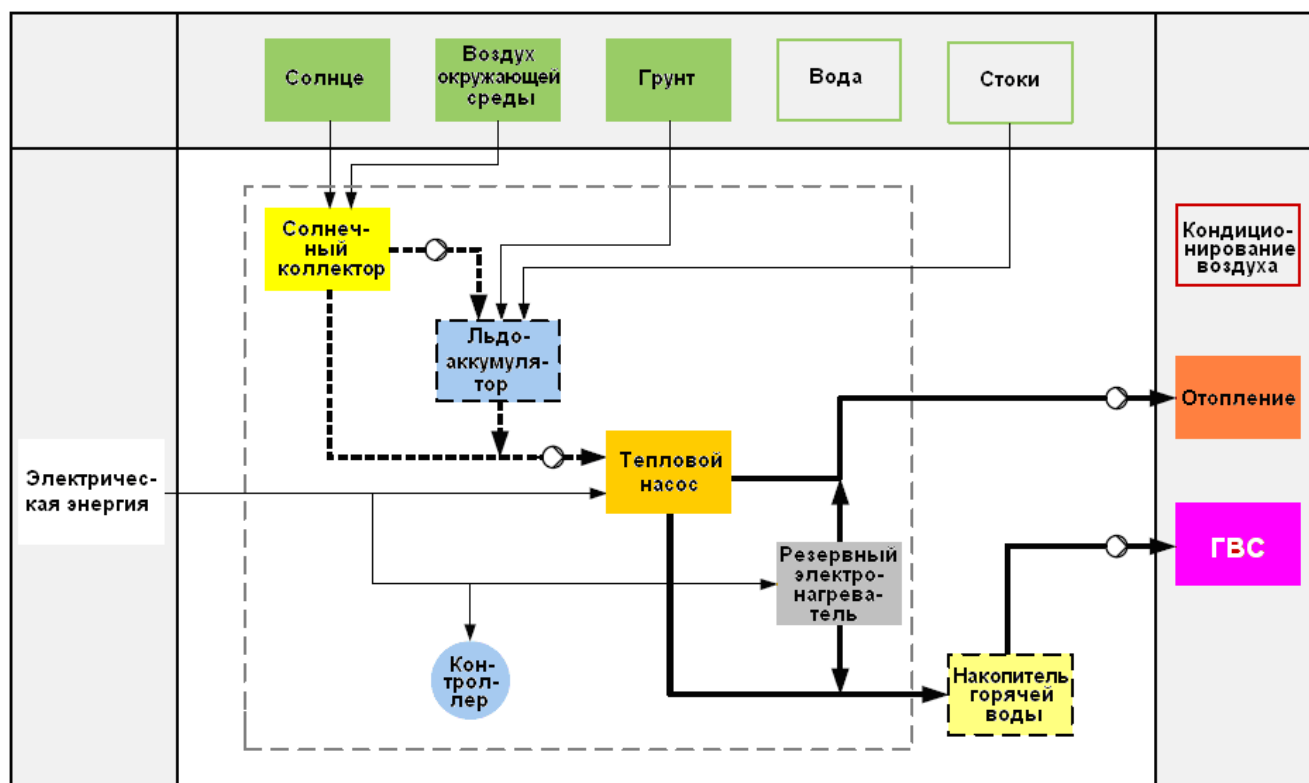


Рис. 1 – Структурная схема энергетических потоков в ГАТНС с ЛА

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель ГАТНС с ЛА базируется на уравнениях теплового баланса:

$$Q_{от} + Q_{ГВС} + Q_{СК} + Q_{пос} + Q_{ЛА} + E_{ЭН} = 0, \quad (1)$$

где  $Q_{от} = Q_{пот}$  – тепло, расходуемое на отопление, Вт;  $Q_{пот}$  – потери тепла здания, Вт;  $Q_{ГВС}$  – тепло, расходуемое на горячее водоснабжение, Вт;  $Q_{СК}$  – тепло, полученное солнечным коллектором, Вт;  $Q_{пос}$  – тепло поступающее в здание через окна и фасад от солнечной радиации, Вт;  $Q_{ЛА}$  – теплопоступления из льдоаккумулятора посредством теплового насоса, Вт;  $E_{ЭН}$  – теплопоступления от резервного «пикового» электронагревателя, Вт.

ЛА является «буферным складом» тепла, которая в основном хранится в виде скрытой энергии кристаллизации воды. Тепло, полученное солнечным коллектором, может быть накоплено в льдоаккумуляторе или в летнее время, непосредственно бак – аккумулятор ГВС. Следует отметить, что в период «стагнации», когда система находится в спящем режиме, температура высококипящего теплоносителя (пропиленгликоль + вода) может достигнуть более 100 °С. В зависимости от температуры воды и грунта ЛА может передавать энергию или получать энергию от грунта. Аналогично в летний период ЛА может служить источником холода, одновременно накапливая тепло и повышая энтальпию воды.

Тепло, вырабатываемое солнечным коллектором, состоит из конвективного и радиационного составляющих.

Конвективный теплоприток определяется по формуле:

$$Nu = 0,135 \cdot Ra^{1/3}.$$

Здесь:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} - \text{число Нуссельта, где } \alpha - \text{коэффициент теплоотдачи, Вт/м}^2 \cdot \text{К; } \lambda - \text{коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м} \cdot \text{К; } l = S_k/P_k - \text{характерный размер, м; } S_k - \text{площадь коллектора, м}^2; P_k - \text{периметр коллектора, м;}$$

$Ra = Gr \cdot Pr$  – число Рэлея, где  $Gr = l^3 \rho^2 g \Delta T \beta \frac{1}{\mu^2}$  – число Грасгофа;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорения свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta T = T_{о.с} - T_{с.к}$  – температурный напор, К;  $T_{о.с}$  – температура воздуха окружающей среды, К;  $T_{с.к}$  – температура коллектора, К;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1/К;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} - \text{число Прандтля, где } C_p - \text{изобарная теплоемкость воздуха, Дж/кг} \cdot \text{К.}$$

Коэффициент полезного действия солнечного коллектора принимается  $\eta_{ск} = 0,8$ .

## III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Потери рассчитываются в зависимости от средней температуры наружного воздуха. Влияние ветра на потери не учитывается.

Архитектура здания следующая. Конструкция стен 1-го этажа: наружная стена – кирпич силикатный 0,12 м (0,5 кирпича), утеплитель пенополистирол 0,1 м, кирпич керамический пустотелый 0,5 м (2 кирпича), без вентилируемой прослойки. Дом 2-этажный со скатной кровлей 9×10 м<sup>2</sup> (уклон 45°), высота 1 этажа 3 м. Окна 1,2×0,9 м двухкамерный пластик: 6 на 1 этаже (по 1 на торцах, 3 на одной стороне, 1 на противоположной) и 2 на мансарде. Дверь входная утепленная 1×2,16 м. Утепление пола – минеральная вата толщиной 0,15 м, подвал неотапливаемый с окнами.

Суммарные теплопотери аппроксимированы формулой, кВт:

$$Q_{пот} = 0,00148 t_{о.с} - 0,035.$$

Горячее водоснабжение (ГВС) принимается согласно нормам Республики Татарстан 2015 г. 3,44 м<sup>3</sup>/чел.·месяц. Температура воды 45–55 °С. В пересчете на нагрев холодной воды с 10 до 50 °С на семью из 4-х человек:

$$Q_{ГВС} = 4 \cdot 215 = 860 \text{ Вт.}$$

Теплопоступления в здание от солнечной радиации через окна рассматривается по данным, исходя из величин прямой и солнечной радиации на горизонтальную и вертикальную поверхности с учетом пространственной ориентации при действительных условиях. Общие теплопоступления в зданиях определяется с учетом 18 % остекленности.

Резервный электродкотел включается при наружной температуре воздуха ниже бивалентной или замораживания (ниже 0 °С) ЛА.

Моделирование начинается с 00 ч 00 мин 1 сентября. Дискретность моделирования по времени равна 200 с, по пространству 0,01 м. Прогретый к сентябрю грунт имеет равномерно распределенную температуру 8 °С. При моделировании приняты следующие технические характеристики компонентов ГАТНС: гелиоабсорбер (батарея солнечных коллекторов) открытого типа, расположенный с наклоном 45° и общей площадью 18 м<sup>2</sup>, ЛА бетонный объемом 18,4 м<sup>3</sup>, коэффициент преобразования теплового насоса мощностью 12 кВт равен 4,5. Данные параметры приняты на основе источников [1–4].

Результаты моделирования представлены на рис. 2. Теплопритоки от грунта к ЛА значительно ниже (менее 2 %) общей тепловой нагрузки.

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как и следовало ожидать, основная тепловая нагрузка на ГАТНС совпадает с осенне-зимним периодом, когда запаса энергии льдоаккумулятора и сезонной солнечной радиации недостаточно для покрытия потребностей на отопление. В таких условиях недостаток энергии восполняется включением пикового резервного электродкотла. Стагнация (неполное использование солнечной энергии)

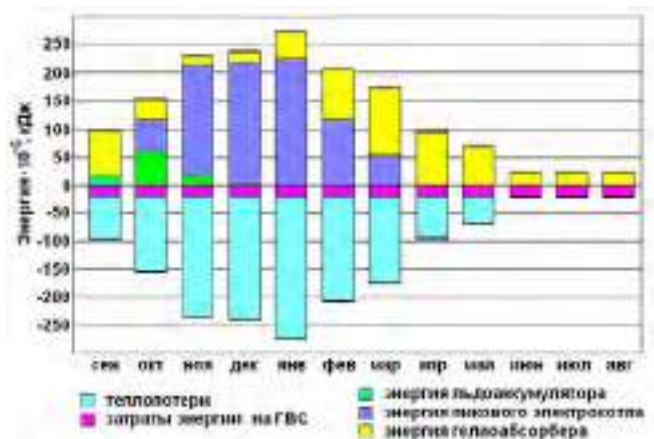


Рис. 2 – Ежемесячный энергетический баланс ГАТНС с ЛА

наступает в мае, когда работоспособность льдоаккумулятора восстановлена, потребности в тепловой энергии ограничиваются ГВС. Эффективность ГАТНС определяется коэффициентом, представляющим собой отношение суммы извлеченной с помощью теплового насоса энергии

и переданной системе ГВС непосредственно гелиоабсорбером к сумме всех электроэнергетических затрат. Коэффициент эффективности моделируемой системы отопления при принятых технических характеристиках оценен как 1,1–1,2, что безусловно является низким показателем по сравнению с данными (около 4) исследований [1–4], проведенными для условий мягкого климата западной и центральной Европы. Тем не менее, моделирование показывает, что для принятых исходных данных экономия энергетических ресурсов возможна на уровне 50–55 %.

### Список литературы

- [1] Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А. Оптимизация полного теплового насоса в процессах химической технологии // Химическая промышленность. 2001. № 1. С. 18.
- [2] Об одном направлении повышения эффективности энергетических систем на базе авиационных газотурбинных двигателей / В.Е. Алемасов [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 1998. № 4. С. 92–96.
- [3] Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства / Р.А. Амерханов [и др.]. М.: Колос-Пресс, 2002. 424 с.
- [4] Амерханов Р.А. Тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 2005. 160 с.
- [5] Аминов Р.З. Векторная оптимизация режимов работы электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1994. 304 с.

# ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ В СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНОМ КОНТАКТНОМ УСТРОЙСТВЕ

Хафизова А.И.<sup>1</sup>, Круглов Л.В.<sup>1</sup>, Дмитриева О.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

Казань, Россия

aliyahi@mail.ru

## Аннотация:

**Состояние вопроса:** Существующие контактные устройства обладают малой эффективностью охлаждения оборотной жидкости. Разработка новых контактных устройств позволит существенно увеличить производительность энергетического предприятия.

**Материалы и методы:** Моделирование происходило в программном пакете ANSYS Fluent.

**Результаты:** Предложен оригинальный подход к моделированию истечения жидкости из отверстий струйно-пленочного контактного устройства. Получены графические зависимости.

**Выводы:** Дальнейшие исследования струйно-пленочных контактных устройств являются перспективным направлением в области энергетики.

**Ключевые слова:** контактное устройство, насадка, тепломассообмен.

## FLOW OF FLUID THROUGH THE HOLE IN THE JET-FILM CONTACT DEVICE

A. Khafizova<sup>1</sup>, L. Kruglov<sup>1</sup>, O. Dmitrieva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University

Kazan, Russian Federation

aliyahi@mail.ru

## Abstract

**Background:** Existing contact devices have low efficiency of cooling the circulating fluid. The development of new contact devices will significantly increase the productivity of the energy enterprise.

**Materials and Methods:** The simulation took place in the software package ANSYS Fluent.

**Results:** An original approach to modeling the flow of liquid from the holes of the jet-film contact device is proposed. Graphical dependences are obtained.

**Conclusions:** Further research of jet-film contact devices is a promising direction in the field of energy.

**Key words:** contact device, nozzle, heat and mass transfer

## I. ВВЕДЕНИЕ

Сложно представить какое-либо энергетическое предприятие без системы оборотного водоснабжения. Именно оборотное водоснабжение позволяет сократить расходы водных ресурсов в несколько десятков раз. Охлаждение оборотного водоснабжения на предприятиях происходит в градирнях. Наибольшее распространение на сегодняшний день получили вентиляторные градирни благодаря своей компактности и высокой эффективности. Основным элементом градирни, определяющим его охлаждающую способность, является ороситель. Существует большое множество вариаций конструкций оросителей, однако каждая из них обладает рядом недостатков: плохая смачиваемость, высокое гидравлическое сопротивление [1–3].

Модернизация существующих контактных устройств является одним из перспективных направлений при увеличении эффективности работы градирен. В связи с этим

возникает необходимость создания новых конструкций насадок, которые бы обеспечили низкое гидравлическое сопротивление, высокий тепломассообмен и большую площадь контакта двух фаз. Проанализировав большое количество существующих устройств, пришли к выводу, что устройство, рассмотренное в статье [4], наиболее эффективно. Данные устройства обладают высокой пропускной способностью, большой плотностью орошения жидкостью, а гидравлическое сопротивление не превышает значения аналогов.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью исследований являлось выявление закономерностей истечения воды из отверстий струйно-пленочного контактного устройства.

В программном пакете ANSYS Fluent моделировался один канал устройства шириной 100 мм и высотой 320 мм. Толщина стенки всех элементов составляла 0,5 мм.

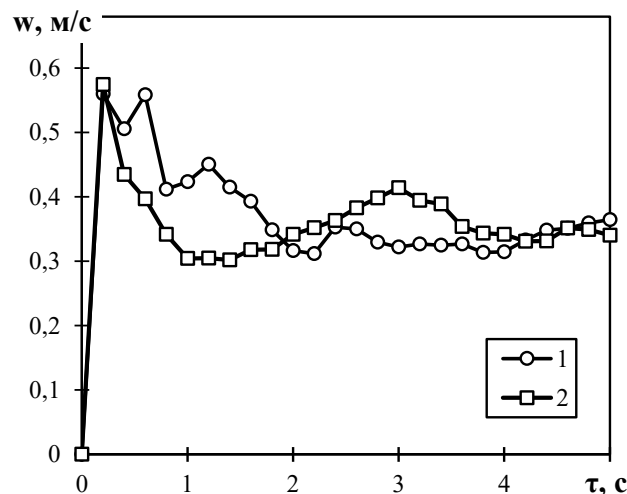
В нижней части сливных стаканов располагались отверстия диаметром 5 мм. Расстояние от центра этих отверстий до дна сливных стаканов составляет 2,5 мм, а расстояние от угла до центра отверстий – 2 мм. Высота сливных стаканов равна 50 мм, расстояние между соседними стаканами по вертикали составляет 25 мм. Размер одной ячейки в программном пакете задавался  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>. На стенках задавалось условие прилипания. Стенки принимались гидравлически гладкими.

Процесс, происходящий в устройстве, следующий: жидкость подается на верхнюю ступень устройства и через отверстия рядом с дном вытекает в виде струй на нижележащую ступень, ударяясь о дно этой ступени. Из этого же элемента жидкость так же через отверстия поступает на следующую ступень. Таким образом, в устройстве наблюдается постоянно обновляющаяся поверхность.

Существующие методики расчета не могут в этом случае эффективно использоваться, так как все они предполагают истечение из покоящейся жидкости. В нашем случае на поверхность жидкости попадает поток с вышележащего устройства, поэтому условия истечения могут существенно отличаться.

На дне сливного стакана задавалось давление исходя из создания необходимого уровня по закону Паскаля. Важно отметить, что при задании этого условия на всей поверхности дна результаты были не адекватны. Это объясняется близостью граничного условия на дне сливного стакана и отверстия для слива через стенки. В связи с этим было принято решение об изменении границ, где были заданы эти условия, а именно давление задавалось в четверти квадрата, наиболее отдаленной от отверстий. На входе в исследуемое устройство задавалось давление, которое варьировалось в зависимости от необходимой производительности. На выходе из устройства задавалось давление, равное 101 325 Па. Решалась нестационарная задача. Для расчетов был выбран метод объема жидкости (Volume of fluid method, VOF), так как он показал удовлетворительное согласование с экспериментальными исследованиями. На рисунке представлена зависимость скорости жидкости, поступающей в элемент устройства из отверстий вышележащей ступени, от времени.

Рисунок демонстрирует движение жидкости в элементе. Из графика видно, что при попадании жидкости на дно нижней ступени в начальный момент времени ее скорость максимальна, далее мы видим, что с наполнением жидкости в ступени ее скорость падает. Также можно заметить волнообразное изменение скорости жидкости. Это обусловлено тем, что струи, попадая в стакан с водой, создают



Зависимость скорости жидкости  $w$  от времени  $t$  при давлении  $p$ , равном: 1 – 101 700 Па; 2 – 101 500 Па

возмущения и наблюдается перемешивание жидкости, что существенно увеличивает эффективность при охлаждении. Давление, которое задавалось на четверти дна стакана, существенно влияет на скорость жидкости. В начальный момент времени скорость при большем давлении значительно больше, но с течением времени давление уже не оказывает существенного влияния.

### III. Вывод

В статье предложен оригинальный подход к моделированию истечения жидкости из отверстий струйно-пленочного контактного устройства. Получены зависимости скорости жидкости от времени при различных давлениях, благодаря которым можно определить характер движения жидкости в стакане.

### Список литературы

- [1] Музафарова А.Р., Емельянычева Е. А. Классификация, основные требования конструктивные особенности современных насадочных контактных устройств // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 2. С. 63–67.
- [2] Повышение эффективности теплообменных процессов в малогабаритных аппаратах охлаждения оборотной воды / К.Е. Бондарь [и др.] // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-1. С. 25–29.
- [3] Крюков О.В. Повышение энергоэффективности водооборотных систем предприятий при оптимизации управления градирнями // Вестник ПНИПУ. 2016. № 19. С. 5–27.
- [4] Струйно-пленочные контактные устройства для увеличения пропускной способности массообменных аппаратов / О.С. Дмитриева [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 2. С. 40–42.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ ГАЗОВ ЗА СЧЕТ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА (ПАРА)

Шагиева Г.К., Лаптева Е.А.  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
h.g.ka@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Вопрос повышения эффективности очистки воды от коррозионно-активных газов на ТЭС и АЭС является очень актуальным в настоящее время. Наряду с этим достаточно много исследований, посвященных этому вопросу. Однако отсутствует единая методика расчета очистки воды от растворенных газов в деаэраторах и декарбонизаторах. Полученные нами математические модели позволяют с достаточной степенью точности рассчитать эффективность очистки воды от растворенных газов в пленочных аппаратах с сильным взаимодействием фаз.

**Материалы и методы:** Использовались методы математического моделирования, ячеечная модель структуры потоков, модель диффузионного пограничного слоя, известные экспериментальные данные.

**Результаты:** Получены математические модели расчета эффективности очистки воды от коррозионно-активных газов в пленочных контактных устройствах с шероховатыми стенками и ленточным завихрителем при сильном взаимодействии фаз. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

**Выводы:** Сравнение результатов расчета по полученным математическим моделям с известными экспериментальными данными дало хорошее согласование и рекомендуется для расчетов декарбонизаторов и деаэраторов.

**Ключевые слова:** математическая модель, деаэратор, декарбонизатор, коррозия, очистка воды на ТЭС.

# IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF WATER TREATMENT FROM CORROSIVE-ACTIVE GASES AT THE ACCOUNT OF STRONG INTERACTION OF WATER AND AIR (VAPOR)

G. Shagieva, E. Lapteva  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
h.g.ka@mail.ru

## Abstract

**Background:** The issue of increasing the efficiency of water purification from corrosive gases at TPPs and nuclear power plants is very relevant at the present time. Along with this, quite a lot of research is devoted to this issue. However, there is no unified methodology for calculating water purification from dissolved gases in deaerators and calciner. The mathematical models obtained by us allow us to calculate with sufficient accuracy the efficiency of water purification from dissolved gases in film devices with a strong phase interaction.

**Materials and methods:** Methods of mathematical modeling, cell model of flow structure, diffusion boundary layer model; known experimental data.

**Results:** Mathematical models for calculating the efficiency of water purification from corrosion-active gases in film contact devices with rough walls and a ribbon swirl are obtained for strong phase interaction. A comparison with the experimental data is made.

**Conclusions:** Comparison of the calculation results with the mathematical models obtained with known experimental data has given good agreement and is recommended for calculations of calciner and deaerators.

**Key words:** mathematical model, deaerator, calciner, corrosion, water treatment at TPP.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач при производстве тепловой и электрической энергии на ТЭС и АЭС является защита оборудования, трубопроводов, арматуры от коррозии. Коррозия металла приводит к аварийным остановкам, к простоям оборудования, снижению выработки тепловой и электрической энергии и, как следствие, к большим экономическим потерям.

Оборудование ТЭС в большей степени подвержено коррозии ввиду присутствия в цикле вод, содержащих кислород, диоксид углерода, кислоты, щелочи, хлориды, сульфаты. Усугубляет ситуацию работа при высоких температурах и давлении.

Удаление из воды агрессивных газов в системе подготовки добавочной питательной воды паровых котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения осуществляют,

как правило, в декарбонизаторах и деаэраторах. Декарбонизаторы устанавливают в качестве первой ступени десорбции диоксида углерода в ВПУ ТЭС и котельных после узла умягчения или снижения щелочности при противонакипной обработке воды. Удаление из воды растворенных газов в декарбонизаторах осуществляется при контакте воды с воздухом. В деаэраторах удаляется оставшееся количество уголекислоты и кислород при контакте воды с водяным паром.

Одним из вариантов повышения эффективности работы деаэраторов и декарбонизаторов является увеличение площади поверхности контакта фаз. Для достижения этой цели интенсифицируют поверхность контактных устройств, а именно используют элементы закрутки потока, а также используют шероховатые поверхности.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ СИЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФАЗ

По принципу образования межфазной поверхности деаэраторы подразделяются на деаэраторы с поверхностью контакта фаз, образующейся в процессе движения пара и воды (струйно-барботажные; пленочные (с неупорядоченной насадкой); струйные (тарельчатые)) и деаэраторы с фиксированной поверхностью контакта фаз (пленочного типа с упорядоченной насадкой). В пленочных аппаратах газ или пар контактируют с жидкостью, которая перемещается в виде тонкой пленки по поверхности труб, пластин и других видов контактных элементов. Пленочное течение можно условно разделить на режим слабого (гравитационное течение пленки) и сильного взаимодействия фаз (восходящее или нисходящее движение пленки с газовым потоком, когда газ транспортирует жидкость). При сильном взаимодействии фаз процессы тепло- и массообмена интенсифицируются в 5–15 раз по сравнению с противотоком (исследования Н.М. Жаворонкова, Н.Н. Кулова, Р.Н. Нигматуллина, Н.А. Николаева и др.).

Далее на основе ячеечной модели получены выражения для определения эффективности пленочного контактного устройства с шероховатыми стенками в режиме сильного взаимодействия.

### А. Математическая модель

Для расчета эффективности массопередачи теоретическим путем прежде всего необходимо вычислить поля скоростей фаз на контактном устройстве, а затем из решения уравнения массопереноса рассчитать поле концентраций и определить концентрацию на выходе. Тогда эффективность (коэффициент полезного действия) разделения смеси имеет вид:

$$E_{\text{ж}} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}} - C^*}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{н}}$  и  $C_{\text{к}}$  – начальная и конечная концентрация компонента в жидкости;  $C^*$  – равновесная концентрация, зависящая от температуры и парциального давления.

При  $C_{\text{к}} = C^*$  имеем эффективность  $E_{\text{ж}} = 1$  (100%), что на практике достигается довольно редко. Для декарбонизаторов и термических деаэраторов достаточно иметь  $E_{\text{ж}} = 0,98 \div 0,995$ .

Для сокращения времени расчетов физических полей и эффективности разделения широкое применение получили модели структуры потоков (диффузионная и ячеечная), которые позволяют с достаточной для практических целей точностью решать поставленные задачи.

Примем ячеечную модель с делением контактного устройства от входа воды к выходу в виде условных ячеек полного перемешивания [1–4] с применением метода единиц переноса.

Из уравнения баланса массы в ячейке найдем профиль концентрации растворенного газа в воде:

$$K_{\text{ож}} F_i (C_i - C_i^*)_{\text{ж}} = V_{\text{ж}} (C_{i-1} - C_i)_{\text{ж}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $K_{\text{ож}}$  – средний коэффициент массопередачи, отнесенный к концентрации компонента в жидкости, м/с;  $F_i$  – поверхность контакта фаз в  $i$ -й ячейке, м<sup>2</sup>;  $C$  – концентрация растворенного газа, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ж}}$  – расход жидкости в  $i$ -й ячейке, м<sup>3</sup>/с (принимается постоянным по длине контактного устройства и равен расходу воды на входе);  $n$  – число ячеек.

Исходя из соотношения (1) запишем

$$C_{i-1, \text{ж}} - C_{i, \text{ж}} = N_{\text{ож}, i} (C_{i, \text{ж}} - C_{i, \text{ж}}^*), \quad (3)$$

где  $N_{\text{ож}, i}$  – общее число единиц переноса для ячейки.

Отсюда концентрация в  $i$ -й ячейке

$$C_{i, \text{ж}} = \frac{C_{i-1, \text{ж}} + C_{i, \text{ж}}^* N_{\text{ож}, i}}{1 + N_{\text{ож}, i}}. \quad (4)$$

При  $C_{0, \text{ж}} = C_{\text{н}, \text{ж}}$  – концентрация на входе, а на выходе при  $C_{n, \text{ж}} = C_{\text{к}, \text{ж}}$ .

Концентрацию компонента в газовой фазе  $C_{\Gamma, i}$  можно определить из уравнения материального баланса:

$$M = V_{\text{ж}} (C_{i-1} - C_i) = V_{\Gamma} (C_i - C_{i+1})_{\Gamma}, \quad (5)$$

где  $V_{\Gamma}$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $M$  – поток массы, кг/с.

Общее число единиц переноса определяется по уравнению аддитивности:

$$\frac{1}{N_{\text{ож}, i}} = \frac{1}{N_{\text{ж}, i}} + \frac{L/G}{N_{\Gamma, i} m}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{ж}, i}$  и  $N_{\Gamma, i}$  – частные числа единиц переноса для ячеек по жидкой и газовой фазам;  $L$  и  $G$  – массовые расходы жидкости и газа, кг/с;  $m$  – константа равновесия.

Числа единиц переноса имеют вид:

$$N_{\text{ж}, i} = \frac{\beta_{\text{ж}} F_i}{V_{\text{ж}}}, \quad N_{\Gamma, i} = \frac{\beta_{\Gamma} F_i}{V_{\Gamma}}, \quad (7)$$

где  $\beta_{\text{ж}}$  и  $\beta_{\Gamma}$  – средние коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах, м/с.



При удалении труднорастворимых газов имеем:

$$\frac{1}{N_{ж}} \gg \frac{L/G}{N_{гm}}, \quad (8)$$

т. е. основное сопротивление массопередачи сосредоточено в жидкой фазе.

Эффективность извлечения в  $i$ -й ячейке

$$E_{жи} = \frac{C_{i-1,ж} - C_{i,ж}}{C_{i-1,ж} - C_{i,ж}^*}. \quad (9)$$

По известному правилу общая эффективность разделения:

$$E_{ж} = 1 - (1 - E_{ж,1})(1 - E_{ж,2}) \dots (1 - E_{ж,i}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

В частном случае при удалении  $CO_2$  из воды воздухом можно в среднем принять  $C_{ж}^* \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, это допущение значительно упрощает расчет декарбонизатора (аналогично деаэрата).

Тогда учитывая, что  $C_{iж} \gg C_{iж}^*$  из (1), (4) и (6), имеем:

$$E_{ж} = 1 - (1 + N_{ж}/n)^{-n}, \quad (11)$$

где  $N_{ж} = \beta_{ж} F / V_{ж}$ ;  $F = \pi(d - 2\delta_0)H$ ;  $d$  – диаметр трубки, м;  $H$  – длина трубки, м;  $\delta_0$  – средняя толщина пленки воды, м.

Основными параметрами в выражении (11) являются средний коэффициент массоотдачи в жидкой фазе  $\beta_{ж}$  и число ячеек полного перемешивания  $n$ . Число ячеек обычно определяется экспериментально и связано с модифицированным диффузионным числом Пекле [3]:

$$n = \frac{Re_n^2}{2[Re_n - 1 + \exp(-Re_n)]}, \quad (12)$$

где  $Re_n = u_{cp} H / D_n$ ;  $u_{cp}$  – средняя скорость среды, м/с;  $H$  – длина контактного устройства, м/с;  $D_n$  – коэффициент обратного перемешивания, м<sup>2</sup>/с.

Существует много эмпирических и полуэмпирических функций для числа  $Re_n$  (или  $D_n$ ) [1–7]. Для расчетов трубчатого контактного устройства с шероховатой стенкой используем приближенную полуэмпирическую зависимость, полученную с применением модели Тейлора [4]:

$$Re_n = 0,43 \frac{H}{d_3 \sqrt{\xi_{ор}}}, \quad (13)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр канала, м;  $\xi_{ор}$  – коэффициент гидравлического сопротивления орошаемого канала, находится экспериментально.

Для расчета коэффициентов массоотдачи используются различные экспериментальные и полуэмпирические зависимости. Например, в работе для систем газ (пар)–жидкость [5] на основе развития модели диффузионного пограничного слоя Ландау–Левича получено выражение:

$$\beta_{ж} = \frac{2u_*}{\pi(R_1 Sc_{ж})^{0,5}}, \quad (14)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость, м/с;  $R_1$  – безразмерная толщина вязкого подслоя;  $Sc_{ж} = \nu_{ж} / D_{ж}$  – число Шмидта;  $\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $D_{ж}$  – коэффициент молекулярной диффузии компонента в жидкой фазе, м<sup>2</sup>/с. Выражение справедливо для систем с подвижной поверхностью раздела фаз (без ПАВ) и при  $Sc_{ж} \gg 1$ .

Если записать условие баланса сил, действующих на газовый поток в трубчатом контактном устройстве, со значением площади межфазной поверхности как для гладкой пленки, то получим известное выражение [5]:

$$u_{*ж} = \left\{ \frac{\Delta P_{тр} \pi \left[ d - 2(h + \delta^*) \right]^2}{4F \rho_{ж}} \right\}^{0,5}, \quad (15)$$

где  $h$  – высота выступа шероховатости, м;  $\delta^*$  – толщина пленки над выступом, м.

Течение пленки жидкости по стенке с элементами шероховатости приводит к волнообразованию на межфазной поверхности, поэтому уравнение (15) является приближенным, однако известно, что волнообразование увеличивает площадь межфазной поверхности всего на 7–8 %.

### В. Результаты расчета

Эффективность очистки воды от растворенных газов вычислялась по выражению (11). Для сравнения использовались экспериментальные данные Н.А. Николаева, В.Ф. Харина, полученные при десорбции  $CO_2$  из воды при температуре 20 °С в восходящем осевом потоке в канале:  $d = 0,0168$  м и  $H = 0,15$  м. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

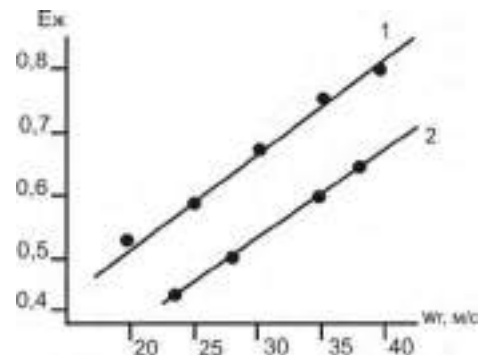


Рис. 1 – Зависимость эффективности разделения (11) от скорости газа в трубке при десорбции  $CO_2$  из воды воздухом: ● – экспериментальные данные [8, 9]; — – расчет по формуле (11); приведенный расход воды 2,116 м<sup>3</sup>/(м·час); высота выступа шероховатости  $h = 0,43$  мм; шаг между выступами  $S = 2$  мм; 1 – трубки с шероховатой поверхностью; 2 – трубки с гладкой поверхностью

Из рис. 1 следует удовлетворительное согласование результатов расчета [14] по формуле (11) с экспериментальными данными [9]. Однако высокая эффективность достигается за счет значительной скорости воздуха. Требуемая эффективность очистки воды от  $\text{CO}_2$  ( $E_{\text{ж}} = 0,98$ ) обеспечивается при длине трубки  $H > 0,6$  м (начальная концентрация  $\text{CO}_2$ :  $C_{\text{н}} = 200$  мг/дм<sup>3</sup> =  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>). Если  $C_{\text{н}} < 100$  мг/дм<sup>3</sup>, то достаточно  $H = 0,5$  м при  $w_r = 30$  м/с. При повышенных значениях  $\text{CO}_2$  в воде ( $C_{\text{н}} > 200$  мг/дм<sup>3</sup>) возможно использование двухступенчатого аппарата с длиной труб  $H = 0,5$  м. Даже в таком конструктивном исполнении общая высота аппарата будет не более 1,5 м. Декарбонизаторы и термические деаэраторы при аналогичных условиях с применением хаотичных насадок имеют высоту слоя не менее 1,8–2,0 м [10–13].

Окончательный выбор конструктивного исполнения аппаратов и режима работы должен выполняться после технико-экономического анализа с использованием известных рекомендаций [10, 11].

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВОГО ТРУБЧАТОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА

Аналогично вышепредставленной математической модели получена математическая модель для определения эффективности вихревого трубчатого контактного устройства с ленточным завихрителем [15], согласно которой эффективность определяем по выражению (11), число ячеек полного перемешивания по выражению (12), число Пекле – по (13), коэффициент массоотдачи – по (14).

В закрученном турбулентном газожидкостном потоке в результате действия центробежных сил происходит разделение фаз на пристенный жидкостный слой средней толщины  $\delta_0$  и центральное газовое ядро.

Выразим динамическую скорость в трубке с ленточным завихрителем через перепад давления, обусловленный трением газа и жидкости на межфазной поверхности турбулентной пленки.

Из уравнения баланса сил получим значение динамической скорости в жидкой фазе на поверхности пленки:

$$u_* = \left( \frac{\Delta P_{\text{тр}} \left[ \frac{\pi}{4} (d - 2\delta_0)^2 - (b\delta)_{\text{лз}} \right]}{F \rho_{\text{ж}} \cos \theta} \right)^{0,5}. \quad (16)$$

Локальная эффективность очистки воды от растворенных газов определялась по выражению (11) и результаты расчетов даны на рис. 2.

Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по формуле (11).

При закрученном движении перепад давления повышается в 1,5–2 раза по сравнению с осевым движением, а эффективность массопередачи увеличивается на 10–20 % (при шаге ленточного завихрителя  $S_{\text{лз}} = 0,118$  в). При уменьшении шага  $S_{\text{лз}}$  эффективность повышается. Например, при  $S_{\text{лз}} = 0,062$  м на 30–35 %.

### IV. ВЫВОДЫ

Получены математические модели определения эффективности контактных устройств при дисперсно-кольцевом режиме течения в пленочных контактных устройствах

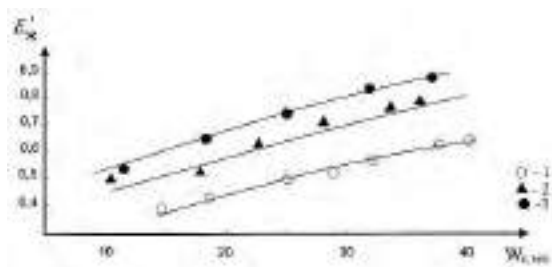


Рис. 2 – Зависимость эффективности десорбции  $\text{O}_2$  из воды от скорости воздуха при восходящем осевом и закрученном движении в трубке;  $d = 0,0168$  м;  $H = 0,2$  м; температура воздуха и воды  $20$  °С; 1 – осевое движение потока ( $q = 2,4$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> час); 2, 3 – закрученный поток ( $2 - q = 2,4$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> час;  $3 - q = 1,134$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> час) при  $S_{\text{лз}} = 0,062$  м

с шероховатыми стенками и с ленточным завихрителем. Дано сравнение результатов расчета эффективности разделения по выражению (11) с известными экспериментальными данными. По рисункам видно, что использование шероховатой поверхности и ленточного завихрителя значительно повышает эффективность очистки воды от растворенных газов.

### Список литературы

- [1] Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие для вузов. М.: Химия, 2011. 1230 с.
- [2] Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1991. 400 с.
- [3] Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 655 с.
- [4] Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен). Казань: Изд-во «Печать-Сервис XXI век», 2015. 236 с.
- [5] Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. 500 с.
- [6] Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. Эффективность насадочных декарбонизаторов в водоподготовке ТЭС // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 20–25.
- [7] Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. СПб.: СТРАТА, 2015. 576 с.
- [8] Николаев Н.А. Динамика пленочного течения жидкости и массоперенос в условиях сильного взаимодействия с газом (паром) при одностороннем восходящем или нисходящем движении. Казань, 2011. 104 с.
- [9] Николаев Н.А. Исследование и расчет ректификационных и абсорбционных аппаратов вихревого типа: дис. ... д-ра техн. наук. Казань: КХТИ, 1972.
- [10] Шарапов В.И., Сивухина М.А. Декарбонизаторы. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2000. 204 с.
- [11] Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2003. 506 с.
- [12] Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: учеб. пособие для ВУЗов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 309 с.
- [13] Энерго- и ресурсосберегающие технологии и аппараты очистки жидкостей в нефтехимии и энергетике / А.Г. Лаптев [и др.]. Казань: Отечество, 2012. 410 с.
- [14] Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. Очистка воды от растворенных газов в пленочном аппарате с дискретно-шероховатыми стенками // Надежность и безопасность энергетики. 2018. № 11(1). С. 48–53.
- [15] Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. Эффективность очистки воды от растворенных газов на тарелке с закрученным дисперсно-кольцевым потоком // Вода: химия и экология. 2017. № 3. С. 3–8.

# НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА

Шакиров Р.А.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
Казань, Россия  
Ruslan6399@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Эффективность всего производства напрямую зависит от эффективности теплообменников. Интенсификация теплообмена и повышение энергетической эффективности теплообменных аппаратов представляют большой интерес и имеют огромное значение для многих отраслей промышленности. При проектировании интенсифицированных теплообменников с оптимальными характеристиками возникают проблемы, которые заключаются в невозможности обобщения результатов исследований. Решение данной проблемы предлагают системы искусственного интеллекта, способные к обучению или самообучению. Таковыми являются нейронные сети.

**Материалы и методы:** Методика исследований представляет комплекс теоретических и эмпирических методов, сочетание которых дает возможность с наибольшей достоверностью исследовать данный вопрос и получить максимальные результаты. Моделирование исследуемого процесса интенсификации теплообмена произведено с помощью пакета программ Neurosolution и MatLab.

**Результаты:** Анализ литературных источников показывает возможность построения искусственных нейронных сетей для моделирования характеристик поверхностных теплообмена в виде регулярных коридорных выемок.

**Выводы:** Представлена возможность построения искусственных нейронных сетей для моделирования характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде регулярных коридорных выемок. Тестирование нейросети показало погрешность моделирования 16,08 %, что можно считать удовлетворительной, учитывая разброс в выборке данных, связанных с погрешностью экспериментов. Также следует констатировать, что полученные результаты являются промежуточными, так как для практического использования результатов моделирования необходимо расширить спектр данных по поверхностным интенсификаторам теплообмена, что и будет получено в результате дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** нейросетевое моделирование, интенсификация теплообмена, поверхностные характеристики.

## NEURAL NETWORKS MODELING OF SURFACE HEAT EXCHANGE

R. Shakirov

Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation  
Ruslan6399@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The efficiency of the whole production depends directly on the efficiency of the heat exchangers. Intensification of heat exchange and increase of energy efficiency of heat exchangers are of great interest and are of great importance for many industries. In the design of intensified heat exchangers with optimal characteristics, problems arise that are impossible to generalize the results of research. The solution to this problem is offered by artificial intelligence systems capable of learning or self-learning. These are neural networks.

**Materials and methods:** The research methodology is a complex of theoretical and empirical methods, the combination of which makes it possible to study this question with the greatest certainty and to obtain maximum results. The simulations of the heat exchange intensification process under investigation were carried out using the Neurosolution and Matlab software package.

**Results:** The analysis of literature sources and previous works shows the possibility of constructing artificial neural networks for modeling the characteristics of surface heat exchange in the form of regular corridor depressions.

**Conclusions:** The possibility of constructing artificial neural networks for modeling the characteristics of surface heat exchange intensifiers in the form of regular corridor depressions is presented. Neural network testing showed a simulation error of 16.08 %, which can be considered satisfactory, given the variance in the sample of data associated with the error of the experiments. It should also be noted that the results obtained are intermediate, since for the practical use of modeling results it is necessary to expand the spectrum of data on surface intensifiers of heat transfer, which will be obtained as a result of further studies.

**Key words:** neural network modeling, heat transfer intensification, surface characteristics.



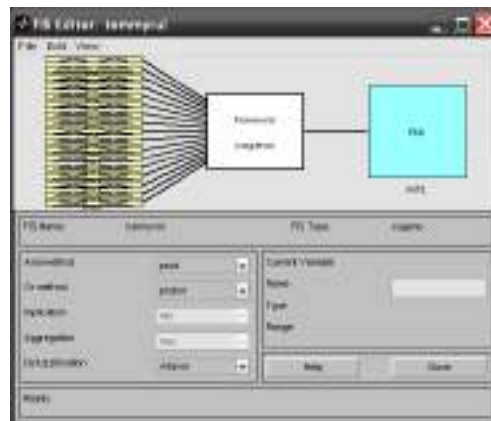


Рис. 4 – Настройка входов и выходов нейронной сети

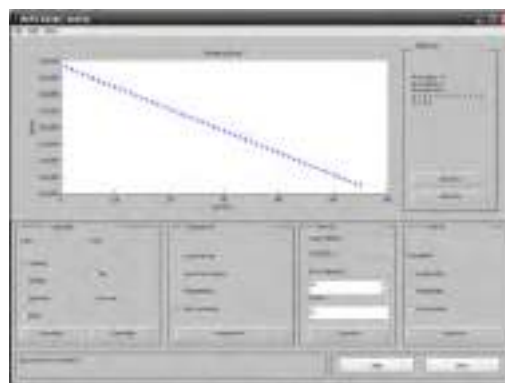
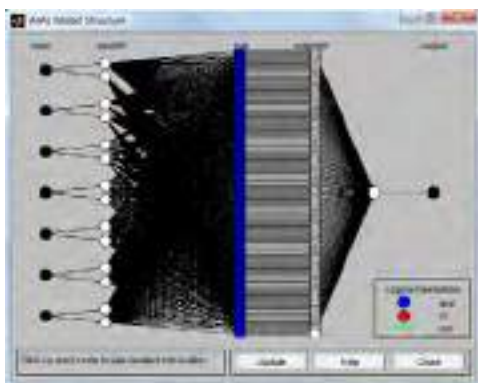


Рис. 5 – Структура нейронной сети и графическое отображение уменьшения ошибки от числа уроков



Рис. 6 – Ошибка при тестировании нейронной сети

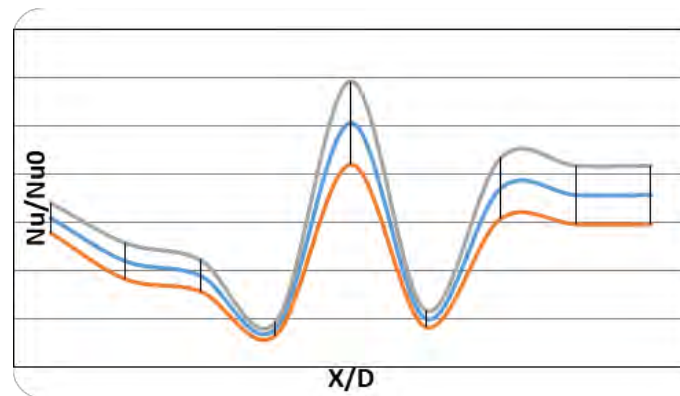


Рис. 7 – Прогнозирование относительного коэффициента теплоотдачи для  $X/D=8,8$ ;  $X/D=9,42$ ;  $X/D=9,43$ ;  $X/D=9,44$

После проведения обучения нейронной сети происходит процесс тестирования, т. е. вычисления, с какой вероятностью нейронная сеть предскажет результаты эксперимента.

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

После тестирования программа ANFISEDIT показала, с какой точностью были спрогнозированы данные. Также это можно наблюдать в графическом виде на рис. 6.

Таким образом, можно видеть, что ошибка составляет порядка 16,08 %. Исходя из этих данных был построен график и вычислена абсолютная ошибка. График представлен на рис. 7.

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, представлена возможность построения искусственных нейронных сетей для моделирования характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде регулярных коридорных выемок. Тестирование нейросети показало погрешность моделирования 16,08 %, что можно считать удовлетворительной, учитывая разброс в выборке данных, связанных с погрешностью экспериментов.

### Список литературы

[1] Mahmood G.I., Ligrani P.M. Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure // Int. J. of Heat and Mass Transfer. № 45. 2002. P. 2011–2020.

# АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПРИВЕДЁННЫХ ЗАТРАТ ОТ ДЛИНЫ ЛИНИИ ПРИ ПОИСКЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОМБИНАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ширяев А.С., Гиршин С.С.  
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
alex2793@bk.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В рамках государственных задач, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности, актуальна задача снижения уровня потерь электроэнергии. При снижении технических потерь энергии в электрических сетях в настоящее время мало учитывается влияние, оказываемое отдельными мероприятиями друг для друга при их реализации. В настоящей статье на примере неразветвленной сети показана целесообразность учёта данного влияния.

**Материалы и методы:** Для определения оптимальной комбинации технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии использовался комплексный подход, основанный на определении минимума целевой функции (приведённых затрат).

**Результаты:** Полученные результаты свидетельствуют, что при выборе технических мероприятий целесообразно рассматривать их комбинации. Построена зависимость приведённых затрат от длины линии, которая показывает реальное поведение целевой функции при заданных параметрах режима и схемы.

**Выводы:** Исходя из полученных результатов видно, что комплексный подход позволяет в значительной степени повысить эффективность реализации технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии. Полученные данные о свойствах целевой функции могут представлять интерес при строительстве и реконструкции распределительных сетей.

**Ключевые слова:** мероприятия по снижению потерь электроэнергии, компенсация реактивной мощности, замена провода, приведённые затраты.

# ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE DISCOUNTED COSTS ON THE LENGTH OF THE LINE IN SEARCHING FOR POTIMUM COMBINATION TO REDUCING ENERGY LOSSES TASK

A. Shiryayev, S. Girshin  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russian Federation  
alex2793@bk.ru

## Abstract

**Backgrounds:** According to the state tasks aimed at energy saving and increase in energy efficiency the issues of reducing the level of electricity losses is actual. At present, the possible impact of single events on each other at electricity-loss management is not taken into account. In this article, using the example of a particular network, the effectiveness of accounting for this influence is shown.

**Materials and Methods:** For the determination of the optimal combination of technical measures to reduce energy losses, an integrated approach was used, based on the minimum target function determinate.

**Results:** Obtained results is indicate, that it is necessary to consider combinations of measures. The dependence of the discount costs on the length of the overhead line, which shows the real behavior of the target function in the operating and circuit parameters, is described.

**Conclusions:** Based on the obtained results obviously that an integrated approach allows significantly improving the efficiency of the electricity-loss management. The obtained information about the target function can be useful at questions of the building and reconstruction existing distribution system.

**Key words:** electricity-loss management, reactive-power compensation, restringing, discounted costs.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Задача снижения потерь электроэнергии является одной из приоритетных задач в области развития электрических сетей. Значительного эффекта по снижению технологического расхода электроэнергии на её передачу можно добиться с помощью технических мероприятий по снижению потерь энергии. В свою очередь внедрение технических мероприятий основано на решении следующих двух задач:

- 1) определение оптимального управляющего воздействия;
- 2) технико-экономическое обоснование.

При решении первой и второй задачи повысить точность определения величины потерь возможно на основе учёта тепловых процессов в линиях и трансформаторах [0–3]. При этом целесообразно учитывать взаимное влияние отдельных мероприятий друг на друга [4].

## II. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Наилучшего результата при снижении потерь энергии можно достичь путем оптимального комбинирования технических и организационных мероприятий. В табл. I представлены технические мероприятия, наиболее эффективные для распределительных радиальных сетей.

Таблица I – Технические мероприятия по снижению потерь

Индекс мероприятия	Наименование мероприятия
M1	Компенсация реактивной мощности на 0,4 кВ
M2	Компенсация реактивной мощности на 10 кВ
M3	Замена провода

Ниже для простой неразветвлённой сети, представленной на рис. 1, определены приведённые затраты для отдельных мероприятий и их комбинаций. Кроме того, рассчитаны длины линий, при которых достигается эффект равноокупаемости при вводе мероприятий.

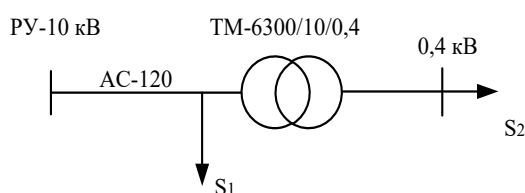


Рис. 1 – Неразветвлённая сеть

Соответственно, общее число комбинаций мероприятий определяется через число сочетаний по формуле:

$$N = \sum_{k=1}^n C_n^k, \quad (1)$$

где  $n$  – количество отдельных мероприятий. В данном случае при  $n = 3$  получаем  $N = 7$ .

Перечень всех комбинаций мероприятий приведен в табл. II.

Обозначение M0 соответствует случаю, когда не вводится ни одно из перечисленных мероприятий.

Таблица II – Мероприятия и их комбинации

№ мероприятия	Индекс комбинации
0	M0
1	M1
2	M2
3	M3
4	M1 и M2
5	M1 и M3
6	M2 и M3
7	M1 и M2 и M3

Сроки окупаемости определяются по следующему выражению:

$$T_{OK} = \frac{K + C_{м.р}}{\left( K \cdot \alpha_p - K_{исх} \cdot \alpha_p + C_{сн-2} \cdot (\Delta W_{п.м} - \Delta W_{исх}) \right)}. \quad (2)$$

где  $\Delta W_{исх}$  и  $\Delta W_{п.м}$  – потери электроэнергии в исходном режиме и после внедрения мероприятий, соответственно;  $K$  – капиталовложения;  $C_{м.р}$  – стоимость монтажных работ, равная 25% от капиталовложений при реализации мероприятий.

Минимум приведённых затрат для одиночных мероприятий и их комбинаций определяется из следующей известной зависимости:

$$Z = 0,14 \cdot K + K \cdot \alpha_p - K_{исх} \cdot \alpha_p + C_{сн-2} \cdot (\Delta W_{п.м} - \Delta W_{исх}). \quad (3)$$

Обозначение остальных величин, входящих в формулы (2) и (3), представлено в табл. III. В формуле (3) введены эксплуатационные издержки в исходном режиме со знаком «минус». Если мероприятия не вводятся, при такой записи формулы (3) приведенные затраты будут равны нулю. Кроме того, отрицательные значения затрат для какого-либо мероприятия приближенно указывают на удовлетворение нормативным сроком окупаемости.

Длина линии, при которой достигается эффект равноокупаемости мероприятий, определяется из любого равенства приведённых затрат, например:

$$Z_{KPM0,4} = Z_{KPM10}. \quad (4)$$

Результаты расчёта представлены в табл. III.

Таблица III – Определение равноэкономичной длины линии

№ мероприятия	Тип комбинации мероприятий	L, км
1	M1 и M2	1,28
2	M1 и M3	0,98
3	M2 и M3	0,18
4	M1 и (M1 и M2)	2,58
5	M1 и (M1 и M3)	0,73
6	M1 и (M2 и M3)	0,96
7	M1 и (M1 и M2 и M3)	2,63
8	M2 и (M1 и M2)	1,55
9	M2 и (M1 и M3)	1,52
10	M2 и (M2 и M3)	1,96
11	M2 и (M1 и M2 и M3)	1,73
12	M3 и (M1 и M2)	1,24
13	M3 и (M1 и M3)	1,22
14	M3 и (M2 и M3)	1,00
15	M3 и (M1 и M2 и M3)	1,42
16	M1 и M2 и (M1 и M3)	3,78
17	M1 и M2 и (M2 и M3)	1,41
18	M1 и M2 и (M1 и M2 и M3)	2,68
19	M1 и M3 и (M2 и M3)	1,37
20	M1 и M3 и (M1 и M2 и M3)	2,76
21	M2 и M3 и (M1 и M2 и M3)	1,66

Таблица IV – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование, обозначение и единицы измерения параметра	Значение
Коэффициент приведения капиталовложений $E_n$	0,14
Норма ежегодных отчислений на ремонт, обслуживание электрооборудования $\alpha_p$	0,059
Тариф для сетей среднего напряжения $C_{сн-2}$ , руб./кВт·ч	3,2
Время, ч: использования максимальных потерь электроэнергии $\tau_{max}$	3 410
включения $T_{пост}$	8 760
Полная мощность нагрузки, кВА: на высокой стороне трансформатора $S_{10кВ}$	1 900 + j 1 200
на низкой стороне трансформатора $S_{0,4кВ}$	4 000 + j 3 500
Суммарная полная мощность линии $S_{ЛЭП}$ , кВА	5 900 + j 4 700
Длина линии $L$ , км	4
Погонное активное сопротивление провода, Ом/км: АС-120 $r_{пог АС-120}$	0,253
СИП-3 1×150 $r_{СИП-3 1×150}$	0,236
Стоимость провода, руб./км: АС-120 $K_{исх}$	96,49
СИП-3 1×150 $K_{СИП-3 1×150}$	112,73
Номинальная мощность трансформатора $S_{ном}$ , кВА	6 300
Потери, кВт: короткого замыкания трансформатора ТМ-6300/10 $\Delta P_{КЗ}$	46,5
холостого хода трансформатора ТМ-6300/10 $\Delta P_{ХХ}$	7,4
Мощность компенсирующего устройства, кВАр: $Q_{БСК10}$	900
$Q_{БСК0,4}$	2 700
Капиталовложения при компенсации реактивной мощности, руб.: на 10 кВ $K_{КРМ10}$	217 900
на 0,4 кВ $K_{КРМ0,4}$	922 200
Потери активной мощности, кВт: в УКРП56-6,3(10,5)-900-300 $\Delta P_{БСК10}$	3,6
в ЗАУКРМ-0,4-900 $\Delta P_{БСК0,4}$	10,8

Таблица V – РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА СРОКОВ ОКУПАЕМОСТИ И ПРИВЕДЁННЫХ ЗАТРАТ

№ мероприятия	Индекс мероприятия	Ток, год	З, руб
0	M0	-	-
1	M1	0,43	-2515109
2	M2	0,26	-984056
3	M3	1,06	-430163
4	M1 и M2	0,57	-2755028
5	M1 и M3	0,67	-2779654
6	M2 и M3	0,61	-1481324
7	M1 и M2 и M3	0,64	-3366882

Для мероприятий M1 и M2 выражения для приведённых затрат и для длины линии, при которой затраты на реализацию мероприятий одинаковы, имеют вид:

$$Z_{КРМ10} = (0,14 + \alpha) \cdot K_{КРМ10} + C_3 \cdot T_{пост} \cdot \Delta P_{БСК10} + C_3 \cdot T_{нагр} \cdot \frac{l}{U^2} \cdot r_{пог} \cdot \left( (Q_{исх} - Q_{БСК10})^2 - Q_{исх}^2 \right);$$

$$Z_{КРМ0,4} = (0,14 + \alpha) \cdot K_{КРМ0,4} + C_3 \cdot T_{пост} \cdot \Delta P_{БСК0,4} + C_3 \cdot T_{нагр} \cdot \frac{l}{U^2} \cdot r_{пог} \cdot \left( (Q_{исх} - Q_{БСК0,4})^2 - Q_{исх}^2 \right) + C_3 \cdot T_{нагр} \cdot \frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном}^2} \cdot \left( (Q_{исх0,4} - Q_{БСК0,4})^2 - Q_{исх0,4}^2 \right);$$

$$l = \frac{U^2 \cdot \left( (E_n + \alpha_p) \cdot (K_{КРМ10} - K_{КРМ0,4}) + C_3 \cdot T_{нагр} \cdot r_{пог} \left( (Q_{исх} - Q_{БСК0,4})^2 - (Q_{исх} - Q_{БСК10})^2 \right) + C_3 \cdot T_{пост} \cdot (\Delta P_{БСК10} - \Delta P_{БСК0,4}) \right)}{C_3 \cdot T_{нагр} \cdot r_{пог} \left( (Q_{исх} - Q_{БСК0,4})^2 - (Q_{исх} - Q_{БСК10})^2 \right) - C_3 \cdot T_{нагр} \cdot \frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном}^2} \cdot \left( (Q_{исх0,4} - Q_{БСК0,4})^2 - Q_{исх0,4}^2 \right)}$$



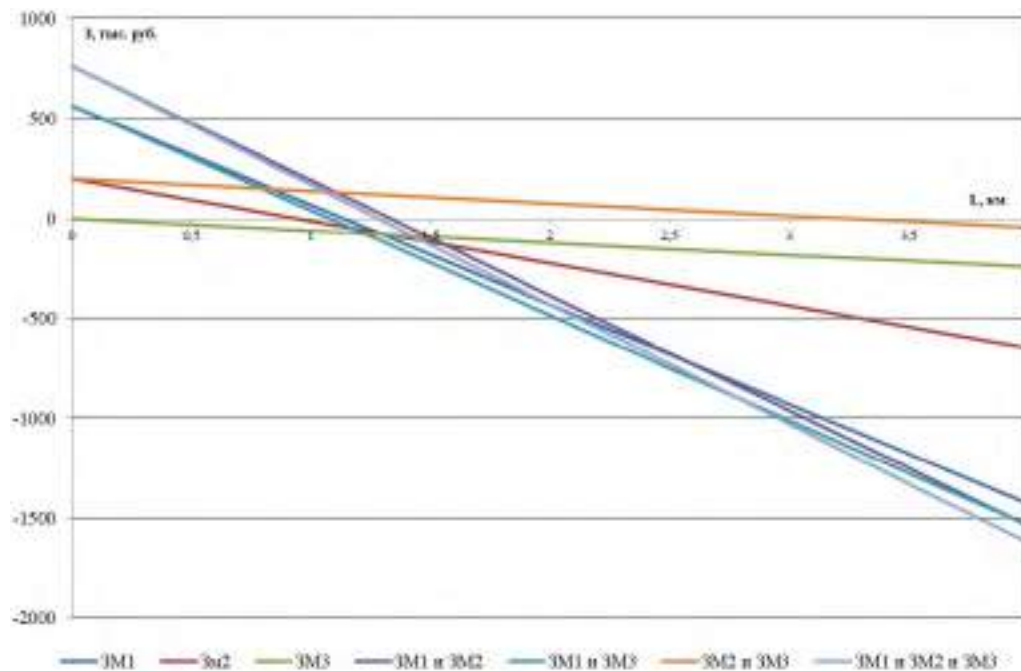


Рис. 2 – Зависимость оптимальных затрат от длины линии

### III. РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

По формулам (2) и (3) рассчитывались сроки окупаемости и приведённые затраты для каждого мероприятия и их комбинаций. Исходные данные приведены в табл. IV, результаты расчёта – в табл. V. На рис. 2 представлена зависимость оптимальных затрат от длины линии на интервале от 0 до 4 км. Потери электроэнергии рассчитывались по методу времени использования максимальных потерь, при величине  $\tau_{\max} = 5000$  ч.

Актуальная информация о стоимости электрооборудования представлена в [5, 6].

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из результатов расчёта видно, что при 4 км минимум приведённых затрат соответствует не отдельному мероприятию, а их комбинации. Для данной сети оптимальной комбинацией является «Установка ЗАУКРМ-0,4-900, установка УКРП56-6,3(10,5)-900-300 и замена провода АС-120 на провод СИП-3 1×150», хотя срок окупаемости для данной комбинации не является минимальным. На рис. 2 показано, что за исключением мероприятия М3 одиночные мероприятия М1 и М2 и их комбинации являются заведомо неэкономичными на интервале длин от 0 до 1,3 км. Интервал от 0,7 до 2,5 км является областью, в которой находится большинство точек равноэкономичности. На интервале от 0,5 до 1,2 км равноэкономичными

являются пары комбинаций М3 и (М1 и М2), М1 и (М1 и М2 и М3). Для пары комбинаций М1 и М2 и (М1 и М3) эффект равноэкономичности достигается при длине линии  $L = 3,78$  км.

### Список литературы

- [1] Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции / Е.В. Петрова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 218.
- [2] Алгоритм расчета потерь в изолированных проводах линий электропередачи с учетом температуры токопроводящих жил / Е.В. Петрова [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленности! 2013. № 2. С. 306–308.
- [3] Гиршин С.С. Учёт температуры элементов сети при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Омский научный вестник. 2013. № 1(117). С. 137–142. (Сер. «Приборы, машины и технологии»).
- [4] Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в неразветвленной сети с учетом температуры токоведущих частей / С.С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. 2017. № 2(152). С. 50–54.
- [5] Энергозапад. Конденсаторная установка УКРП57 6,3 на 900 кВАр URL: <http://energozapad.ru/kondensatornaya-ustanovka-ukrp57-63-na-900-kvar> (дата обращения: 21.04.18).
- [6] Энергозапад. Конденсаторная установка АУКРМ 0,4 на 900 кВАр. URL: <http://energozapad.ru/kondensatornaya-ustanovka-aukrm-04-na-900-kvar> (дата обращения: 21.04.18).
- [7] Электрокомплект Сервис. Провод СИП-3 1×150 URL: <https://e-ec.ru/cena/provod-sip-3-1-150> (дата обращения 21.04.18).

**Секция № 7**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММЫ  
ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**



**Scientific sections № 7**

**EDUCATIONAL TECHNOLOGIES AND TRAINING PROGRAMS  
FOR ELECTRICAL POWER INDUSTRY**



# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «ТРЕНАЖЕР ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ РЕЛЬСОВОГО НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ РЕЖИМАМ ДВИЖЕНИЯ»

Абдуллин Д.Р., Гришук Д.В.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Казань, Россия

karadamir23@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Программно-аппаратный комплекс «Тренажер для обучения водителей рельсового наземного городского электрического транспорта энергоэффективным режимам движения» предназначен для обучения и проверки уровня подготовки водителей энергоэффективным режимам движения подвижного состава. Комплекс состоит из аппаратной части, полностью повторяющей органы управления подвижного состава различных модификаций, а также программной – моделирующей реальные маршрутные системы конкретного города. В ходе обучения водитель получает навыки реализации энергооптимальных режимов вождения подвижного состава в виртуальной среде, максимально приближенной к реальности. Полученные навыки позволяют в реальных условиях эксплуатации подвижного состава наземного электрического транспорта обеспечить снижение расхода электрической энергии, потребляемой на тягу, на 13–15%.

**Материалы и методы:** За основу взят программный продукт под названием «Trainz Railroad Simulator», который представляет собой симулятор железной дороги, а также общественного транспорта.

**Результаты:** Практическая реализация данного проекта в системе обучения водителей электроподвижного состава (ЭПС) методам энергоэффективных режимов движения позволит снизить расход электроэнергии подвижным составом (ПС).

**Выводы:** Необходимо отметить, что проблемами энергоэффективного вождения ПС занимаются уже давно, но в последние годы в этой области наметился существенный пробел. Это связано с тем, что существующие ранее наработки в настоящее время существенно устарели и не в состоянии эффективно решать поставленные задачи. Так, изжили себя режимные карты, инструкции по экономичному вождению и так далее. Также неэффективными являются современные тенденции по установке на ПС устройств учета электроэнергии, так как предлагаемый контроль энергоэффективности режимов движения является «пассивным», так сказать «по факту» и не дает ни водителю, ни руководителю предприятия представления о том, как же снизить расход электроэнергии на тягу.

**Ключевые слова:** городской электрический транспорт, программно-аппаратный комплекс, симулятор железной дороги, энергоэффективность.

## DEVELOPMENT OF THE HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX “SIMULATOR FOR THE TRAINING OF DRIVERS OF RAIL GROUND CITY ELECTRIC TRANSPORT TO ENERGY EFFICIENT TRAFFIC MODES”

D. Abdullin, D. Grishuk

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russian Federation

karadamir23@mail.ru

## Abstract

**Background:** Hardware-software complex "Simulator for driver training ground rail electric urban transport energy efficient modes of motion" is intended for training and testing of drivers training level energy-efficient modes of rolling movement. The complex consists of hardware fully replicates the controls of rolling stock of various modifications, as well as software – simulating the real route of the system of a particular city. During the training, the driver gets the skills energooptimalnyh implementation modes of the rolling stock of driving in a virtual environment as close as possible to reality. These skills will enable reduction of electric power consumption consumed in the draft by 13–15% in actual use rolling land-electric vehicles.

**Materials and methods:** Based on the software product called “Trainz Railroad Simulator”, which is a simulator of the railway, but also of public transport.

**Results:** Practical implementation of this project in the system of training drivers of electric rolling stock using the energy-efficient mode of traffic will reduce the power consumption of rolling stock.

**Conclusions:** It should be noted that the problems of energy-efficient driving have been dealt with by the PS for a long time, but there has been a significant gap in recent years in this area. This is due to the fact that the existing early developments are now significantly outdated and are not able to effectively solve the tasks set. So have become obsolete regime maps, instructions for economical driving, etc. Also, modern trends in the installation of power metering devices on PS are not effective. The proposed control of the energy efficiency of traffic regimes is “passive”, so to say “in fact” and does not give neither the driver nor the enterprise manager the idea of how to reduce the power consumption for traction.

**Key words:** city electric transport, software and hardware complex, railway simulator, energy efficiency.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Общественный транспорт является одним из ключевых объектов современного мегаполиса. Без полноценного развития общественного транспорта не может нормально развиваться инфраструктура города, существенно снизиться комфорт и безопасность передвижения. В связи с этим, развитие общественного транспорта в мегаполисах является жизненно необходимым. Бесперебойная эффективная работа общественного транспорта во много зависит от навыков и умений водителей ПС. Одним из ключевых моментов обучения водителей общественного транспорта является привитие им навыков энергоэффективных режимов движения электроподвижного состава. Таким образом, появляется реальная возможность для транспортных предприятий снизить финансовые затраты на закупку энергоносителей.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Комплекс (рис. 1) состоит из аппаратной части, полностью повторяющей органы управления ПС различных модификаций, а также программной – моделирующей реальные маршрутные системы конкретного города. В ходе обучения водитель получает навыки реализации энергооптимальных режимов вождения ПС в виртуальной

среде, максимально приближенной к реальности. Полученные навыки позволят в реальных условиях эксплуатации ПС наземного электрического транспорта обеспечить снижение расхода электрической энергии, потребляемой на тягу, на 13–15%.

Рассмотрим назначение вышеперечисленных частей подробнее:

1. Пульт управления водителя – пульт управления реального ПС, эксплуатируемого на конкретном предприятии городского электротранспорта (ГЭТ). Для этого необходимо либо взять пульт управления со списанного ПС, либо провести полную физическую имитацию органов управления. Основная задача – максимально приблизить пульт управления к реальному рабочему месту в кабине ПС. Все это позволит максимально эффективно привить навыки реализации энергоэффективных режимов движения.
2. Модуль визуализации – набор экранов, на которые выводится визуализация результатов имитационного моделирования реальных маршрутов движения и дорожно-транспортной установки. Основное назначение – получение максимально реалистичной картинки для виртуального погружения в программную среду при интерактивном обучении.

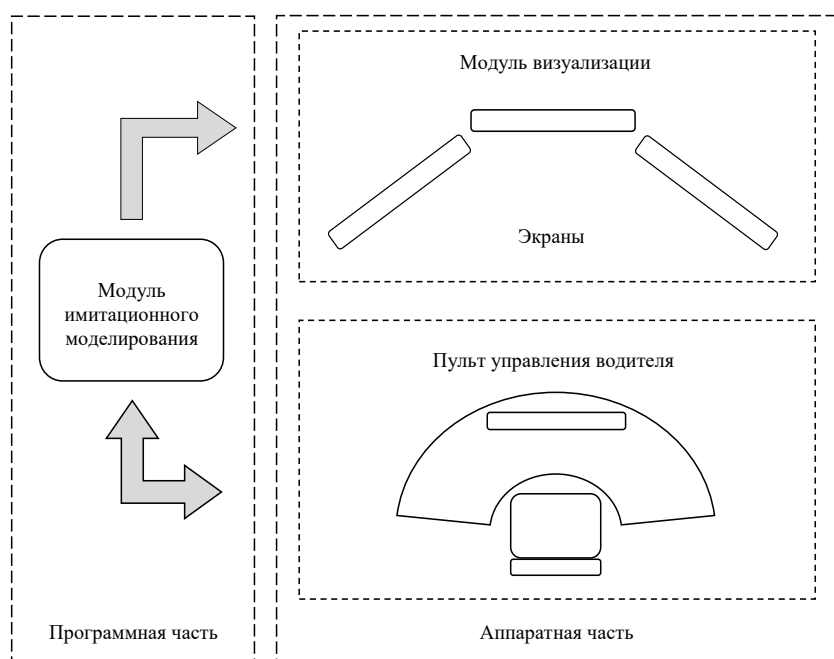


Рис. 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса «Тренажер для обучения водителей рельсового наземного городского электрического транспорта энергоэффективным режимам движения»

3. Модуль имитационного моделирования относится к программной части комплекса и представляет собой программный продукт, разработанный и постоянно совершенствующийся на кафедре «Электрический транспорт» ФГБОУ ВО «КГЭУ». Условно можно выделить две основные задачи, реализуемые модулем: виртуальное моделирование визуальной составляющей интерактивного комплекса и имитационное моделирование реальных алгоритмов нагружения силового оборудования конкретного электроподвижного состава ГЭТ. За основу взят программный продукт под названием «Trainz Railroad Simulator», который представляет собой симулятор железной дороги, а также общественного транспорта. Для имитационного моделирования реальных режимов движения использовались скрипты к программе, в которых задавались тяговые характеристики ПС, значения удельного сопротивления движения, пассажиропоток и так далее.
4. Программный продукт «Trainz» (полное название – Trainz Railroad Simulator) – трёхмерная видеоигра – симулятор железной дороги (рис. 2), созданная австралийской игровой студией Aurap. Переводом игры в России занимается компания Акелла. Игра разделена на четыре части (топограф или редактор, машинист, депо и сценарий), в трех из которых игрок принимает непосредственное участие. В качестве дополнительных инструментов используется:



Рис. 2 – Кабина трамвайного вагона в симуляторе

- Content Manager – специальная программа, управляющая базой всех объектов, используемых в игре (именуются «ассетами»).
- Content Creator Plus (ССР) – встроенная программа, предназначенная для создания новых и редактирования существующих файлов конфигураций (config.txt) дополнений. Запускается через Content Manager при выборе соответствующего способа редактирования ассета, либо при нажатии клавиш Ctrl-N (для создания нового файла конфигурации).

### III. ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрический транспорт имеет исключительно большое значение для жизни людей, производственной деятельности и быта населения [1]. Его организационно-техническое

состояние влияет на качество жизни людей, на их здоровье (в том числе экологическое) и трудоспособность. В этом отношении он является в значительной мере конкурентным видом транспорта по отношению к автомобильному. В течение года пассажирооборот только трамвайного транспорта составляет около 20 млрд пассажиро-километров.

Электрический транспорт является энергоёмким видом хозяйственной деятельности, существенно влияющим на экономические стороны жизни города, страны в целом. По данным Госкомстата России величина потребляемой электроэнергии предприятиями электрического транспорта городов России за 2010 год составила 3 млрд кВт·ч, это около 4 % от общего электропотребления всеми видами электрического транспорта, включая магистральный нефте-, нефтепродукто- и газопроводный транспорт.

Существующие данные о структуре потребления электрической энергии отдельных предприятий ГЭТ городов России показывают, что более 90 % потребляемой электроэнергии расходуется на тягу подвижного состава и лишь около 10 % – на прочие производственные и коммунально-бытовые нужды. В связи с этим, наиболее актуальной является задача изыскания путей снижения электропотребления на тягу электрического транспорта. Решение данной задачи осложняется неблагоприятным техническим состоянием эксплуатируемого парка ПС, характеризующимся большим износом тяговых единиц. Можно выделить три приоритетных направления, обеспечивающих снижение уровня электропотребления на тягу ГЭТ [2]: техническое, технологическое и организационное.

Техническое направление решает задачи:

- совершенствование путевой инфраструктуры;
- модернизация парка тяговых единиц;
- улучшение системы электроснабжения;
- внедрение систем рекуперации.

В рамках технологического направления решаются следующие задачи:

- внедрение рациональных режимов движения;
- контроль за состоянием тяговых единиц;
- организация режимов движения электротранспорта.

Организационное направление решает такие задачи, как нормирование уровня электропотребления на тягу и стимулирование работы водителей на экономичный стиль вождения.

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Необходимо отметить, что проблемами энергоэффективного вождения ПС занимаются уже давно, но в последние годы в этой области наметился существенный пробел. Это связано с тем, что существующие ранее такие наработки, как режимные карты, инструкции по экономичному вождению, в настоящее время существенно устарели и не в состоянии эффективно решать поставленные задачи. Неэффективными являются и современные тенденции по установке на ПС устройств учета электроэнергии, так как предлагаемый контроль энергоэффективности режимов

движения является «пассивным», так сказать «по факту» и не дает ни водителю, ни руководителю предприятия представлений о снижении расхода электроэнергии на тягу [3].

Литературный обзор [4] в предметной области проекта показал, что выбранное направление в области энергосбережения в ГЭТ является наиболее перспективным и эффективным. Отсутствие каких-либо серьезных исследований в отечественной науке в данной области, тем более каких-либо технических решений, позволяет предполагать некоторый коммерческий и научный успехи реализуемого проекта. Практическая реализация данного проекта в системе обучения водителей ЭПС методу энергоэффективных режимов движения позволит снизить расход электроэнергии ПС.

Стоимость программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Тренажер для обучения водителей рельсового наземного городского электрического транспорта энергоэффективным режимам движения» для конечного потребителя будет

существенно варьироваться, так как будет создаваться под конкретный парк подвижного состава и маршрутную систему города. Предварительная стоимость в пробном варианте – без привязки к маршрутам и типам подвижного состава – от 200 тыс. руб.

Данный ПАК находится в стадии экспериментальной версии и сейчас он проходит модернизацию под новый подвижной состав города Казани.

#### Список литературы

- [1] Слепцов М.А., Долаберидзе Г.П., Прокопович А.В. Основы электрического транспорта. М: ИЦ «Академия», 2006. 464 с.
- [2] Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга Городской наземный транспорт: учебник для техникумов. М.: Транспорт, 1986. 206 с.
- [3] Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П. Тяга поездов и тяговые расчёты. М: Транспорт, 1971. 280 с.
- [4] Аухадеев А.Э. Моделирование режимов тяги силового электрооборудования электрического транспорта. КГЭУ, 2006. 155 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЖИМНОГО ТРЕНАЖЁРА

Авдеев А. В., Волков И. Д., Мусихина В. А., Толстикова Л.В.  
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета  
Черемушки, Саяногорск, Россия  
artemka040498@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Применение режимного тренажера TWR-12 позволит создать виртуальную лабораторию по дисциплине «Электрические станции и подстанции», что позволит максимально приблизить студентов к работе специалиста оперативной службы станции. Выпускники вуза смогут в кратчайшие сроки пройти адаптацию на производстве.

**Материалы и методы:** Использован режимный тренажер TWR-12, графический редактор мнемосхем TWR-12cad, инструкция по эксплуатации режимного тренажера.

**Результаты:** Смоделирован объект электроэнергетики, прописан сценарий тренировки по выводу в ремонт генератора.

**Выводы:** За время работы в виртуальной лаборатории электрических станций и подстанций студенты приобретают первые навыки работы специалиста оперативной службы.

**Ключевые слова:** тренажер по оперативным переключениям, плановый вывод в ремонт, создание лаборатории, создание схем, сценарий тренировок.

## MODELING ELECTRIC POWER OBJECTS WITH THE USE OF A MODE TRAINER

A. Avdeev, I. Volkov, V. Musikhina, L. Tolstikhina  
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal University  
Cheryomushki, Sayanogorsk, Russian Federation  
artemka040498@mail.ru

## Abstract

**Background:** The use of the TWR-12 mode simulator will make it possible to create a virtual laboratory for the discipline «Electrical stations and substations», which will make it possible to bring students closer to the work of a specialist in the operational service of the station. Graduates of the university will be able to undergo the adaptation in the shortest possible time.

**Materials and methods:** The TWR-12 mode simulator, the TWR-12cad graphic mimic editor, the instruction manual for the regime simulator were used.

**Results:** An electric power industry object was simulated, a script of training on the conclusion of a generator repair was prescribed.

**Conclusions:** During the work in the virtual laboratory of electrical stations and substations, students acquire the first skills of the specialist of the operational service.

**Key words:** Simulator for operational switching, scheduled output for repairs, creation of a laboratory, creation of schemes, scenario of training.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном образовании ИТ-технологии прочно вошли в образовательный процесс. В Саяно-Шушенском филиале на кафедре гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей (ГЭЭС) ведется работа по моделированию электроэнергетической системы (ЭЭС) на базе режимного тренажера TWR-12.

Моделирование режимов виртуальной электроэнергетической системы позволяет приблизить максимально обучение студентов к реальной работе инженера оперативной службы электрической станции.

В данной работе смоделирован объект электроэнергетической системы (ЭЭС), разработаны сценарий и тренировка по выводу в ремонт генератора Г1 (рис. 1).

## II. СОЗДАНИЕ ТРЕНИРОВКИ

Создаем тренировку по выводу в ремонт выключателя генератора Г1.

Для создания тренировки необходимо воспользоваться программой комплекса TWR-12 cad. Нажимаем кнопку «Создать тренировку», после чего выбираем название создаваемой тренировки (рис. 2).

Необходимо выбрать, созданный ранее файл со схемой в формате .itm (рис. 3).



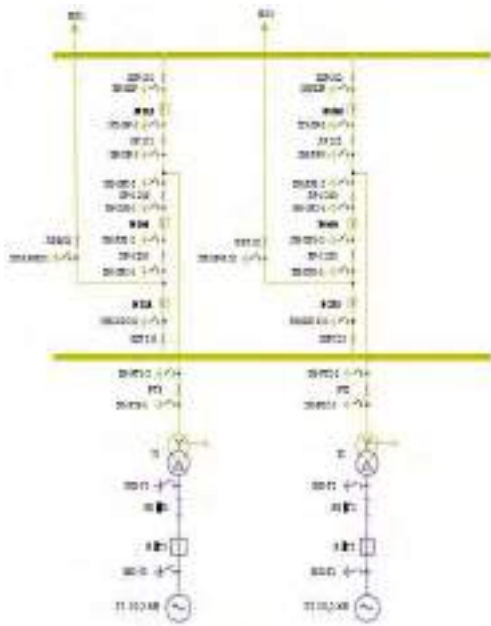


Рис. 1 – Схема объекта ЭЭС

Подтверждаем правильность действий в всплывающем окне (рис. 6).

Нажимаем кнопку YES, далее клавишей «Ввод» открываем окно «Баллы за операцию» (рис. 7).

В контекстном меню выбираем «Устранить/снять» и выбираем ограждение. Аналогичные действия проделываем для вывешивания плаката (рис. 8, 9).

Отключаем выключатель В-Г1 нажатием на кнопку «Откл» в контекстном меню.

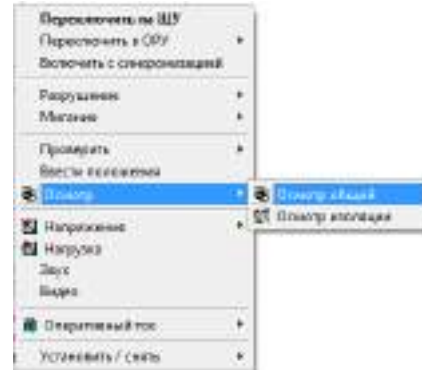


Рис. 5 – Контекстное меню



Рис. 2 – Название создаваемой тренировки

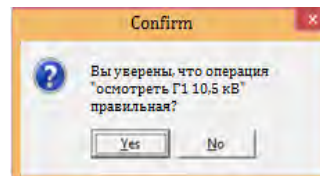


Рис. 6 – Всплывающее окно

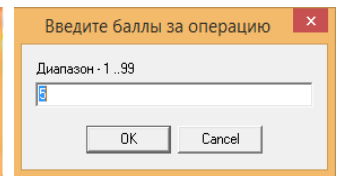


Рис. 7 – Окно для ввода баллов за операцию

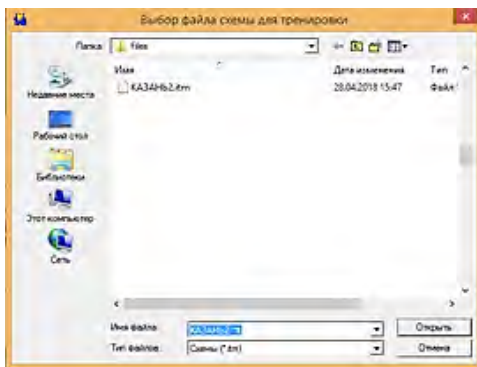


Рис. 3 – Выбор файла схемы для тренировки

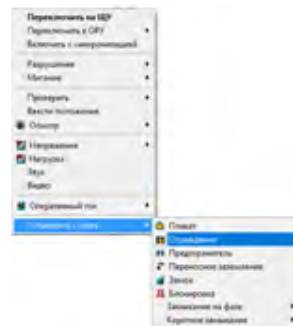


Рис. 8 – Ограждение

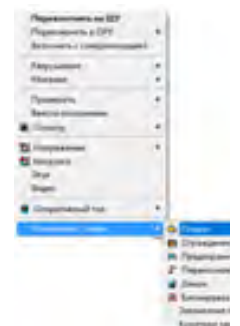


Рис. 9 – Плакат

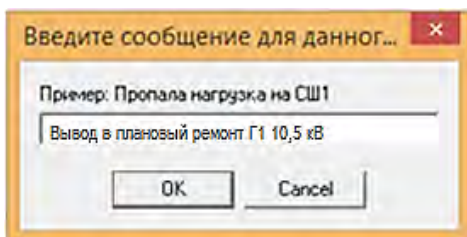


Рис. 4 – Ввод сообщения

Нажимаем кнопку показа сообщения. В окне «Введите сообщение» прописываем: «Выход в плановый ремонт Г1 10,5 кВ» (рис. 4). Нажимаем кнопку «ОК».

Правой кнопкой мыши нажимаем на генератор Г1. Появляется контекстное меню выбора дальнейших действий. Выбираем «Осмотр» – «Осмотр общий» (рис. 5).

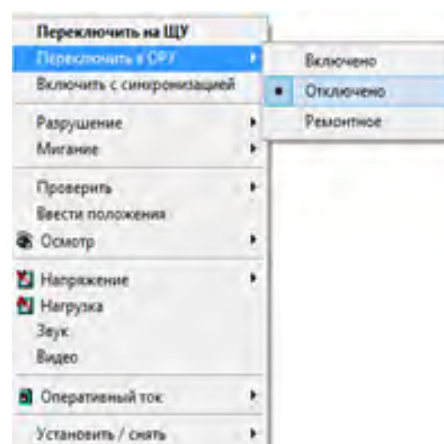


Рис. 10 – Контекстное меню



Рис. 11 – Панель разъединителя

Повторяем те же действия по подтверждению операции и выставлению баллов за выполненное действие.

Повторяем все действия, произведенные ранее. Отключаем генератор Г1 в контекстном меню (рис. 10).

Отключаем разъединитель РЛ-Г1. Повторяем все действия «Осмотр» – «Осмотр общий», произведенные ранее. В контекстном меню нажимаем кнопку «Переключиться – отключено». После этого появляется динамическое изображение разъединителя. Щелкая на него, переводим его в отключенное положение; при этом обеспечивается видимый разрыв (рис. 11).

После отключения В-Г1 и РЛ-Г1 включаем заземляющие ножи ЗН1-Г1 и ЗН2-Г1.

После оперативных действий схема имеет вид (рис. 12).

После завершения всех операций в всплывающем окне появляется уведомление: «Выполнили все действия. Генератор Г1 планово выведен в ремонт».

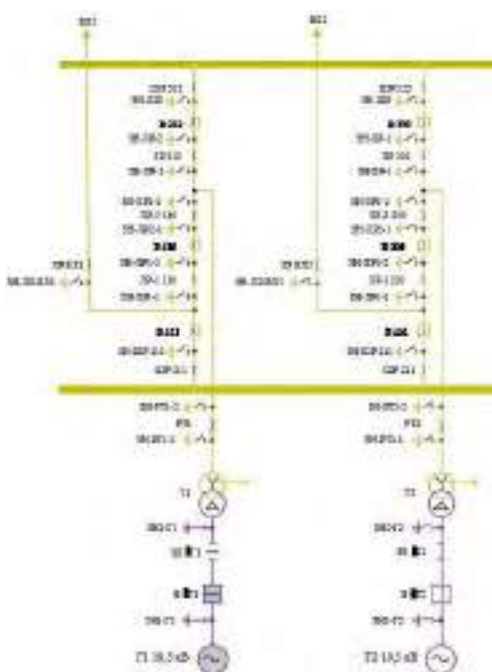


Рис. 12 – Выключатель генератора Г1 отключен

### III. ПРИМЕР ПРОХОЖДЕНИЯ ТРЕНИРОВКИ

Чтобы зайти в режим тренировки, необходимо войти в программу комплекса TWR-12трп. Нажать на кнопку «Учебная тренировка» (рис. 13).

В всплывающем окне «Список тренировок» выбрать тренировку «Вывод в ремонт генератора Г1 10,5 кВ» (рис. 14).

Открывается рабочее окно с сообщением о дальнейших действиях (рис. 15).

После данного сообщения о плановом выводе в ремонт обучаемому необходимо повторить все действия, прописанные ранее в режиме создания тренировки.

После завершения тренировочного процесса будет выдан протокол прохождения тренировки, в котором будет отражена последовательность действий обучаемого (рис. 16).



Рис. 13 – Учебная тренировка



Рис. 14 – Выбор тренировки



Рис. 15 – Окно с сообщением



Рис. 16 – Протокол

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе смоделирован объект ЭЭС, разработаны сценарий и тренировка по выводу в ремонт генератора.

#### Список используемых источников

- [1] Тренажер оперативных переключений диспетчера TWR12 // Энергетические технологии. URL: <http://www.enert.ru/twr>.
- [2] URL: <http://www.korong.rushydro.ru>.
- [3] Электрические сети – правила, эксплуатация, инструкции. URL: <http://forca.ru>.

# БАЗА ЗНАНИЙ ЭНЕРГЕТИКА «AMPER.PRO»

Агафонов А.Н., Болотов П.В.  
Филиал АО «СО ЕЭС» Владимирское РДУ  
Владимир, Россия  
rednaxela13@yandex.ru, bolotovp@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Качественная подготовка специалиста занимает продолжительное время. В процессе подготовки у каждого студента, а в последствии инженера – энергетика, накапливается объёмная база знаний, в большинстве случаев находящаяся на бумажном носителе. В рамках рабочей должности, как у молодого специалиста-энергетика, так и у состоявшегося инженера, нередко возникает вопрос о необходимости в короткий срок вспомнить знания, полученные в студенческие годы или в пору «инженерной юности». Реализовать эту задачу без консолидированной электронной базы знаний довольно сложно. Для выполнения этой задачи реализуется проект «AMPER.PRO».

**Материалы и методы:** Для создания базы данных энергетика «AMPER.PRO» использовался «движок» для вики-проектов MediaWiki, построенный на скриптовом языке программирования веб-приложений PHP.

**Результаты:** Реализована база знаний энергетика по адресу в сети интернет «<https://amper.pro>».

**Выводы:** На данный момент база знаний энергетика «AMPER.PRO» находится на этапе становления и утверждения первоначальных тем. Перед нами стоит задача наполнить базу знаний качественными ответами на инженерные вопросы в энергетике.

**Ключевые слова:** база знаний, инженер-энергетик, сайт.

# KNOWLEDGE DATABASE FOR POWER ENGINEERS «AMPER.PRO»

A. Agafonov, P. Bolotov  
The branch of Joint-stock Company “System Operator of the United Power System”, RDU Vladimir  
Vladimir, Russia  
rednaxela13@yandex.ru, bolotovp@yandex.ru

## Abstract

**Background:** Long period of time is usually needed for high quality training of professionals in power industry. Frequently rich knowledge base in hard copy is a result of sustained study at university and due to professional experience. Under workforce position both young professional and experienced specialist needs to rub up knowledge of a subject. It's a complex challenge to make without consolidated database. “Amper.pro” is made for this purpose.

**Materials and Methods:** MediaWiki knowledge database engine is used for knowledge database for power engineer «AMPER.PRO». It's built using PHP language for web apps.

**Results:** Knowledge database for power engineers is realised at the following URL «<https://amper.pro>».

**Conclusions:** At this stage knowledge database for power engineers «AMPER.PRO» is in it's infancy at the stage of them adjustment. The challenge before us is to fill the database with high-quality answers to engineering challenges.

**Key words:** knowledge database, electrical power engineer, website.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент развития цифровых технологий хранение информации только на бумажных носителях представляется пережитком прошлого. Несомненно, глубокие научные труды или академические статьи уместно смотреть в многотомном труде и красивой обложке. Но, используя такие «монументальные» работы, довольно трудно ознакомиться с вопросом, который тебя интересует, за короткое время. В ответ на необходимость получения «быстрых знаний» в сети Интернет появилось определённое количество ресурсов, которые представляют интерес для пользователя. Это подтверждается многолетней успешной работой таких сайтов, как Википедия и Киберленинка.

В настоящее время в интернете существует ряд ресурсов, которые пользуются популярностью у инженеров-энергетиков: форумы «Советы бывалого релейщика» и «Электрик», Портал Энерготрейдера.

Все эти ресурсы предлагают узконаправленную специфику представляемых знаний.

Для поддержания уровня старых и получения новых знаний в области энергетики, электротехники, электроники и других смежных специальностей необходим ресурс, который будет объединять и консолидировать информацию по интересующим вопросам. Для реализации этой задачи и была задумана база знаний энергетика.

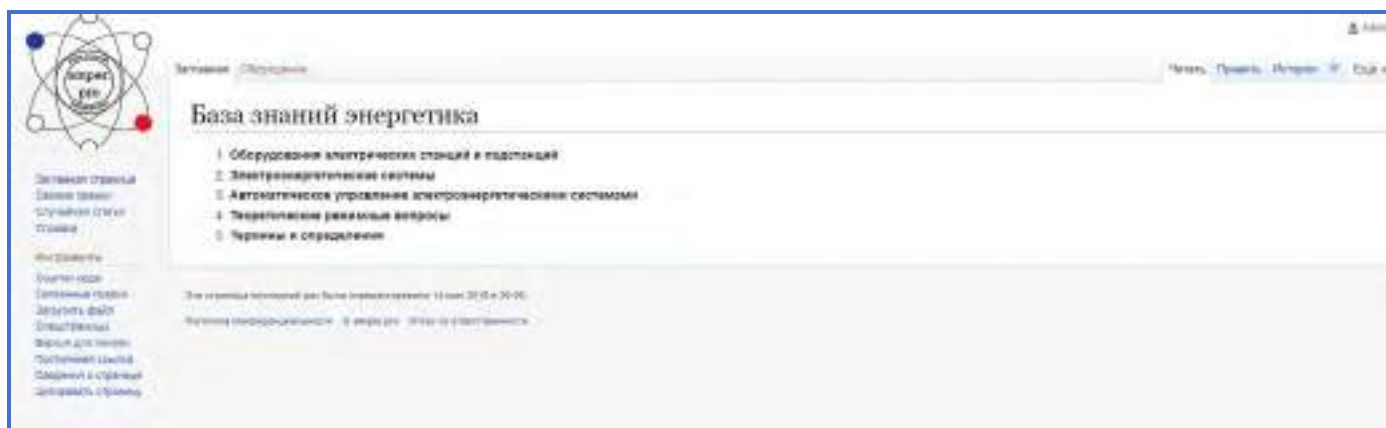


Рис. 1 – Внешний вид заглавной страницы «AMPER.PRO»

## II. AMPER.PRO

Для реализации базы знаний использовался «движок» MediaWiki, который применяется в открытой энциклопедии Википедия. MediaWiki является свободной программой и распространяется на условиях общественной лицензии GNU, т.е. универсальной общественной лицензией. MediaWiki представляет собой web-интерфейс работы с базой страниц. Широкие возможности по редактированию текста, вставке математических формул и графических материалов благоприятно сказываются на скорости написания и редактирования статей [1].

Проект в данный момент находится на этапе утверждения первоначальных тем, поэтому главная страница (рис. 1) содержит ссылки на следующие разделы:

1. Оборудование электрических станций и подстанций.
2. Электроэнергетические системы.
3. Автоматическое управление электроэнергетическими системами.
4. Теоретические режимные вопросы.
5. Задачи.
6. Термины и определения.

Перейдя по одной из ссылок, посетитель попадает на страницу, где подробно рассмотрена интересующая тематика.

В процессе наполнения базы знаний материалом структура представления информации может меняться.

База знаний расположена на серверах известного и популярного хостинга REG.RU, что гарантирует доступ к ресурсу AMPER.PRO в любое время.

## III. ВЫВОДЫ

Благодаря использованию «движка» MediaWiki, у каждого пользователя есть возможность внести существенный вклад в развитие проекта. Зарегистрированный пользователь может вносить изменения, дополнять или сам создавать страницы с необходимыми разделами. Использование такого функционала положительно сказывается на качестве статей и широте охвата материала.

В век быстро меняющейся информации каждому специалисту-энергетику необходимо оставаться в курсе вектора развития всей отрасли. Консолидация знаний применения традиционных и новых технологий в энергетике на одном портале положительно отразится на квалификации каждого пользователя ресурса.

### Список литературы

- [1] Barrett Daniel J. MediaWiki. O'Reilly, 2008.
- [2] СТО 59012820.03.100.30.004-2015 «Профессиональная подготовка, поддержание и повышение квалификации персонала. М.: ОАО «СО ЕЭС», 2015.

# РАЗВИТИЕ И ИТОГИ ПО СОЗДАНИЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОВЕРКИ УРЗА

Гура Д.Н., Байрамуков М.А., Яловой В.Я., Корольков А.Л.  
ФГАОУ ВПО СКФУ, ФГБОУ ВПО РГУПС, Филиал АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ  
Пятигорск, Ростов-на-Дону, Россия  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В настоящее время в релейной защите из-за всеобщего распространения цифровых устройств возникла потребность в создании универсальных программных комплексов проверки УРЗА.

**Материалы и методы:** При разработке использовались программная библиотека RETOM-Мастер и язык программирования Visual Basic for Applications. В качестве математического метода нахождения искомых величин применялся метод последовательных приближений.

**Результаты:** Разработан программный комплекс проверки УРЗА, с помощью которого экспериментально получены характеристики срабатывания измерительных органов релейной защиты.

**Выводы:** Применение программного комплекса позволяет автоматизировать процесс проверки цифровых устройств релейной защиты, что значительно сокращает время выполнения данной процедуры.

**Ключевые слова:** релейная защита, программный комплекс, обучение студентов.

# THE DEVELOPMENT AND OUTCOMES OF CREATING SOFTWARE SYSTEMS VALIDATION URZA

D. Gura, M. Bajramukov, V. Yalovoy, A. Korolkov  
FSAEI HPE NCFU, FSAEI HPE RSRTU, JSC "SO UPS" North Caucasus RDU  
Pytigorsk, Rostov-on-Don, Russian Federation  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

## Abstract

**Background:** At present, relay protection due to the General spread of digital devices, there is a need to create universal software systems for testing URZA.

**Materials and Methods:** During the development we used the software library RETOM-Master and programming language Visual Basic for Applications. As a mathematical method of finding the required quantities, the method of successive approximations was used.

**Results:** A software system for testing URZA, which experimentally obtained the characteristics of the operation of the measuring bodies of relay protection.

**Conclusions:** The application of the software allows to automate the process of checking digital relay protection devices, which significantly reduces the time of this procedure.

**Key words:** relay protection, software system, training of students.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в релейной защите произошли качественные изменения, вызванные широким использованием цифровых устройств. Данные тенденции обусловлены, в первую очередь, существенными преимуществами релейной защиты на микропроцессорной базе по сравнению с электромеханической и полупроводниковой релейной защитой [1].

Надежность работы устройств релейной защиты (УРЗА) во многом определяется возможностью проведения их полной или частичной проверки, как в условиях эксплуатации на энергообъектах, так и при наладочных работах. Такие

проверки проводятся регулярно с использованием специальных приборов, например, измерительного программно-технического комплекса (ИПТК) RETOM-51, RETOM-61 и OMICRON. Поэтому важно правильно и достаточно точно осуществлять проведение проверок микропроцессорных УРЗА с использованием специальных программ [2].

## II. АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

1. Ввод исходных данных (уставок).
2. Включение устройств и настройка связи.
3. Запуск счетчика проверки.

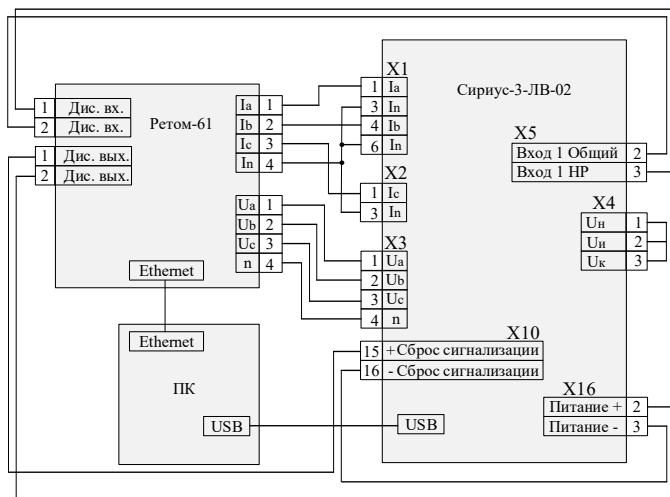


Рис. 1 – Схема соединения ИПТК РЕТОМ-61 и «Сириус-3-ЛВ-02» при исследовании ДЗ

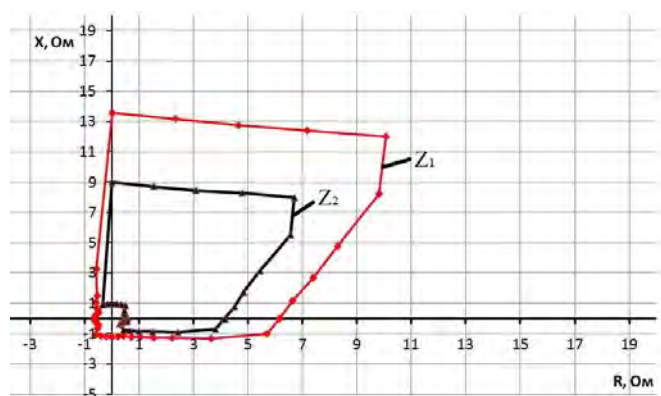


Рис. 2 – Экспериментально полученные характеристики срабатывания реле сопротивления первой ступени ДЗ

4. Изменение напряжения.
5. Проверка условий срабатывания.
6. Определение сопротивления срабатывания.
7. Вывод результатов расчета.

### III. ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ

Основным инструментом в ходе реализации поставленной цели является программная библиотека РЕТОМ-Мастер [3] и язык программирования Visual Basic for Applications (VBA).

В качестве устройства цифровой РЗА использовался терминал «Сириус-3-ЛВ-02». В данном устройстве реализована функция четырехступенчатой ДЗ от междуфазных коротких замыканий и одна ступень ДЗ от замыканий

на землю в сетях напряжением 110-220 кВ [4]. Схема соединения ИПТК РЕТОМ-61 и «Сириус-3-ЛВ-02» для исследования ДЗ представлена на рис. 1.

При исследовании ДЗ строится характеристика срабатывания реле сопротивления на комплексной плоскости. На рис. 2 представлены экспериментально полученные характеристики первой ступени ДЗ от междуфазных коротких замыканий с разными уставками.

### IV. ДОСТИЖЕНИЯ

1. Создание алгоритма проверки всех токовых защит.
2. Применение программного комплекса для проверки защит разных производителей на различной элементной базе.
3. Проведение натурных испытаний терминалов на действующих энергообъектах.
4. Взаимодействие с фирмами-производителями проверочных устройств и терминалов защит.
5. Проведение научной деятельности.
6. Применение программного комплекса для обучения студентов.

### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет:

- 1) автоматизировать процесс проверки цифровых устройств РЗА;
- 2) сократить время проверки цифровых устройств РЗА;
- 3) исключить «машинные» ошибки (оплошности) при проведении проверок;
- 4) использовать простой и доступный интерфейс пользователя.

Это особенно важно из-за растущего числа цифровых устройств РЗА в электроэнергетической системе нашей страны.

### Список литературы

- [1] Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
- [2] Бурман А.П. Строев В.А. Современная электроэнергетика. М.: МЭИ, 2003. 454 с.
- [3] Руководство пользователя Ретом-61 RU.БРГА.61000-02 90. Чебоксары: НПП «Динамика», 2012.
- [4] Микропроцессорное устройство защиты линий 110–220 кВ «Сириус-3-ЛВ-02» БРВА.656122.096 РЭ. Техническое описание и руководство по эксплуатации. М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2011.

# КОРРЕКТИРОВКА СТРАТЕГИИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ – СОЗДАНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОРЫВА

Исмагилов А.В.  
Филиал АО «СО ЕЭС» Челябинское РДУ  
Челябинск, Россия  
IsmagilovAV@chelrdu.so-ups.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Основываясь на собственном опыте автора и проанализировав содержание «Стратегии развития системы подготовки рабочих кадров и формирования прикладных квалификаций в Российской Федерации на период до 2020 года», можно сделать вывод об усеченном подходе к понятию «образование». Человек рассматривается как сформировавшаяся личность, и подразумевается, что достаточно дать ему только навыки производственной деятельности для успешной и эффективной работы. В Стратегии все сведено к образовательным программам специальной подготовки и их финансированию. Образование ориентировано на работодателя, а не на человека.

**Материалы и методы:** В докладе представлен личный опыт автора, который за 12 лет работы на различных предприятиях электроэнергетической отрасли Челябинской области неоднократно принимал участие в организационно-деятельных играх и форумах.

**Результаты:** На основании опыта работы и участия в играх и форумах проведен анализ внутреннего развития личности и сделаны выводы о неоспоримом положительном влиянии этого участия на становление специалиста.

**Выводы:** Для изменения сложившейся ситуации в электроэнергетике необходимо провести корректировку стратегии подготовки кадров и учесть тот факт, что возможность технологического прорыва лежит не в плоскости профессиональных знаний специалиста, а намного глубже, в плоскости его внутреннего стремления изменить мир.

**Ключевые слова:** технологический прорыв, стратегия, образование, электроэнергетика.

## ADJUSTMENT OF A TRAINING STRATEGY FOR THE ELECTRICITY SECTOR IS THE CREATION OF CONDITIONS OF TECHNOLOGICAL BREAKTHROUGH

A. Ismagilov

Branch of joint stock company “System operator of unified power system” Chelyabinsk regional dispatching office  
Chelyabinsk, Russian Federation  
IsmagilovAV@chelrdu.so-ups.ru

## Abstract

**Background:** Based on the author's own experience and analyzing the content of the “Strategy for the development of the system of training of workers and the formation of applied qualifications in the Russian Federation for the period up to 2020”, it can be concluded that a truncated approach to the concept of "education". The person is considered as the formed personality and it is implied that it is enough to give him only skills of production activity for successful and effective work. In the Strategy everything is reduced to educational programs of special preparation and their financing. Education is directed at the employer and not at the person.

**Materials and Methods:** when creating the report, the author's personal experience was used, which for 12 years of work at various enterprises of the electric power industry of the Chelyabinsk region has repeatedly participated in organizational and active games and forums.

**Results:** On the basis of experience and participation in games and forums the analysis of internal development of the person is carried out and conclusions about indisputable positive influence of this participation on formation of the expert are drawn.

**Conclusions:** In order to change the current situation in the power industry, it is necessary to adjust the training strategy. Take into account the fact that the possibility of technological breakthrough lies not in the plane of professional knowledge of the specialist, but much deeper in the plane of his inner desire to change the world.

**Key words:** technological breakthrough, strategy, education, electric power engineering.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологический прорыв – это скачок через пропасть от знаний человека, воплощенных в жизнь в настоящий момент времени в новую реальность, построенную на новых знаниях (вновь открытых физических явлениях), скрытых от исследователя до тех пор, пока этот скачок не совершен.

Только человек-творец способен совершить данный скачок, поскольку он увлеченно ищет эту новую реальность, основываясь на мечте изменить мир к лучшему. Его мечта – это сильнейшая мотивирующая сила, толкающая его вперед для достижения результата. Человек-творец не приходит ниоткуда, его должно воспитать общество, дав ему «правильное» образование.

Образование – перенос образа воздействующего субъекта (учителя-наставника) на объект образования (ученика). В этом понятии заключены не только передача знаний и опыта, но главным образом процесс воспитания в человеке способности критично оценивать себя и окружающий мир, позитивно смотреть в будущее, мечтать, постоянно и упорно делать попытки изменить к лучшему реальность, которая его окружает. Без «правильного» образа, перенесенного на человека, технологический прорыв невозможен. Главный ресурс технологического прорыва – человек.

## II. ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Энергетика, как локомотив экономики и основа инфраструктуры, сегодня нуждается в технологическом прорыве как в сфере передачи и распределения электроэнергии (передача без потерь, передача без проводов, способность аккумулировать электроэнергию в больших количествах), так и в сфере генерации (построение распределенной энергетики через поиск новых экономически эффективных и экологически безопасных источников энергии). Это достижимо только через изменение кадровой политики, воспитание и подготовку кадров.

Немаловажную роль здесь играет возрождение инженерной школы. Инженерное мышление – это особое, творческое мышление. Человек, обладающий инженерным мышлением, способен делать серьезные выводы, основываясь на малом количестве информации, которую он получает при наблюдении какого-либо явления и внутреннем анализе этой информации, что является крайне важным и даже определяющим фактором в исследованиях. Умение видеть перспективу там, где её не видят другие. Напротив, мышление управленческое и экономическое заточено на получение выгоды и прибыли. Все, что за рамками этих двух понятий – нецелесообразно. «Управленцы» и «экономисты» в большинстве своем живут в рамках «сегодня и сейчас», «светлое будущее» их мало интересует. Такое мышление у них формируется в процессе учебы. Исследования, поиск новых границ знаний – процесс, который не укладывается в понятие рентабельности. Он всегда нерентабелен, поэтому должен поддерживаться государством и крупными корпорациями. Ведь для того, чтобы нащупать хоть призрачную возможность перехода на новые физические принципы, нужны большие финансовые вливания и годы исследований, которые с большой долей вероятности могут завершиться неудачей.

В наше время во главе крупных корпораций редко можно встретить инженеров. А мышление топ-менеджеров загнано в узкие рамки выгоды. Все эти факторы оказывают

влияние на проводимую руководством кадровую политику потребления, когда полет мысли инженера-творца наталкивается на стену невозможности быстрой окупаемости предложений. Это приводит к отсутствию запроса на технологический прорыв с верхних уровней управления, а специалисты нижних уровней исполнения, которые способны своими идеями что-то изменить, не находят понимания у своего руководства и со временем перестают делать попытки достучаться до него. Все это заводит отрасль в тупик, а работники теряют инициативу.

Попытаемся сформулировать и раскрыть основные проблемы сегодняшней кадровой политики:

### A. Работа ради вознаграждения

- Вследствие отсутствия «правильного» образования не возникает внутренней мотивирующей силы менять мир к лучшему. В итоге специалист работает только на себя (ради собственной выгоды).
- Сложившаяся в стране экономическая ситуация заставляет человека выбирать направления деятельности, исходя из уровня вознаграждения, а не собственной увлеченности направлением. Это приводит к низкой эффективности работы и отсутствию инициативы.

### B. Отсутствие механизма наставничества

- Закрепление молодых специалистов и студентов профильных вузов за опытными специалистами, имеющими «правильное» образование – немаловажный фактор, напрямую влияющий на работу молодого специалиста в будущем. Отсутствие механизма наставничества не только лишает молодых специалистов крайне важных практических знаний, но и не воспитывает в них стремление улучшать ситуацию в энергетике. Сегодня наставничество носит формальный характер.

### C. Отсутствие поддержки творческих идей и поощрения инициативы

- Постоянное непонимание со стороны руководства приводит человека-творца к внутреннему конфликту (могу изменить мир к лучшему, но не дают), в итоге человек перестает делать попытки и становится «как все».

### D. Загруженность персонала «бумажной» работой

- Наличие огромного числа предписывающих документов и контролирующих структур приводит к загруженности персонала чтением порой бесполезной в конкретной работе литературы, созданием бесконечного количества отчетов и отписок. Все это отнимает у инженера драгоценное время на выполнение основных функций, не говоря уже о возможности задумываться о перспективных разработках.
- Загруженность «бумажной» работой руководителей среднего звена приводит к нехватке времени для решения стратегических вопросов работы отделов и служб. Руководитель решает только текущие задачи, при этом «выпадает» из работы отдела и находится вне команды, которой руководит. У него нет возможности воспринимать и обдумывать предложения своих подчиненных по изменению ситуации к лучшему.



#### *Е. Отсутствие обратной связи на всех уровнях*

- Нередко сверху насаждается внедрение новых технологических укладов и принципов работы. Однако, с уровня исполнителя совершенно очевидно, что внедрение не приводит к желаемому результату или, что еще хуже, замедляет процесс работы, дублирует функции. Обратная связь «Исполнитель – Руководство» перед внедрением помогло бы скорректировать стратегию, избавиться от дублирования функций и указать на неэффективность внедряемых принципов.

#### *Ф. Замалчивание проблем из-за карательной политики руководства*

- Большое количество проблем вообще не выносятся на обсуждение, поскольку высший руководящий состав проводит карательную политику в отношении руководителей среднего звена. Вскрытие проблем на предприятиях, раскрытие информации об аварийных ситуациях и недоработках грозит руководителям среднего звена увольнением или понижением в должности. В итоге проблемы не обсуждаются, происходит потеря ценного опыта, не делаются полезные выводы по ликвидации и недопущению подобных случаев в будущем. Мероприятия сводятся к формальным, часто затрудняющим работу, действиям.

#### *Г. Неприятие проблем и занижение роли исполнителя*

- Одним из важнейших негативных факторов является то, что мнение исполнителей, которые каждый день видят ситуацию изнутри (как субъекты, переживающие событие, а не сторонние наблюдатели, которыми являются руководители всех уровней) не воспринимается серьезно. Более того, работник, поднимающий трудные вопросы перед руководством, становится проблемой. Он перестает быть кандидатом на повышение. А ведь именно эти люди хотят и могут что-то изменить, но они остаются «не у дел».

#### *Н. Стремление описать в инструктивных материалах действия на все случаи*

- Увеличение количества инструкций, приказов, распоряжений и количества листов в них приводит к «замыливанию» главного. Работники начинают подходить к чтению материалов формально из-за нехватки рабочего времени. Это ухудшает профессиональную подготовку, снижает квалификацию.
- Стремление описать в инструкциях все случаи, которые могут иметь место в процессе работы, приводит к «отупению» персонала. Специалист перестает анализировать ситуацию, надеясь, что за него уже подумал автор инструкции. Это нередко приводит к аварийным ситуациям.

### III. Выводы

Все вышеизложенные недостатки существующей кадровой политики приводят к непониманию необходимости технологического прорыва в электроэнергетике. Преодоление большого количества препятствий, создаваемых бюрократической машиной корпораций, не оставляет времени на стратегическое мышление руководителей

среднего звена и специалистов. Приходящие молодые специалисты, имеющие внутреннюю мотивирующую силу и желание изменить ситуацию, лишенные наставников и не поддерживаемые руководством, быстро теряют энергию и теряются в массе равнодушных.

Необходимо менять мышление всех работающих в электроэнергетике людей через корректировку стратегии подготовки кадров.

#### IV. КОРРЕКТИРОВКА СТРАТЕГИИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ, ОБЩИЙ ПРИНЦИП

Общим принципом корректировки стратегии должно являться внедрение в программы обучения студентов, повышения квалификации специалистов и руководящего состава специальных знаний и деловых игр, направленных на изменение мышления всех участников процесса в сторону постоянного стремления вперед. Раскрытие перед участниками механизмов этого явления и причин появления мотивирующих сил поможет специалистам и руководящему составу самостоятельно корректировать свои действия, а также улучшить взаимопонимание между уровнями управления в части необходимости перемен.

#### V. ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ КОРРЕКТИРОВКИ СТРАТЕГИИ

##### *А. Подготовка студентов профильных ВУЗов и вновь пришедших специалистов*

- Необходимо активное участие предприятий в жизни студентов профильных ВУЗов (так называемое шефство).
- Создание площадок для раскрытия потенциала студентов, передачи опыта и знаний специалистов и руководящего состава предприятий в части необходимости развития электроэнергетики через развитие творческой инициативы новых кадров.
- Отбирать потенциальных кандидатов не только по принципу отличных знаний или хороших отметок, но на площадках организационно-деятельных и деловых игр давать студентам возможность проявить свои лучшие качества, помочь им раскрыть их скрытые возможности, о которых они порой не подозревают или боятся показать.
- Закреплять вновь пришедших специалистов за лучшими сотрудниками предприятий, которые способны не только передать свой опыт и знания, но и задать вектор развития профессиональных качеств молодого специалиста и поддержать его творческий потенциал.

##### *В. Подготовка специалистов предприятий электроэнергетики*

- Каждый специалист, работающий в энергетике (в соответствии с графиком повышения квалификации) должен пройти «активацию» своих внутренних мотивирующих сил через участие в организационно-деятельных и деловых играх.

- Для «активации» творческого потенциала работников необходимо как централизованно (в рамках корпораций), так и локально (на уровне предприятий) создавать площадки и разрабатывать собственные программы, которые в виде игры моделируют сложные производственные, экономические и социальные задачи. Эти задачи должны решаться в установленное время в смешанных группах специалистов разных компетенций, где сломаны барьеры между должностями и авторитетом участников. Смешанность групп и отсутствие барьеров – крайне важный фактор, который дает возможность молодым специалистам показать свое видение проблем, не боясь быть непонятыми, специалистам разных компетенций понять проблемы друг друга, а руководителям яснее увидеть потенциал своих работников и выявить собственные ошибки и недоработки (так называемая обратная связь). Взаимодействие руководителей и работников разных компетенций на одном уровне поднимает обмен опытом в процессе решения срочных и острых задач на качественно новый уровень.
- Очень важно создать условия для встраивания работников в цифровую модель электроэнергетики и управления, проводить обучение на тему цифровых и информационных технологий, показывать преимущества данной модели. Информационные технологии давно и прочно вошли во все сферы жизни и стали частью инфраструктуры государств. В энергетике широко внедряются технологии управления технологическими процессами и режимами. Приходит время умных саморегулирующихся энергосистем, электрических сетей и телеуправления. Выпадение работников из этой перспективы приведет к отсутствию квалифицированных специалистов и коллапсу отрасли.
- Не менее важным является занятость сотрудников в компетенциях, к которым они тяготеют. Когда работа – это повинность, трудно обеспечить высокую эффективность и увлеченность при решении задач. Руководство должно трезво оценивать способности специалистов и отдавать им сферы, в которых их потенциал будет максимально использован.

### *С. Подготовка руководящего состава предприятий электроэнергетики:*

- Руководители всех уровней также должны пройти «активацию» своих внутренних мотивирующих сил. В противном случае все попытки специалистов изменить ситуацию будут демпфироваться на уровне управления.
- В процессе повышения квалификации мышление руководителей необходимо менять в сторону необходимости решения стратегических задач на уровне подстанции, района, отдела, службы, предприятия, корпорации. Руководитель обязан не только не препятствовать инициативам специалистов, но мотивировать их на проявление этой инициативы.
- Обязательно участие руководителей в организационно-деятельных и деловых играх для понимания важности и необходимости работы в команде. Руководящему составу нужно внедрять важность качественно новой модели руководства, которую можно охарактеризовать словами «первый среди равных». Это модель руководства, в которой руководитель – член команды, разделяющий с её участниками ответственность за неудачу. Однако команда осознанно отдает ему право «последнего слова» на основании его авторитета, как более грамотного и опытного члена команды.
- Необходимо создавать кадровый резерв из активных специалистов, понимающих необходимость постоянного движения вперед и видящих перспективы и пути такого движения, верящих в свои силы и свою команду.

### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Движение в сторону технологического прорыва в электроэнергетике через корректировку стратегии подготовки кадров не даст результатов мгновенно. Это длительный процесс, рассчитанный на долгосрочную перспективу и поэтому начинать его нужно уже сегодня.

### Список литературы

- [1] Стратегия развития системы подготовки рабочих кадров и формирования прикладных квалификаций в Российской Федерации на период до 2020 года. М., 2013. 58 с.

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ РАБОТНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО ДИАГНОСТИКЕ МАСЛОПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Карташова А.А.<sup>1,2</sup>, Танеева А.В.<sup>3</sup>, Новиков В.Ф.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ассоциация «Некоммерческое партнерство «Камский инновационный территориально-производственный кластер»

<sup>2</sup>Казанский кооперативный институт (филиал) Российского университета кооперации

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

г. Казань, Россия

kitpk@list.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В работе обозначаются проблемы повышения квалификации работников энергетической отрасли промышленности, проводимой на протяжении достаточно большого периода времени на базе «Центральной аналитической лаборатории хроматографических методов анализа» при Казанском государственном энергетическом университете.

**Материалы и методы:** Решение проблемы предлагается посредством реализации программы курсов повышения квалификации по газохроматографическим методам анализа в энергетике для специалистов заводских лабораторий и профильных подразделений предприятий энергетической отрасли.

**Результаты:** По отзывам слушателей данного курса, материал, полученный в ходе обучения имеет важное практическое значение даже для специалистов с большим практическим стажем работы. Более глубокое изучение основ газохроматографического анализа в энергетике позволяет более качественно выполнять поставленные производственные задачи, а также с большей долей осознанности подходить к вопросу анализа получаемых данных, что в конечном счете напрямую влияет на надежность и безопасность работы всей энергосистемы в целом.

**Выводы:** Реализованный курс показал высокую эффективность и востребованность специалистами энергетических предприятий. В последнее время началась реализация дистанционной формы обучения, а также организация повышения квалификации работников предприятий с выездом преподавателей непосредственно к заказчику с проведением практических занятий на оборудовании предприятий для решения конкретной проблемы.

**Ключевые слова:** хроматография, физико-химические методы анализа, заводская лаборатория, повышение квалификации, анализ трансформаторных масел, анализ топлив, анализ нефтепродуктов.

## INNOVATIVE DIAGNOSTICS TECHNOLOGIES OF THE OIL-COMPLETED ELECTRICAL EQUIPMENT BY CHROMATOGRAPHIC METHODS FOR INCREASING THE QUALIFICATION OF EMPLOYEES IN THE ENERGY INDUSTRY

A. Kartashova<sup>1,2</sup>, A. Taneyeva<sup>3</sup>, V. Novikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Association of Kama cluster INNOKAM

<sup>2</sup>Kazan cooperative institute

<sup>3</sup>Kazan state power-engineering university

Kazan, Russian Federation

kitpk@list.ru

## Abstract

**Background:** The paper outlines the problems of upgrading the skills of workers in the energy industry, which has been conducted for a sufficiently long period of time on the basis of the “Central Analytical Laboratory of Chromatographic Analysis Methods” at the Kazan State Power-Engineering University.

**Materials and methods:** The solution of the problem is proposed through the implementation of a program of advanced training courses on gas chromatographic methods of analysis in the energy sector for specialists of factory laboratories and specialized subdivisions of enterprises in the energy sector.

**Results:** According to the feedback of the students of this course, the material received during the training is of great practical importance even for specialists with a large practical experience. Study of the fundamentals of gas chromatographic analysis in the energy sector allows better to perform the assigned production tasks, as well as to approach the analysis of the received data with a greater degree of awareness, which ultimately directly affects the reliability and safety of the entire energy system as a whole.

**Conclusions:** The realized rate showed high efficiency and demand for energy companies' specialists. Recently, the implementation of a distance form of training began, as well as the organization of advanced training for enterprise employees with the departure of teachers directly to the customer, with practical training on equipment of enterprises to solve a specific problem.

**Key words:** chromatography, physical and chemical methods of analysis, factory laboratory, advanced training, analysis of transformer oils, analysis of fuels, analysis of petroleum products.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях энергетической отрасли промышленности эксплуатируется большое количество силового маслонаполненного электрооборудования, аварии которых могут приводить к крупным пожарам, дорогостоящим ремонтным работам и экономическим потерям в результате недопоставки электроэнергии потребителям. Поэтому диагностика этого электрооборудования и как можно более раннего выявления отклонений от нормального технического состояния является достаточно актуальной задачей [1].

Наиболее часто повреждения в трансформаторах приводят к повышению температуры масла и напряженности электрического поля внутри изоляции. В результате этого процесса разрушается электрическая изоляция, что приводит к выделению различных газообразных веществ органической и неорганической природы. При этом трансформаторное масло накапливает в себе информацию о физико-химических процессах, протекающих в эксплуатируемом электрооборудовании. В этой связи инструментальные методы анализа позволяют выявить более 60 % возможных дефектов силовых трансформаторов на ранней стадии их развития [2]. Поэтому инструментальные методы анализа растворенных в трансформаторном масле газов включены в основные нормативные документы, которые определяют требования к контролю состояния трансформаторного оборудования [3].

Продолжающаяся модернизация энергетической отрасли промышленности предполагает дальнейшее развитие уже сложившихся направлений в электроэнергетике. При этом качество повышения квалификации специалиста относится к одному из ведущих направлений подготовки кадров. Особенность повышения квалификации кадров заключается в краткосрочном получении новых знаний в области своей профессиональной деятельности. Кроме того, на курсах повышения квалификации принимают участие уже сложившиеся специалисты с достаточно хорошим жизненным опытом, поэтому для них, как правило, необходимо давать материал, основанный на «свежей» отечественной и зарубежной литературе, актуальных источниках, а лабораторные и практические занятия проводить на современном аналитическом оборудовании [4].

## II. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

К одним из наиболее информативных методов диагностики развивающихся в трансформаторном оборудовании дефектов является газовая хроматография, которая получила наиболее широкое распространение [5, 6]. В то же

время в последние годы постоянно происходит поиск новых путей хроматографической диагностики состояния силовых трансформаторов, в частности стали применять высокоэффективную жидкостную хроматографию, что позволило существенно расширить круг определяемых в трансформаторном масле компонентов, включая его продукты уплотнения, органические и неорганические соли, а также фурановые соединения [7].

В то же время развитие существующих хроматографических методов анализа газов, выделяющихся из трансформаторного масла идет по пути применения более совершенных селективных детекторов, повышения чувствительности и точности определения за счет применения усовершенствованной системы пробоотбора и пробоподготовки, а также сорбентов, обладающих повышенной селективностью разделения газообразных смесей [9, 10]. Это позволит проводить постоянное совершенствование методов оценки и прогнозирования состояния электрооборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле.

С этой целью на базе лаборатории (рис. 1) разработана и успешно реализуется программа курсов повышения квалификации по газохроматографическим методам анализа в энергетике объемом 72 ак. часа (рис. 2).

Основная цель курса заключается в получении теоретических и практических навыков по проведению газохроматографических анализов энергетических объектов, а также контроль за экологическим состоянием окружающей природной среды.

Основными решаемыми задачами являются следующие:

- познакомить слушателей курсов с современными достижениями в области газохроматографического анализа,
- дать теоретические и практические навыки проведения газохроматографического анализа энергетических объектов, концентрирования примесей приоритетных загрязнителей окружающей среды, анализа газообразного и жидкого топлива, диагностики состояния маслонаполненного электрооборудования и др.,
- в ходе обучения максимально широко рассмотреть различные технические приемы, направленные на повышение точности и селективности газохроматографического анализа различных по физико-химической природе объектов, а также вопросы, связанные с концентрированием микропримесей приоритетных загрязнителей окружающей среды.



Рис. 1 – Коллектив «Центральной аналитической лаборатории хроматографических методов анализа» при Казанском государственном энергетическом университете (второй справа – научный руководитель, д-р хим. наук, проф. В.Ф. Новиков)



Рис. 2 – Слушатели курсов повышения квалификации – сотрудники энергетических предприятий Российской Федерации

Среди основных теоретических блоков рассматриваются:

- физико-химические основы газохроматографического разделения;
- неподвижные жидкие фазы и сорбенты для газохроматографического разделения органических смесей;
- капиллярная газовая хроматография;
- концентрирование микропримесей;
- детекторы для газовой хроматографии;
- аппаратура для газовой хроматографии;
- основы качественного анализа в газовой хроматографии;
- основы количественного анализа;
- специальные области применения газохроматографических методов анализа в энергетике.

Практическая часть курса по газовой хроматографии состоит из следующих основных разделов:

- Приготовление сорбентов и заполнение хроматографической колонки (ознакомление с различными приемами нанесения неподвижной фазы на инертный твердый носитель, а также с техникой заполнения хроматографических колонок).
- Оценка влияния скорости газа-носителя на эффективность разделения бинарных смесей на основе уравнения Ван-Деемтера (определение оптимальной скорости газа-носителя).
- Установление оптимальных условий работы пламенно-ионизационного детектора и зависимости чувствительности от расхода потоков (освоение различных экспериментальных приемов определения оптимальных условий работы пламенно-ионизационного детектора при анализе моторных топлив).
- Определение оптимальных характеристик чувствительности детектора по теплопроводности (наблюдение за изменением сигнала детектора по теплопроводности от тока моста и скорости газа-носителя при анализе продуктов сгорания газообразного и жидкого топлива).

- Идентификация компонентов бензиновых фракций на основе индексов удерживания стандартных сорбатов и их чувствительности к температуре (освоение приемов идентификации неизвестных соединений, принадлежащих к разным классам органических веществ, по результатам измерений индексов удерживания на колонках с полярной и неполярной жидкой фазой).
- Количественный анализ газов, выделяющихся из трансформаторного масла в процессе эксплуатации маслонаполненного электрооборудования (ознакомление с техническими возможностями газо-адсорбционного варианта хроматографии на примере разделения газообразных веществ).

По окончании курсов слушателям выдается удостоверение государственного образца.

По отзывам слушателей данного курса, материал, полученный в ходе обучения имеет важное практическое значение даже для специалистов с большим практическим стажем работы. Более детальное изучение основ газохроматографического анализа в энергетике позволяет на качественно новом уровне выполнять поставленные производственные задачи, а также с большей долей осознанности подходить к вопросу анализа получаемых данных, что в конечном счете напрямую влияет на надежность и безопасность работы всей энергосистемы в целом.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Курсы повышения квалификации работников энергетической отрасли промышленности по диагностике маслонаполненного электрооборудования проводятся на базе «Центральной аналитической лаборатории хроматографических методов анализа», созданной приказом ректора в 2008 году и аккредитованной службами Госстандарта России на техническую компетентность и независимость (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.517320).

Повышение квалификации специалистов проводится по модульной схеме и включает в себя теоретические аспекты хроматографических методов анализа, по которым читается курс лекций в объеме 32 учебных часов, на основе методического обеспечения, разработанного преподавателями курсов [11–14].

Практические занятия проводятся на современном оборудовании, включающем газовые хроматографы Кристаллукс-4000М и Хромос-1000, оборудованные системой пробоподготовки трансформаторных масел и автосамплером, позволяющим полностью автоматизировать процесс хроматографического разделения компонентов трансформаторного масла, исключая систематическую и случайную погрешность определения индивидуальных компонентов за счет человеческого фактора.

В последнее время на базе лаборатории начали реализовывать дистанционную форму обучения, а также повышение квалификации работников предприятий с выездом преподавателей непосредственно к заказчику с проведением практических занятий на оборудовании предприятий для решения конкретной проблемы.

### Список литературы

- [1] Ванин Б.В. и др. О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110–5 кВ в эксплуатации // Электрические станции. 2001. № 9. С. 53–58.
- [2] Долин А.П., Крайнов В.К., Смекалов В.В., Шамко В.Н. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов // Энергетик. 2001. № 7. С. 30–34.
- [3] РД 34.45-51.300.97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: изд-во НЦ «ЭНАС», 2000. 256 с.
- [4] Матушанский Г.У., Гаритонов Е.Е. Организационно-педагогические условия обеспечения качества учебного процесса в учреждениях высшего и дополнительного профессионального образования // Инновационное образование. Проблемы, поиски решения: матер. докл. IV Междунар. науч.-метод. конф. Казань, 2006. С. 13–18.
- [5] РД 34.46.303-98. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. М: ОАО «ВАННИЭ», 1998. 48 с.
- [6] РД 153-34. 0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. М: ОАО «ВНИИЭ», 2001. 41 с.
- [7] РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержащих производных фурана в электроизоляционных маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М.: СПО «ОРГРЭС», 1995. 12 с.
- [8] Бузаев В.В., Сапожников Ю.М. Хроматографический комплекс для анализа газов, воздуха и воды, растворенных в трансформаторных маслах // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. 1997. Вып. 5. С. 151–153.
- [9] Дарьян Л.А. Прототипы «ЭЛХРОМ» для хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. 2000. Вып. 11. С. 234–237.
- [10] Каратаев О.Р., Танеева А.В., Карташова А.А., Новиков В.Ф. Основы газохроматографического анализа / под ред. проф. В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. 244 с.
- [11] Каратаев О.Р., Танеева А.В., Карташова А.А., Новиков В.Ф. Инструментальные методы анализа. Концентрирование примесей и хроматография / под ред. проф. В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. Ч. I. 300 с.
- [12] Новикова В.Ф., Каратаева Е.С., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. Молекулярно-абсорбционный контроль производственных процессов / под ред. проф. В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Ч. II. 272 с.
- [13] Новиков В.Ф. Основы газовой хроматографии: конспекты лекций. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 76 с.
- [14] Новиков В.Ф. Расчетные задания по газовой хроматографии. метод. указ. к практ. занятиям. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 23 с.

# КОНСТРУКТОР ЛИНЕЙНОЙ АРМАТУРЫ И ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Егоров А.О., Ларионова А.А., Филимошкин И.Д.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Уральский энергетический институт, Екатеринбург, Россия  
a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com, f.i.l.en@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Конструктор электроэнергетических систем предназначен для решения образовательных и инженерных задач, связанных с обеспечением качества подготовки специалистов электроэнергетической отрасли. Кроме создания нового материально-технического оснащения учебных процессов, также требуется создание новой учебно-методической литературы с применением инфографики. На основе конструктора линейной арматуры и изоляции воздушных линий электропередачи разрабатывается специализированная учебно-образовательная платформа, позволяющая эффективно освоить конструктивное выполнение и устройство воздушных линий электропередачи, а также связанный с ними терминологический аппарат. На основе платформы создаётся учебное пособие с применением инфографики и материальные прототипы линейной арматуры и изоляции из оригинальных материалов в масштабе 1/10.

**Материалы и методы:** Чертежи линейной арматуры и изоляции выполнены в программе AutoCAD. На основе чертежей выполняются инструкции по сборке гирлянд ВЛ и ошиновки в формате инфографики. В инфографике применены русский и иностранный языки, позволяющие эффективно изучить терминологический аппарат на русском и иностранном языках. Инструкции по сборке являются приложением к конструктору линейной арматуры и изоляции.

**Результаты:** Разработана и тестируется образовательная платформа, позволяющая изучить конструктивное выполнение линейной арматуры и изоляции воздушных линий электропередачи.

**Выводы:** Новая образовательная платформа предназначена для повышения эффективности процесса подготовки специалистов для электроэнергетической отрасли, призвана повысить их уровень осведомленности в части владения материальной частью электроустановок, применяемых для создания электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** Конструктор электроэнергетических систем, обратный инжиниринг, линейная арматура и изоляция, 3D принтеры и печать, инфографика, Global Insulator Group.

## THE LINE FITTINGS AND INSULATION OF OVERHEAD POWER LINES CONSTRUCTOR

A. Egorov, A. Larionova, I. Filimoshkin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russian Federation  
a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com, f.i.l.en@mail.ru

## Abstract

**Background:** The designer of electric power systems is intended to solve educational and engineering problems related to ensuring the quality of training of specialists in the electric power industry. In addition to creating new material and technical equipment for educational processes, it is also necessary to create a new teaching and methodological literature using infographics. Based on the designer of line fittings and insulation of overhead transmission lines, a specialized educational and educational platform is being developed, which makes it possible to efficiently master the design and construction of overhead transmission lines, as well as the terminology associated with them. On the basis of the platform, a tutorial with infographics and material prototypes of line fittings and isolation from original materials in a scale of 1/10 is created.

**Materials and Methods:** The drawings of line fittings and insulation are made in the AutoCAD. On the basis of the drawings, the instructions for assembling the garlands of the overhead lines and buses in the infographic format are followed. In infographics, Russian and foreign languages are used, which allow to effectively study terminological apparatus in Russian and foreign languages. Assembly instructions are an application to the designer of line fittings and insulation.

**Results:** Educational platform has been developed and tested that allows to study the constructive performance of line fittings and insulation of overhead transmission lines.

**Conclusions:** The new educational platform is designed to improve the efficiency of the process of training specialists for the electric power industry and is called upon to raise their awareness level regarding the ownership of the material part of electrical installations used to create electric power systems.

**Key words:** Designer of electric power systems, reverse engineering, line fittings and insulation, 3D printers and printing, infographics, Global Insulator Group.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Конструктор электроэнергетических систем, создан на кафедре АЭС УралЭНИН УрФУ и предназначен для освоения студентами принципов и методов конструирования и высокотехнологичного производства силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем [1–4]. На основе конструктора сегодня ведётся разработка специализированной образовательной платформы, предназначенной для эффективного освоения учащимися знаний в области конструирования, производства, сборки, эксплуатации и обслуживания элементной базы электроэнергетических систем. Также платформа предназначена для освоения узкоспециализированного терминологического аппарата на русском и иностранном языках. В образовательной платформе применяются методы статической и динамической инфографики. Инженерной основой для такой образовательной платформы и для отработки её принципов компоновки и логики выбрана линейная арматура и изоляция воздушных линий электропередачи.

На сегодняшний день проработаны все возможные виды узлов, типы компоновок и соединений для линейной арматуры и изоляции на классы напряжения 110, 220 и 500 кВ со всеми разновидностями и вариантами креплений на опорах линий электропередачи и порталах распределительных устройств подстанций.

## II. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ

Этапы выполнения полного технологического цикла обратного инжиниринга линейной арматуры и изоляции рассмотрены на примере гирлянды промежуточной опоры воздушной линии электропередачи ВЛ 500 кВ (рис. 1). Основой элементной базы взята высококачественная продукция группы компаний Global Insulator Group (GIG), г. Южноуральск, ([www.gig-group.com](http://www.gig-group.com)), в каталогах которого приведена подробная и вся необходимая исходная информация. Исследуемая и реконструируемая гирлянда ВЛ 500 кВ отмечена на рис. 1 стрелкой справа.

Для моделирования и восстановления чертежей всей гирлянды и элементной базы, формирующей её, в программе AutoCAD выполняются объёмные чертежи в масштабе 1/1 всей материальной части поэлементно. Для этого выполняется предпроектное обследование опоры ЛЭП и гирлянды ВЛ. При проведении предпроектного обследования используются лазерные дальнометры и фотоаппаратура с применением светофильтров и оптических телеобъективов с большим фокусным расстоянием [1, 5]. Применение последней продиктовано необходимостью доступа к высококачественным визуальным образам объекта, находящегося под напряжением и на значительном удалении, не нарушая правил техники безопасности и охраны труда. Пример фотосъёмки, проводимых при предпроектном обследовании приведён на рис. 2.

Для перспективного получения высококачественных чертежей исследуемой и конструируемой гирлянды изоляторов выполняются панорамная и точечная фотосъёмка с разных ракурсов, с разными фокусными расстояниями и с разной диафрагмой снимка. Комбинация всех снимков после обработки массива фотографий на основе метода простого визуального сравнения, позволяет далее перейти к подбору замещающей элементной базы на основе заводских каталогов GIG.



Рис. 1 – Промежуточная опора ВЛ 500 кВ с исследуемой и конструируемой гирляндой изоляторов



Рис. 2 – Подвесная гирлянда фазы ВЛ 500 кВ с разных ракурсов

Пример отображения информации, которую приводит завод-изготовитель в каталогах GIG, показан на рис. 3. Приведён фотоснимок элемента, его обозначение, габаритные размеры, а также приведён габаритный чертёж с показом сечения элемента по сложным поверхностям.

Информация, полученная при фотосъёмке, необходима для компоновки сложного изделия. Также с помощью лазерных дальнометров на месте при предпроектном обследовании производятся измерения всех габаритных размеров. На основе фотографий происходит поиск подходящего элемента в заводском каталоге. В свою очередь, после выбора соответствующего элемента, его чертежи выполняются на основе информации, указанной в заводском каталоге GIG. В случае наличия паспорта на линию электропередачи задача поиска артикула или конечного изделия с указанием завода изготовителя существенно облегчается, так как в паспортах ВЛ всегда чётко указана вся элементная база, которая применяется для сборки изоляции линии электропередачи.

Пример реконструированного чертежа, выполненного на основе исходной информации, приведён на рис. 4.

Модель элемента арматуры выполняется обязательно в цвете и с сечениями вполюину и вчетверть для того, чтобы показать внутреннее устройство элемента под любым ракурсом – в плоскости и в объёмной проекции. Крайне важной необходимостью такого отображения является сочленение сложных геометрических поверхностей, поэтому в модели прорабатывается сразу внутреннее наполнение, указывающее на неоднородность материалов, из которых изготовлен тот или иной элемент арматуры линий электропередачи. На примере чертежа изолятора (рис. 4), легко можно увидеть, что типовой изолятор П-70 состоит





Рис. 3 – Пример оформления данных по изоляции и линейной арматуре в каталоге производителя Global Insulator Group (г. Южноуральск)



Рис. 4 – Восстановленные чертежи изолятора П-70 с разрезом и внутренним наполнением

из 4 частей (изолятор, гвоздь, шапка и жёсткая заделка из цемента между ними). Шестым элементом является соединительная клипса, используемая при сборке гирлянды из серии последовательно собранных изоляторов и блокирующая выпадение гвоздя одного изолятора из шапки другого изолятора. Аналогичным образом выполнен подбор всех остальных элементов, необходимых для сборки гирлянды ВЛ. Пример такого состава элементной базы, чертежи которой восстановлены методом обратного инжиниринга, для гирлянды ошиновки портала 110 кВ, приведен на рис. 5.

Таким же образом восстановлены объёмные чертежи гирлянды с промежуточной опоры ВЛ 500 кВ, изображённой на рис. 1 и 2 (рис. 6).

Важной особенностью линейной арматуры и изоляции является её универсальность, взаимозаменяемость и ремонтпригодность. Так, разные элементы разных заводоизготовителей (производителей линейной арматуры и изоляции) позволяют совмещать в различных комплектах и вариантах любые решения для воздушных линий электропередачи. Это позволяет при наличии элементной



Рис. 5 – Элементная база линейной арматуры и изоляции. Пример гирлянды ошиновки с портала ОРУ 110 кВ, выполненной на основе арматуры GIG с проводом АС-240: 1 – серьги типа СРС-7-16; 2 – изолятор стеклянный линейный подвесной тарельчатый П-70; 3 – скобы типов СК-7-1А; 4 – зажимы натяжные прессуемые типа НАС-330-1Б; 5 – узел крепления КГП-7-3; 6 – ушко однолапчатое типа У1К-7-16; 7 – звенья промежуточные трехлапчатые типа ПРТ-7/12-2

собранной базы без затруднений получить любые принципиальные решения и варианты простых и сложных сборок для промежуточных, анкерных или любых других исполнений подвеса проводов воздушных линий электропередачи или ошиновки распределительных устройств подстанций, подвешенных на порталах (рис. 7).

За время выполнения работ в направлении восстановления объёмных чертежей линейной арматуры и изоляции, 3D Лаборатория УралЭНИН УрФУ накопила массивы данных на все варианты выполнения гирлянд 500, 220 и 110 кВ. Всего в составе имеющейся в настоящее время выборки 4 гирлянды 500 кВ, 6 видов гирлянд 220 кВ и 8 вариантов гирлянд на 110 кВ. Аналогичная работа в настоящее время ведётся в отношении линейной арматуры и изоляции для классов напряжения 35, 330 и 750 кВ.

Все объёмные чертежи выполняются на основе реальных и характерных вариантов выполнения линейной арматуры и изоляции в масштабе 1/1, поэтому на основе чертежей достаточно легко выполнять геометрические измерения любых плоских и объёмных размеров, необходимых для дальнейшего их материального воспроизводства, например



Рис. 6 – Восстановленная 3D модель линейной гирлянды ВЛ 500 кВ, устанавливаемой на промежуточных опорах 500 кВ

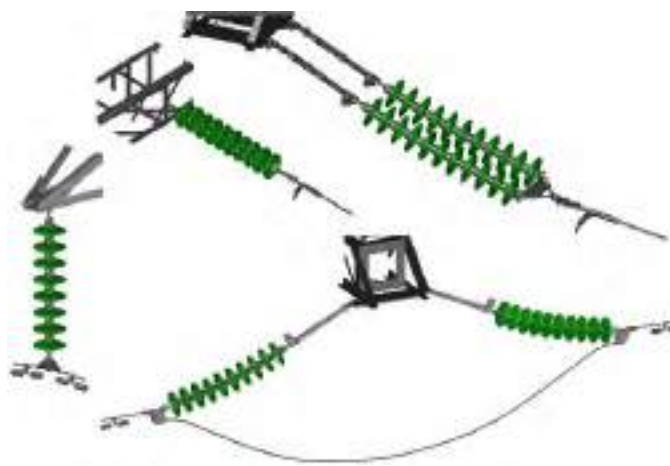


Рис. 7 – Варианты гирлянд ВЛ 110 кВ и ошиновки ОРУ 110 кВ

в уменьшенном масштабе. Также, весь массив объёмных чертежей и выполненных на их основе проекций позволяет создать дополнительные приложения, позволяющие оценить габаритные соотношения, конструктивные отличия и особенности выполнения линейной арматуры и изоляции на тот или иной класс напряжения. Пример такого формата приведён на рис. 8 для классов 110, 220 и 500 кВ соответственно.

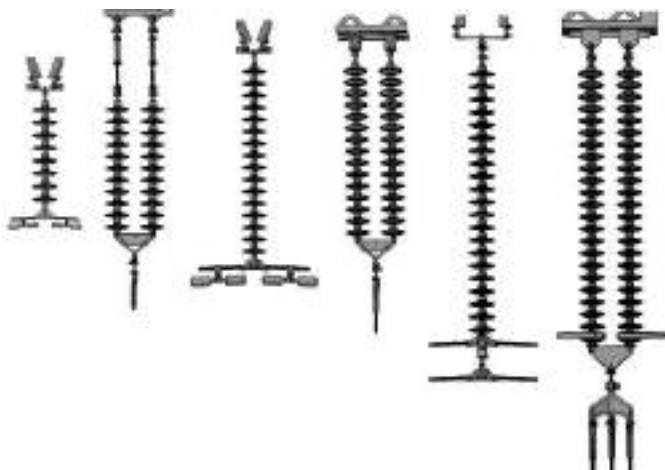


Рис. 8 – Соотношение габаритов гирлянд ВЛ линейной и ошиновки (слева направо: гирлянды ВЛ 110, 220 и 500 кВ и ошиновки, соответственно (инфографика))

Выполненные в одном масштабе чертежи линейной арматуры и изоляции на все имеющиеся в Российской электроэнергетике классы напряжения будут внесены в создаваемую образовательную энциклопедию для школьников, студентов и работников энергокомпаний. В рамках строительства учебной ПС 110/10 кВ эти данные также необходимы для строительства учебной подстанции, необходимой для ведения образовательной деятельности для всей электроэнергетики [1–7].

### III. РЕЗУЛЬТАТ

В настоящее время в рамках работ, выполняемой 3D лабораторией УралЭНИН УрФУ по созданию конструктора линейной арматуры и изоляции, выполнены все разновидности гирлянд для ВЛ и ошиновки на классы напряжения 110, 220 и 500 кВ. Проводятся изыскания и готовятся к выполнению работы по линейной арматуре и изоляции для классов напряжения 35 кВ, 330 кВ и 750 кВ. Отработан стандарт выполнения чертежей элементной базы арматуры и изоляции. Отработан пилотный формат инфографики по системе конструирования и сборки изоляции ВЛ.

### IV. ПРОБЛЕМЫ

Временными затруднениями при производстве изысканий и выполнении объёмных чертежей является отсутствие на территории энергосистемы Урала линий электропередачи на классы напряжения 330 и 750 кВ. Данное обстоятельство

приводит к небольшим затягиваниям в сроках выполнения работ. Также 3D лабораторией ведутся работы по поиску технологий воспроизводства материальных моделей линейной арматуры и изоляции из оригинальных материалов, где необходим подбор специальных сортов керамики, стекла, сталей и их сплавов и т. д. Предварительные работы и 3D печать на принтерах показали их перспективность [2, 6, 7].

Следует также иметь в виду, что конструктор элементной базы, из которой можно собрать гирлянду ВЛ на любой класс напряжения, не заменяет настоящей линейной арматуры и изоляции. Всегда для объективности и адекватности образовательного процесса, требуется иметь настоящую (оригинальную) линейную арматуру и изоляцию. Даже если материальный конструктор сделан из оригинальных материалов, его чертежи, инструкция по сборке и плакаты инфографики всегда являются дополнительным образовательным инструментом и ни в коем случае не отменяют необходимость проведения учебной работы с настоящей линейной арматурой и изоляцией, в том числе находящейся под напряжением в лабораторных или эксплуатационных условиях.

### V. ПЕРСПЕКТИВЫ

Дальнейшее развитие конструктора линейной арматуры и изоляции связано с несколькими направлениями. Первое – это выполнение чертежей на классы напряжения 35, 330 и 750 кВ. Также планируется восстановить объёмные чертежи ВЛ 1150 кВ. Второе направление развития связано с созданием учебного пособия – энциклопедии и учебных плакатов в формате инфографики с обозначением всех элементов на русском и иностранном языках. Третьим направлением развития конструктора является его материальное воспроизводство в масштабе 1/10 из оригинальных материалов, керамики, металлов и сплавов [7].

### Список литературы

- [1] Егоров А.О., Ларионова А.А. Учебная понижающая подстанция 110 кВ в масштабе 1:10 // *Электроэнергетика глазами молодежи* – 2017: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017.
- [2] Возисова О.С., Кузнецов К.А., Зонов И.С. Конструктор электроэнергетических систем // *Электроэнергетика глазами молодежи* – 2015: сб. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2015. Т. 2. С. 488–491.
- [3] Возисова О.С. и др. Конструктор автотрансформатора 220/110 кВ 250 МВА // *ICAEEES 2014: расш. матер. исслед. 2-й Междунар. конф. по достижениям в области энергетики, окружающей среды и науки. Гуанчжоу, 2014. С. 1008–1009; С. 1162–1165.*
- [4] Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Жадобкина В.В. Современные системы 3D сканирования // *Молодой ученый*. 2014. № 20(79). С. 167–171.
- [5] Ивашкова К.П., Филиппов А.Н., Копасов Е.А. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 5. С. 426–430.
- [6] Evans B. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*. N.Y.: Apress Publisher, 2012. 332 p.

# КОНСТРУКТОР ЭЛЕГАЗОВОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВЭБ-110 (УЭТМ) В МАСШТАБЕ 1/10

Егоров А.О., Ларионова А.А.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Конструктор электроэнергетических систем реализуется в 3D лаборатории УралЭНИН УрФУ, г. Екатеринбург с 2013 г. Конструктор бакового элегазового выключателя ВЭБ-110, производства АО «Урал-электротяжмаш» (www.uetm.ru), выполнен в масштабе 1/10 и является частью учебной подстанции, реализованной по блочной схеме ОРУ. Рабочие чертежи внешних геометрических поверхностей выключателя восстановлены методами обратного инжиниринга. На основе рабочих чертежей выполнена габаритная модель выключателя, предназначенная для печати на 3D принтерах. Габаритная модель выключателя предназначена для создания рабочего прототипа из оригинальных материалов с применением сплавов из цветных металлов, керамики и полимеров. Выключатель также является частью комплекта элементной базы конструктора силового оборудования электроэнергетических систем, позволяющего моделировать реальные процессы в электроэнергетических системах.

**Материалы и методы:** Для восстановления чертежей методом обратного инжиниринга использованы фотографии и габаритные чертежи завода-изготовителя. Также использованы эластичные линейки, цифровые штангенциркули и лазерные дальнометры. Модель выключателя выполнена в ПК AutoCAD. Детали выключателя нарезаны по слоям в слайсере и далее напечатаны по технологии DLP. По итогам печати собрана габаритная модель выключателя.

**Результаты:** Создана габаритная модель выключателя ВЭБ-110 в масштабе 1/10, позволяющая перейти к созданию рабочего прототипа из оригинальных материалов с применением технологий энергетического машиностроения.

**Выводы:** Созданная модель выключателя является частью учебной подстанции 110/10 кВ в масштабе 1:10 и позволяет в плановом режиме продолжить создание элементной базы конструктора электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** конструктор электроэнергетических систем, выключатель ВЭБ-110, обратный инжиниринг, 3D-принтеры и печать.

## VEB-110 (UETM) SF6 CIRCUIT-BREAKER CONSTRUCTOR IN 1/10<sup>th</sup> SCALE

A. Egorov, A. Larionova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia  
a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com

## Abstract

**Background:** The designer of electrical power systems is being implemented in the 3D laboratory of Ural Federal University in Yekaterinburg since 2013 year. Constructor of dead tank SF6 circuit-breaker VEB-110, is made in 1/10<sup>th</sup> scale and is part of the training substation made according to the block diagram of the outdoor switchgear. Working drawings of the external geometric surfaces of the circuit-breaker are restored by reverse engineering methods. On the basis of working drawings made the overall model of the circuit-breaker, designed for printing on 3D printers. The overall model of the circuit-breaker is designed to create a working prototype of the original materials using non-ferrous metals, ceramics and polymers. The circuit-breaker is also part of the component base of the power equipment designer of electric power systems, which makes it possible to model real processes in electric power systems.

**Materials and Methods:** Photographs and dimensional drawings of the manufacturer are used to restore the drawings by reverse engineering. Elastic rulers, digital calipers and laser range finders are also used. The circuit-breaker model is made in AutoCAD. Circuit breaker parts are cut in layers in the slicer and then printed using DLP technology. As a result of printing assembled overall model of the circuit breaker.

**Results:** The overall model of the circuit-breaker VEB-110 in 1/10<sup>th</sup> scale has been created which makes it possible to proceed to the creation of a working prototype from original materials using energy engineering technologies.

**Conclusions:** The created circuit-breaker model is a part of the 110/10 kV training substation in 1:10<sup>th</sup> scale and allows to continue the creation of the element base of the designer of electric power systems in the planned mode.

**Key words:** Power systems equipment constructor, circuit-breaker VEB-110, reverse engineering, 3D-printers and printing.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Основная цель создания конструктора электроэнергетических систем состоит в повышении качества обучения студентов посредством улучшения материально-технического и информационного оснащения образовательных процессов и создания новых видов лабораторных и практических занятий на основе типовых и нетиповых решений и ситуаций в электроэнергетике. Такой способ обучения подразумевает создание и использование моделей силового оборудования и энергообъектов на их основе из оригинальных материалов при изучении различных профильных дисциплин (электромеханика, электрические аппараты, оборудование ЭЭС, ЭЧС, системы АСДУ и пр.). В настоящее время 3D лабораторией УралЭНИН УрФУ ведутся работы по созданию учебной ПС 110/10 кВ [1,2]. Одним из важных элементов учебной подстанции является баковый элегазовый выключатель ВЭБ-110 кВ производства АО «Уралэлектротяжмаш» ([www.uetm.ru](http://www.uetm.ru)), г. Екатеринбург. Данный выключатель является современным конкурентно-способным отечественным продуктом, выпускается заводом-изготовителем большими партиями и установлен на мно-жестве подстанций и электростанций ЭЭС России. Поэтому командой 3D лаборатории было принято решение использовать его в качестве основного для дальнейших работ и выполнить на его основе рабочий прототип.

## II. Цели и задачи

В качестве основного объекта исследования, для воспроизводства чертежей методом обратного инжиниринга был выбран ВЭБ-110, установленный на открытом распределительном устройстве одной из подстанций электросетевой компании, функционирующей в составе энергосистемы Свердловской области (рис. 1).

Заводом-изготовителем выпускаются различные модификации выключателя ВЭБ-110, имеющие различные внешние признаки и отличия. Как правило, отличия модификаций связаны с различным климатическим исполнением, выполнением вводов с керамическими или полимерными изоляторами, различными по диаметру и количеству встроенными трансформаторами тока, различными опорными рамами дугогасительных камер, шкафами вторичных цепей, клеммами аппаратных зажимов и т. д. Модификация выключателя, представленная на рис. 1 и взятая за основу, имеет габаритные чертежи, имеющиеся в каталоге завода-изготовителя с указанием основных видов (проекций) и габаритных размеров (рис. 2).



Рис. 1 – Фото оригинального выключателя ВЭБ-110 (УЭТМ), установленного на ОРУ-110 кВ подстанции

Оригинал выключателя, установленный на подстанции, и каталог завода-изготовителя являются основными источниками информации на подготовительном этапе при прохождении процедуры обратного инжиниринга. В габаритных чертежах завода-изготовителя хоть и присутствуют конструктивные изменения, предусмотренные модификацией, но они не оказывают существенного влияния на ход выполнения процедуры обратного инжиниринга. Габаритные размеры используются также как средство проверки правильности выполнения конечных чертежей выключателя по методу наложения.

## III. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ

Процедура обратного инжиниринга, начиная с постановки задачи и выхода первого прототипа, обычно включает пять основных этапов:

1. Сбор исходных данных.
2. Геометрические изыскания.
3. Выполнение модели и рабочих чертежей.
4. Контроль правильности выполнения.
5. Изготовление прототипа.

На 1-м этапе производится визуальное изучение оригинального изделия, фотографий (рис. 1) и видеоматериалов процессов производства, сборки и монтажа изделия, а также ознакомление с информацией, предоставляемой заводом-изготовителем и поставщиком оборудования (рис. 2). Обычно это заводские каталоги и инструкции по эксплуатации.

На 2-м этапе (геометрические изыскания) производится процедура снятия геометрических размеров с отдельных деталей, частей, узлов, соединений и поверхностей. Поскольку процедура представляет опасность с точки зрения нарушения правил техники безопасности в электроустановках, то она возможна только в заводских условиях либо на оборудовании, выведенном в ремонт, либо на списанном оборудовании, либо в любом другом случае, когда оборудование выведено из работы и не находится под напряжением. Для снятия геометрических размеров используются измерительные инструменты: стальные и полимерные линейки, рулетки, цифровые штангенциркули, лазерные дальномеры. Для снятия геометрии сложных поверхностей используются 3D-сканеры [5]. Пример таких изысканий показан на рис. 3.

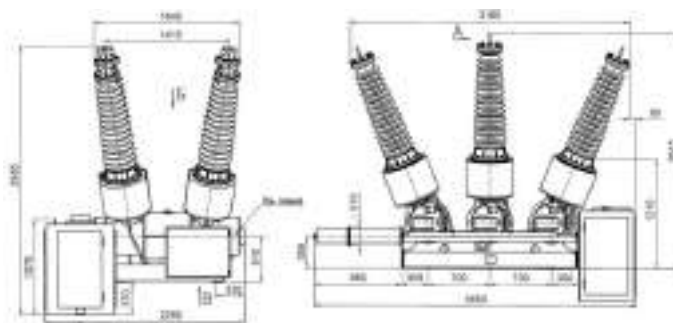


Рис. 2 – Фрагмент габаритных чертежей выключателя ВЭБ-110 в каталоге на сайте завода-изготовителя



Рис. 3 – Пример процедуры снятия размеров и параметров внешних геометрических поверхностей выключателя ВЭБ-110

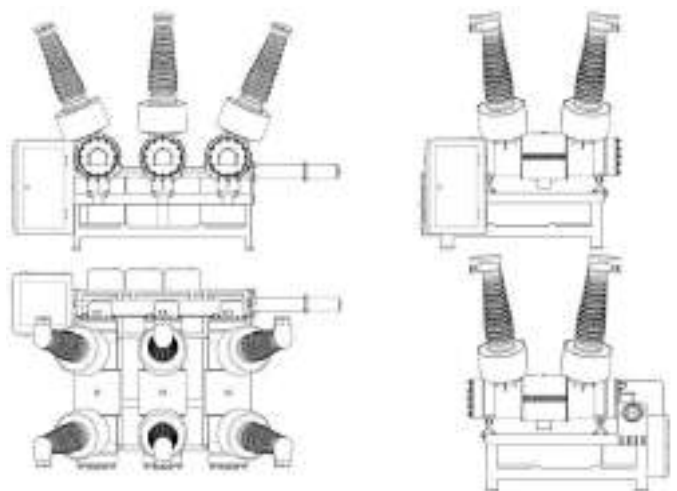


Рис. 4 – Проекция восстановленной модели выключателя ВЭБ-110

На фотографиях, приведённых на рис. 3 показаны работы по снятию отдельных размеров с дугогасительной камеры и её обогрева, клапана герметизации, крышки камеры и позиционирования манометра (датчика плотности элегаза), а также пружины привода. Во всех случаях инструменты разные, работы производились на выключателе при проведении пусконаладочных работ, после его установки на фундамент, но до постановки выключателя под напряжение и до ввода его в работу. После проведения 2-го этапа у инженеров есть вся необходимая информация, все размеры и все сведения об электротехнических материалах, необходимые для восстановления чертежей исследуемого объекта [3].

При переходе к этапу 3 (выполнение чертежей) выполняется процедура восстановления сборочных чертежей исследуемого объекта. Выполняются все отдельные узлы и элементы выключателя. В частности, выполняется виртуальная декомпозиция элементов выключателя с разбиением на раму, шкафы привода и вторичных цепей, дугогасительную камеру, обогрев, крышки, вводы, бушинги, клеммы, пружины и штанги привода и т.д. Указанные узлы формируют габаритную мастер-модель выключателя, поверх которой размещаются его вторичные элементы: манометры козырьки, фланцы, клапаны герметизации, защитные мембраны болты, гайки и шпильки крепежа и пр.

Модель выключателя ВЭБ-110 выполняется в AutoCAD, с полным воспроизведением его внешней геометрии. Одновременно в выключатель закладывается геометрический ресурс для его перспективного наполнения внутренними элементами, для воспроизводства его полного внутреннего устройства. Для изготовления мастер-модели выключателя и обеспечения возможности выполнения его конструктивных элементов из оригинальных материалов в чертежи закладываются соответствующие толщины стенок поверхности и их поддержки. Пример чертежей и проекций выключателя ВЭБ-110, выполненных методом обратного инжиниринга, показан на рис. 4 (вид спереди, слева справа и сверху).

На рис. 5 представлена объёмная проекция модели выключателя (вид сверху-справа-сзади). Одновременно с проектированием компьютерной CAD-модели производится уточнение способов её декомпозиции.

Декомпозиция должна отвечать требованиям унификации, наличия минимума поддержки, простоты сборки и возможности перехода с пластмасс DLP на цветные металлы и стали, применяемые в машиностроении. Доведение компьютерной CAD-модели до виртуального прототипа, выполняется для её дальнейшей печати на 3D принтере. Вновь производится её декомпозиция, детали выключателя позиционируются в матрице, выполняется их нарезка и материальная печать. После выполнения печати всех деталей осуществляется их механическая обработка, удаление рафта (постобработка), выполняется промывка деталей, их сушка и сборка. Собранная габаритная мастер-модель выключателя, выполненная в масштабе 1/10, приведена на рис. 6. Выполненная модель отвечает всем требованиям [1].

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполненная модель выключателя ВЭБ-110 является частью комплекта элементной базы конструктора силового оборудования электроэнергетических систем, который создается для образовательных и инжиниринговых целей. Ранее командой 3D лаборатории УралЭНИН УрФУ было принято решение о выполнении рабочего оборудования из оригинальных материалов в масштабе 1/10 [1, 4]. Поэтому модель бакового элегазового выключателя ВЭБ-110 является частью прототипа учебной понижающей подстанции 110/10 кВ, которая также выполняется в масштабе 1/10 по блочной схеме (ориентировочные размеры технологической площадки подстанции, включая ЗРУ, составят до 1600×5200 мм). Габаритные размеры выключателя в масштабе 1/10 приведены в таблице.

ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВЭБ-110 (УЭТМ)

Параметр, мм	1/1	1/10
Высота	2985	299
Ширина	3650	365
Глубина	2260	226
Расстояние между клеммами	1410	141
Высота ввода	1915	192
Длина дугогасительной камеры	1600	160
Диаметр дугогасительной камеры	440	44



Рис. 5 – Восстановленная методом обратного инжиниринга САД-модель выключателя ВЭБ-110



Рис. 6 – Напечатанная и собранная модель выключателя ВЭБ-110 в масштабе 1/10 (высота 130 мм, ширина 250 мм)

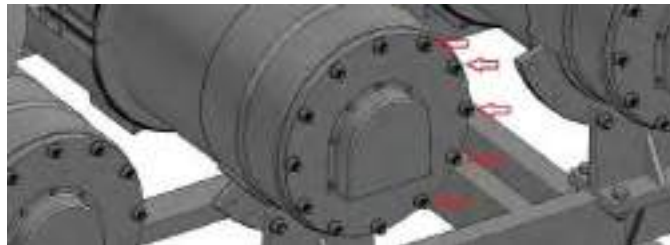


Рис. 7 – Крепёж на крышках дугогасительных камер

В настоящее время для завершения проекта прототипа учебной подстанции и для дальнейшего перехода к производству прототипов оборудования из оригинальных материалов ведутся работы по печати и сборке силового трансформатора, шинного моста, линейной арматуры и изоляции гибкой и жёсткой ошиновки. Выполняются чертежи строительных блоков и металлоконструкций, ограничителей перенапряжений, разъединителей, конденсаторов связи и других элементов распределительного устройства 110 кВ подстанции.

Что касается развития прототипа выключателя ВЭБ-110, то после изготовления габаритной модели из пластмасс, подбора основного крепежа и металлосортамента дальнейшими этапами его развития будет изготовление металлического прототипа из оригинальных материалов и сплавов в чётком соответствии с технологиями энергетического машиностроения. Для выключателя ВЭБ -110 в масштабе 1/10 подходят болтовой крепёж, применяемый в часовых механизмах. Например, для выключателя в оригинальном размере 1/1, для фиксации передней и задней крышек дугогасительной камеры с защитной мембраной используются болты и шпильки типоразмера М14 (т. е. диаметр 14 мм, рис. 7).

В масштабе 1/10 этот же крепёж будет переведён как М1,4, с габаритными размерами гаек и головок болтов 2,56 мм, что вполне достаточно для удобной работы.

После изготовления первого металлического прототипа будут проводиться работы по его подготовке к серийному производству. Основными технологиями, которые прорабатываются для этих целей, являются токарные и фрезерные

работы на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), лазерная резка и сварка, химическое фототравление и работы на электроэрозионных станках с ЧПУ. Также рассматривается вопрос о перспективном применении технологий 3D печати металлами и расширении области применения наукоёмких и высоких технологий для производства элементной базы конструктора электроэнергетических систем [6, 7].

### Список литературы

- [1] Егоров А.О., Ларионова А.А. Учебная понижающая подстанция 110 кВ в масштабе 1/10 // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017.
- [2] Возисова О.С. и др. Конструктор электроэнергетических систем // ICAEES – 2014: расш. матер. исслед. 2-й Междунар. конф. по достижениям в области энергетики, окружающей среды и науки. Гуанчжоу, 2014. С. 1008–1009; С. 1166–1170.
- [3] Кузнецов К.А., Фирсова Д.А., Возисова О.С., Зонов И.С. Конструктор электроэнергетических систем. Линейная прогрессия трансформатора тока ТРГ-110 кВ // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2015. Т. 2. С. 492–495.
- [4] Возисова О., Егоров А., Трёмбач А. Электроэнергетические системы. Siemens 3API DT 145kV автоматический выключатель прикладной механики и материалы // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 699–703.
- [5] Прямыцын И.Б., Челпанов И.Б., Аржанухина С.П. Настольные лазерные сканеры: новые области применения и точностные характеристики // Наукоедение. 2012. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru>.
- [6] Thornburg D. The 3D Printing Revolution in Education // ESchool News white paper. 2016. Vol. 2. № 3. P. 3–6.
- [7] 3D Printing in Education: Where Are We Now and What Does the Future Hold? URL: <http://www.officexpress.co.uk/3d-printing-in-education-where-are-we-now-and-what-does-the-future-hold/>

# ОБНОВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЭС»

Сидоров А.В., Молчагина К.Д.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
Иваново, Россия  
alexandriksid@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В условиях современного развития информационных технологий и компьютерной техники основное внимание в сфере образования приковано именно к компьютерному моделированию. Однако, только физическое моделирование может в полной мере отразить все процессы, протекающие в реальном оборудовании и объяснить природу их возникновения. Использование современных средств физического моделирования и вычислительных средств обычного персонального компьютера позволяет не только оцифровывать в реальном времени получаемые с модели аналоговые значения, но также одновременно производить вычисления и визуализацию полученной информации. В качестве обновляемых были выбраны стенды для выполнения лабораторных работ по курсу «Электромеханические переходные процессы в ЭЭС».

**Материалы и методы:** В качестве физической модели использованы учебные комплекты, созданные ИПЦ «Учебная техника», реализующие обмен данных с компьютером через плату PCI-6024E. Программное обеспечение разработано с помощью языка программирования Microsoft .NET C#.

**Результаты:** Разработаны схема соединений физической модели и программа для безопасного взаимодействия с ней и автоматического управления ходом проведения экспериментов.

**Выводы:** Разработанная программа и модели могут использоваться студентами при выполнении лабораторных работ по курсу «Электромеханические переходные процессы в ЭЭС».

**Ключевые слова:** программное обеспечение, физическая модель, электромеханические переходные процессы, электромагнитные переходные процессы, статическая устойчивость.

## UPDATE OF THE TECHNICAL COMPLEX FOR EXECUTION OF LABORATORY WORKS ON “POWER-FREQUENCY TRANSIENTS IN EPS” COURSE

A. Sidorov, K. Molchagina

Ivanovo State Power Engineering University,  
Ivanovo, Russian Federation  
alexandriksid@gmail.com

## Abstract

**Background:** In the context of modern information and computer technologies, the special attention is given to the computer simulations. However, physical modelling is the only one that may completely depict all the processes from real machines and explain their physical origin. Combined applying of physical modelling and performance of a usual personal computer lets not only digitalize the received analog values in real time mode, but also perform computation and visualization of the information. Laboratory benches for implementations the laboratory researches on “Power-frequency transients in EPS” course was chosen for the upgrade.

**Materials and methods:** The education sets produced by manufacturing engineering centre GalSen<sup>®</sup> were used as the physical model. These sets realize the data exchange with the PC by the board NI PCI-6024e. The software was developed using the Microsoft. NET C# programming language.

**Results:** The connection scheme and the software for the control of the performance of the experiment and interacting with the scheme were developed.

**Conclusions:** The developed software and models may be used by the students during the laboratory classes on “Power-frequency transients in EPS” course performance.

**Key words:** software, physical model, power-frequency transients, electromagnetic transients, system steady state.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Физическое моделирование в образовательном процессе студентов технических специальностей является наиболее предпочтительным в связи с высокой степенью наглядности иллюстрируемых процессов и явлений. Использование современных цифровых технологий в совокупности с объектными моделями значительно упрощает отображение информации; позволяет сделать проведение лабораторных работ и экспериментов максимально безопасным как для студентов, так и для оборудования.

## II. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Лабораторный стенд был собран из блоков, предоставляемых ИПЦ «Учебная Техника». Принципиальная схема исследуемой ЭЭС представлена на рис. 1.

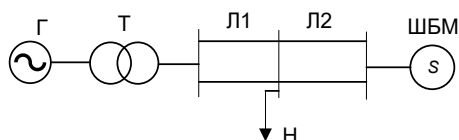


Рис. 1 – Принципиальная схема исследуемой ЭЭС

В качестве первичного энергоносителя используется двигатель постоянного тока с регулируемым возбуждением, питающийся от сети. Через маховик, служащий для придания дополнительного момента инерции, подключена машина переменного тока. С помощью преобразователя угловых перемещений происходит передача параметров генератора (частота вращения, угловое положение) на плату. Выдаваемая с шин мощность через последовательность блоков передается в шины бесконечной мощности, роль которых играет питающая здание сеть.

Блок трансформатора снабжен возможностью изменения коэффициента трансформации. Параметры линий электропередач (активное и индуктивное сопротивление, емкостная проводимость) и нагрузок (активной и индуктивной) также изменяются механически на соответствующих блоках.

## III. ПОЛУЧЕНИЕ СИГНАЛОВ

Взаимодействие физической модели с компьютером осуществляется с помощью платы PCI-6024E. Она поддерживает одновременную работу до 8 аналоговых входов, 2 аналоговых выходов и 8 цифровых входов/выходов [1].

Некоторые блоки (например, вольтамперметр) поддерживают передачу аналогового сигнала в рабочем диапазоне платы. Для измерения токов и напряжений в схеме ЭЭС необходимо прибегать к помощи блоков измерительных трансформаторов токов и напряжений.

Доступ к входам/выходам управления и измерения функциональных блоков (возбудитель, синхроскоп и т.п.) осуществляется с помощью блока терминала.

Распиновки аналоговых выходов, цифровых каналов и аналоговых входов приведены в табл. I–III соответственно.

Таблица I. РАСПИНОВКА АНАЛОГОВЫХ ВЫХОДОВ

№ выхода	Объект управления
A0	Возбудитель синхронной машины (СМ)
A1	Источник питания двигателя постоянного тока (ДПТ)

Таблица II. РАСПИНОВКА ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ

№ выхода	Объект управления
DO1	Трехполюсный выключатель синхроскопа
DO3	Выключатель в цепях источника питания ДПТ
DO4	Выключатель в цепях возбудителя СМ

Таблица III. РАСПИНОВКА АНАЛОГОВЫХ ВХОДОВ

№ входа	Объект измерения
A0–A8	Линейное напряжение генератора на шинах синхроскопа
A1–A9	Линейное напряжение сети на шинах синхроскопа
A2–A10	Напряжение в цепях источника питания ДПТ
A3–A11	Фазная активная мощность генератора
A4–A12	Угол нагрузки генератора
A5–A13	Частота вращения генератора
A6–A14	Напряжение в цепях возбудителя СМ

Аналоговые входы служат для измерения и дальнейшей оцифровки аналоговых значений; аналоговые выходы – для отправки на блоки амплитудно моделированных сигналов; цифровые – для управления выключателями.

## IV. ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И АЛГОРИТМЫ

Для устойчивого и достоверного измерения и управления необходимо создание четких и надежных алгоритмов, оцифровывающих полученные значения с заданной дискретностью и своевременно отправляющих управляющие сигналы.

Несмотря на разделение входных и выходных цепей функциональных блоков, при работе стенда наблюдаются значительные наводки и шумы, вызывающие большие погрешности при измерениях и нарушающие процесс регулирования. Например, при работе генератора на числе оборотов, близкому к номинальному, указатель частоты вращения дает погрешность порядка 20 %, что является неприемлемым в прецизионных задачах регулирования. Однако, на более низких оборотах информация, получаемая с измерительного трансформатора напряжения (вход A0–A8) не соответствует действительности из-за наводок напряжения.

Таким образом, основной задачей при разработке алгоритмов управления являлась грамотная комбинация различных измерительных приборов для достижения наиболее точного результата.

При разработке программного обеспечения было необходимо смоделировать различные виды устройств автоматизации: регулирования возбуждения и скорости вращения турбины. Ключевым условием являлась возможность влиять на процесс регулирования в любой момент времени.

Для программной реализации был выбран пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор, структурная схема которого представлена на рис. 2:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (1)$$



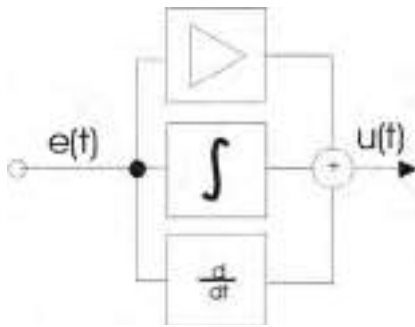


Рис. 2 – Структурная схема ПИД-регулятора

Здесь  $u(t)$  – значение выходного сигнала в момент времени  $t$ ;  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты по пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей, соответственно;  $e(t)$  – значение ошибки регулирования в момент времени  $t$ :

$$e(t) = X(t) - X_0, \quad (2)$$

где  $X(t)$  – значение регулируемой величины в момент времени  $t$ ;  $X_0$  – уставка регулируемой величины.

Реализация классического регулятора требует слишком больших вычислительных ресурсов, поэтому при разработке программного обеспечения была реализована рекуррентная формула, требующая хранения в памяти значений только трех последних измерений:

$$U(n) = U(n-1) + K_0(E(n) - E(n-1)) + K_1 E(n) + K_2(E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)), \quad (3)$$

где  $U$  – значение выходного сигнала на момент измерения  $n$ ;  $K_0, K_1, K_2$  – коэффициенты в дискретной форме по пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей соответственно;  $E(n)$  – ошибка регулирования на момент измерения  $n$ .

Удобство подобного подхода заключается в том, что уставка регулируемой величины может изменяться в зависимости от выполняемого эксперимента. Например, в опыте холостого хода ключевым фактором является поддержание числа оборотов турбины на номинальном уровне, а при автоматической синхронизации необходимо плавно регулировать ее так, чтобы добиться минимального сдвига фаз между векторами напряжений генератора и ЭЭС. Также появляется возможность в любой момент изменить уставку автоматического регулятора возбуждения (АРВ) с целью поддержания необходимого напряжения на шинах генератора или коэффициенты регулирования АРВ для нарушения или, напротив, обеспечения устойчивого процесса регулирования.

## V. РАЗРАБОТАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программный комплекс, необходимый для проведения лабораторной работы, был написан на современном языке программирования C#. Процесс разработки был значительно упрощен благодаря использованию расширения Measurement Studio от компании National Instruments.

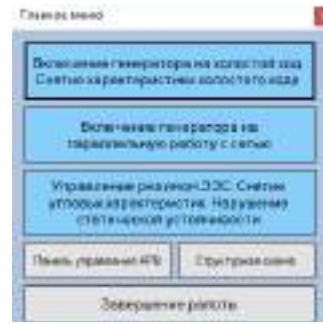


Рис. 3 – Главное меню программы

Данный набор драйверов и утилит не только позволяет осуществлять высокоуровневую обработку сигналов (включая фильтрацию, синтез и выполнение некоторых математических операций), но также дает возможность создать симуляцию реальной платы, что делает доступ к стенду необходимым только в момент отладки кода [2]. Главное меню программы представлено на рис. 3.

Каждая из трех верхних кнопок соответствует определенному эксперименту. Кнопки «Панель управления АРВ» и «Структурная схема» отображают вспомогательные окна, необходимые для управления и слежения за процессом регулирования.

Первый эксперимент позволяет вручную (здесь и далее под ручным управлением подразумевается возможность принудительно задавать любые значения управляемых величин с ПК, имитируя работу физических потенциометров на стендах) управлять током возбуждения генератора и напряжением в цепях источника питания ДПТ для изменения напряжения на шинах генератора и скорости вращения турбины. Также имеется возможность задавать различные уставки регуляторов. По завершению исследования режима холостого хода в автоматическом режиме снимается характеристика холостого хода. Во время ее снятия изменяется ток возбуждения генератора от нуля до номинального при постоянной скорости вращения турбины. Снятая характеристика холостого хода приведена на рис. 4.

Второй эксперимент посвящен процессу точной синхронизации генератора с сетью. Возможно выполнение как в ручном, так и в автоматическом режиме. Особого внимания заслуживает алгоритм, используемый при точной синхронизации [3]. Из дискретной выборки значений производится вычисление фазовых углов каждой из двух синусоид с целью обеспечения минимального скольжения, и, как следствие, минимальных бросков тока.

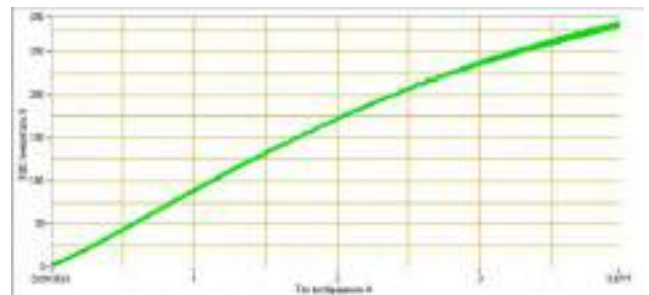


Рис. 4 – Характеристика холостого хода

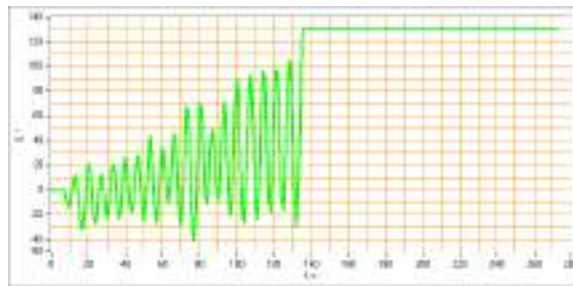
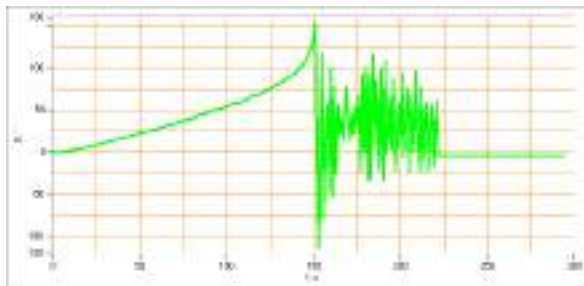


Рис. 5 – Иллюстрация нарушения устойчивости (апериодического характера сверху, колебательного – снизу)

Последний из выполняемых в программе экспериментов позволяет снимать угловую характеристику генератора при различных значениях уставки и коэффициентов АРВ. В автоматическом режиме происходит загрузка генератора по активной мощности. При этом АРВ старается удерживать напряжение на шинах генератора неизменным. В зависимости от параметров настройки автоматики легко добиться как аperiodического, так и колебательного нарушения статической устойчивости ЭЭС. Графики изменения угла нагрузки генератора  $\delta$  приведены на рис. 5.

Отдельно следует отметить большое количество ограничений и защит, встроенных в программу. Так, нельзя завершить работу программы, оставив эксперимент незавершенным, или задать значение уставки слишком большим, подвергая опасности оборудование стенда

#### VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработано программное обеспечение, позволяющее использовать полный потенциал стендов ИПЦ «Учебная техника» в комбинации физического и математического

моделирования при проведении лабораторных работ по курсу «Электромеханические переходные процессы в ЭЭС». В основу легли как проверенные, зарекомендовавшие себя алгоритмы, так и созданные с нуля специально для данного ПО.

В разработке находится комплекс методических указаний для проведения лабораторных работ.

#### Список литературы

- [1] NI 6023E/6024E/6025E Family Specifications. URL: [www.ni.com/pdf/manuals/370719c.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/370719c.pdf) (дата обращения: 01.07.12).
- [2] Магда Ю. С. NI Measurement Studio: практика разработки систем измерения и управления на C#. М.: ДМК Пресс, 2013. 190 с.
- [3] Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Разработка программного обеспечения для исследования алгоритмов синхронизации генераторов и автоматического регулирования напряжения на выводах синхронного генератора // 21 век: фундаментальная наука и технологии: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2013. С. 197–214.

# РАЗРАБОТКА УЧЕБНЫХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Шлепенков А.А.<sup>1</sup>, Мухлынин Н.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Урала

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина»

Екатеринбург, Россия

schlepenkow@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Цифровая дифференциальная защита силового трансформатора представляет собой достаточно сложный комплекс программно-аппаратных средств, изучение которого представляется непростой задачей с учетом ограниченного времени, отведенного на курс по релейной защите. В этих условиях необходимо разработать инструменты, которые позволили бы наглядно продемонстрировать учащемуся принципы работы цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора, дали бы возможность студенту производить проверку работы защиты в нормальных и аномальных режимах работы.

**Материалы и методы:** Используется программный комплекс MATLAB/Simulink.

**Результаты:** В ходе работы в программном комплексе MATLAB/Simulink были созданы модели цифровых дифференциальных защит и резервных защит трансформаторов от следующих производителей: «РАДИУС Автоматика», General Electric, Schneider Electric. Для этих моделей были разработаны блоки с графическим интерфейсом, позволяющим упростить и наглядно продемонстрировать настройку соответствующих защит.

**Выводы:** Были получены модели цифровых дифференциальных защит и резервных защит, предлагаемые различными производителями, которые позволят повысить эффективность обучения и сделают более наглядной работу этих защит.

**Ключевые слова:** цифровая дифференциальная защита, силовой трансформатор, графический интерфейс, MatLab Simulink.

# DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL MODELS OF POWER TRANSFORMER DIGITAL DIFFERENTIAL PROTECTION

A. Shlepenkov<sup>1</sup>, N. Mukhlynin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Filial branch of "System Operator of the United Power System", JSC

<sup>2</sup>Yeltsin UrFU,

Yekaterinburg, Russian Federation

schlepenkow@gmail.com

## Abstract

**Background:** Power transformer digital differential protection is a rather complex set of software and hardware; the study of the set is quite difficult given the limited time allocated to the course of relay protection. In these conditions it is necessary to develop tools that will demonstrate how power transformer digital differential protection works and will enable a student to conduct experiments with the protection by himself.

**Materials and methods:** The software complex MATLAB/Simulink was used.

**Results:** In this work MATLAB/Simulink software was used to create the models of transformer digital differential protections and backup protections provided by the following manufacturers: RADIUS Automatics, General Electric, Schneider Electric. For these models blocks with graphical interface were developed. The blocks graphically demonstrate and facilitate the protections setting process.

**Conclusions:** As a result the models of digital differential protections and backup protections offered by various manufacturers were obtained. They would increase the efficiency of studying process would facilitate the perception of digital differential protection operation.

**Key words:** digital differential protection, power transformer, graphic interface, MatLab Simulink.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Курс релейной защиты является одним из основных при обучении по направлениям, связанным с электроэнергетикой и электротехникой. В ходе этого курса изучаются различные виды защит и, в частности, дифференциальная защита трансформатора. При этом у студента могут возникать сложности с пониманием принципов работы современных цифровых дифференциальных защит.

Для того чтобы реализовать функцию дифференциальной защиты в микропроцессорных терминалах используется целая совокупность различных устройств и методов для обработки входящих аналоговых сигналов и принятия решения о срабатывании или несрабатывании. Так, в типичной реализации аналоговые сигналы поступают на аналогово-цифровые преобразователи, затем происходит компенсация фазовых сдвигов и разницы в амплитуде между вторичными токами сторон высшего и низшего напряжений трансформатора и исключение токов нулевой последовательности. И уже из полученных сигналов формируются тормозные и дифференциальные токи [1].

В дополнение к принципиальной сложности таких защит добавляются различные особенности их работы у каждого производителя. Так, выделяется два вида компенсации разницы в амплитуде между токами сторон высшего и низшего напряжений трансформатора. Дифференциальный и тормозной токи также могут быть получены различными способами [1].

В результате, в условиях ограниченного времени, которое отводится на изучение предмета и сложности цифровой дифференциальной защиты, у студента могут возникнуть проблемы с пониманием основ функционирования цифровой дифференциальной защиты.

Поскольку на данный момент не существует доступного программного обеспечения, которое позволяло бы не только изучить архитектуру цифровой дифференциальной защиты, но и наглядно демонстрировало бы ее работу в энергосистеме, целью данной работы является разработка модели цифровых дифференциальных защит от нескольких производителей в программном комплексе MatLab Simulink с возможностью настраивать и наблюдать процессы, происходящие в защите с помощью графического интерфейса.

## II. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЗАЩИТ

В ходе данной работы решалась задача построения модели цифровой дифференциальной защиты и резервных защит силового двухобмоточного трансформатора с возможностью настройки первой с использованием графического интерфейса.

Необходимые модели были созданы в программном комплексе MatLab Simulink с помощью стандартных блоков.

В качестве примера разработанных моделей с элементами цифровых дифференциальных защит можно привести модель защиты, которую предлагает ЗАО «РАДИУС Автоматика» (рис. 1).

Эта модель включает в себя фильтры высших гармоник 1, аналогово-цифровой преобразователь 2, компенсацию аperiodической составляющей 3, блоки компенсации токов нулевой последовательности 4 и компенсации разницы в амплитуде и фазового сдвига между токами сторон высшего и низшего напряжений трансформатора 5.

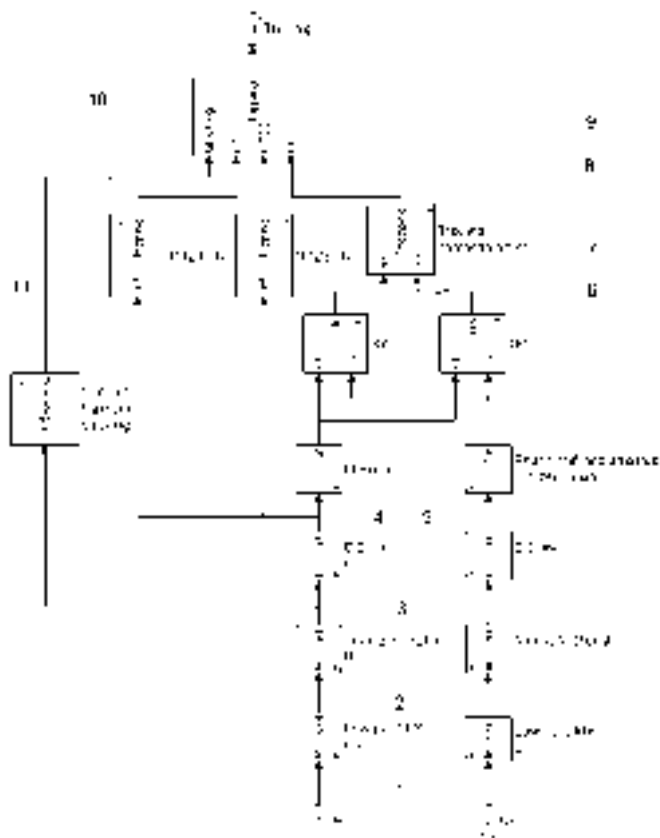


Рис. 1 – Вид модели цифровой дифференциальной защиты и резервных защит силового трансформатора: 1 – фильтр высших гармоник; 2 – аналогово-цифровой преобразователь; 3 – блок компенсации аperiodической составляющей; 4 – блок компенсации токов нулевой последовательности; 5 – блок компенсации амплитуды и фазового сдвига; 6 – блок получения тормозных токов; 7 – блок получения дифференциальных токов; 8 – логика дифференциальной защиты и дифференциальной отсечки; 9 – максимальная токовая защита; 10 – токовая отсечка; 11 – блок блокировки защиты по второй гармонике

Тормозные 6 и дифференциальные 7 токи получаются по следующим формулам соответственно [2]:

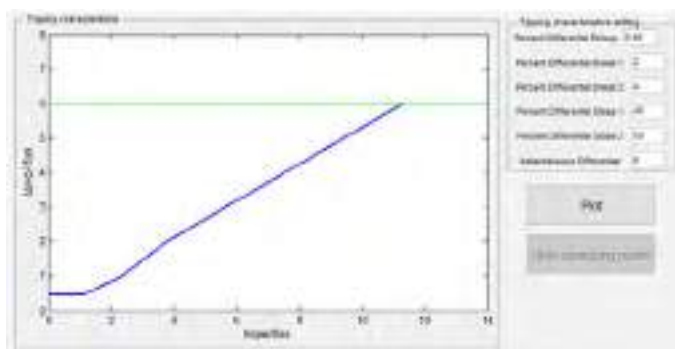
$$I_{\text{диф}} = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2|; \quad (1)$$

$$I_{\text{торм}} = 0,5|\vec{I}_1 - \vec{I}_2|. \quad (2)$$

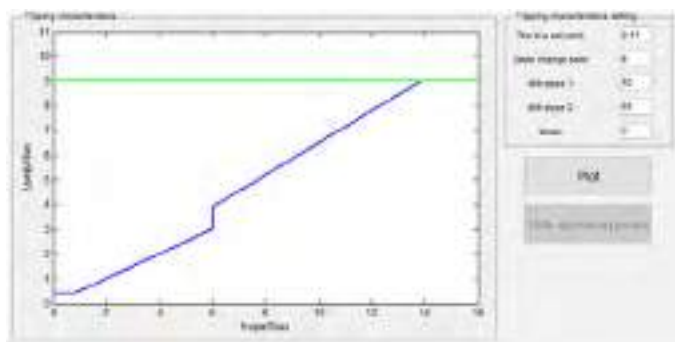
В список смоделированных основных и резервных защит, имеющих в микропроцессорном терминале входят дифференциальная защита и дифференциальная отсечка 8, МТЗ ВН 9 и токовая отсечка 10. Кроме того, предусмотрена блокировка работы защит по второй гармонике при бросках тока намагничивания 11.

При построении моделей в первую очередь использовалась документация, предоставляемая производителями соответствующих терминалов [3], [4], [5]. Для того чтобы воссоздать расчет характеристик срабатывания дифференциальных защит и дифференциальных токовых отсечек в логике графического интерфейса использовались соответствующие методики расчета от производителей [2, 6, 7].

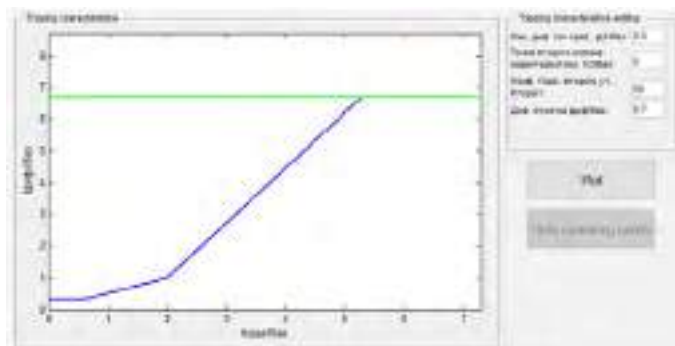
Вид графического интерфейса, разработанного для каждой из трех моделей и позволяющего настраивать тормозную характеристику для каждой из трех защит, представлен на рис. 2.



a



b



v

Рис. 2 – Графический интерфейс настройки характеристики срабатывания дифференциальной защиты и токовой отсечки от General Electric (a), от Schneider Electric (b) и ЗАО «РАДИУС Автоматика» (v)

Данный графический интерфейс позволяет настраивать характеристику срабатывания соответствующей защиты и сразу же наблюдать результат изменений. Кроме того, нет необходимости задания соответствующих параметров непосредственно в самой модели, настройки, вписанные в поля ввода, непосредственно передаются в модель и сохраняются.

Еще одной возможностью, которой обладает данный интерфейс, является предоставление данных о перемещении рабочей точки в процессе моделирования. Это означает, что студент может визуальнo отследить и проанализировать изменение соотношения дифференциального и тормозного токов в ходе моделирования.

Интерфейсы настройки резервных защит и блокировки при бросках тока намагничивания не приводятся для краткости.

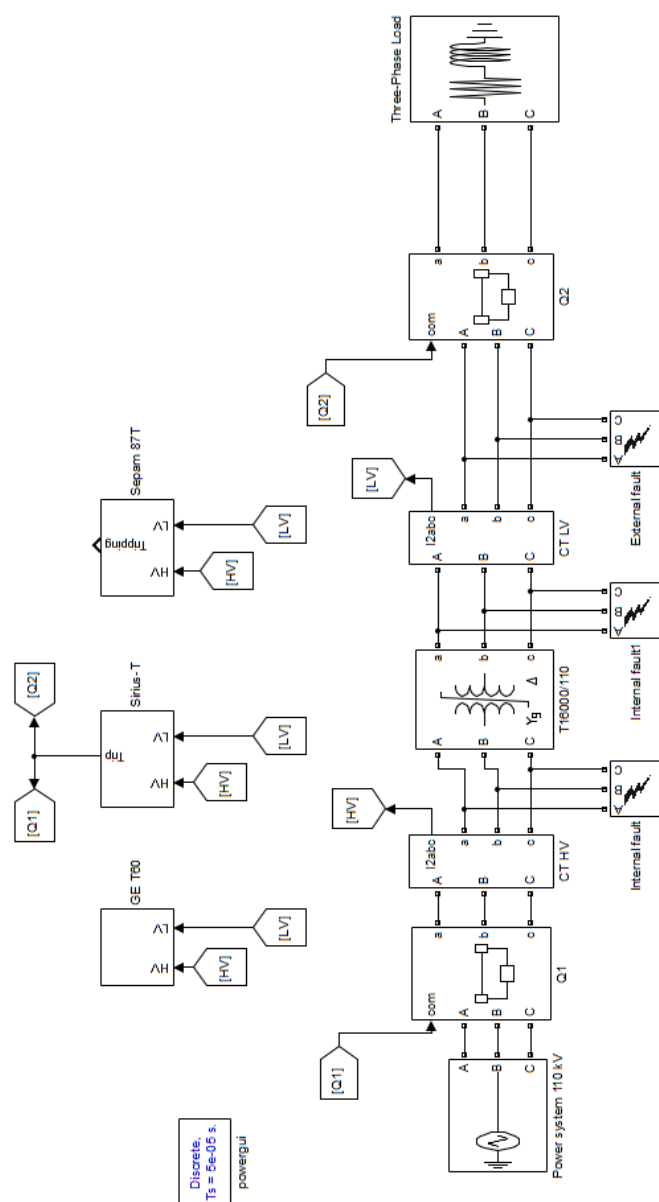


Рис. 3 – Модель защищаемого участка сети

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки созданных моделей дифференциальных и резервных защит использовалась модель энергосистемы, собранная с использованием стандартных блоков библиотеки SimPowerSystems программного комплекса MatLab Simulink. Модель энергосистемы включает в себя защищаемый силовой двухобмоточный трансформатор ТДН-16000/110, внешнюю энергосистему и трехфазную нагрузку на стороне 10 кВ (рис. 3).

Ниже представлены виды графического интерфейса дифференциальной защиты Сириус-Г при внутреннем коротком замыкании (рис. 4).

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были построены модели цифровых дифференциальных защит и резервных защит силовых трансформаторов с элементами защит от следующих

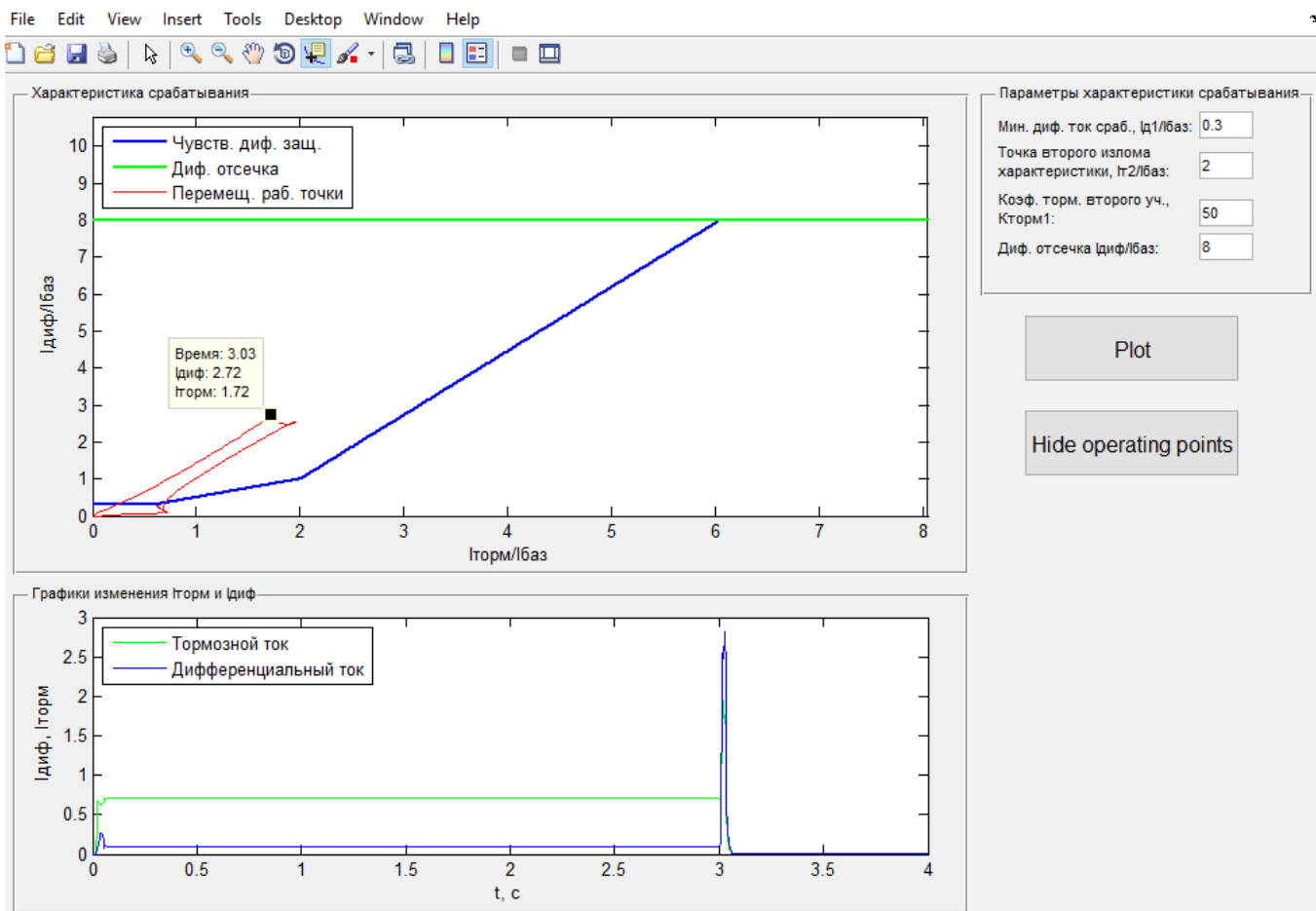


Рис. 6 – Вид графического интерфейса после моделирования внутреннего короткого замыкания

производителей: «РАДИУС Автоматика», General Electric, Schneider Electric. Данные модели обладают графическим интерфейсом, с помощью которого может осуществляться настройка соответствующих защит.

На примере этих моделей студент, изучающий курс релейной защиты, может собрать собственную модель дифференциальной защиты, а с использованием графического интерфейса легко настраивать ее характеристику. После моделирования появляется возможность наблюдать, как изменялась рабочая точка (т.е. соотношение дифференциального и тормозного тока) в процессе моделирования. Данная функция позволяет наглядно представить то, как дифференциальная защита отличает нормальный режим от аварийного.

### Список литературы

- [1] Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 203–224.
- [2] Рекомендации по выбору уставок устройств защиты двухобмоточного трансформатора «Сириус-Т» ЗАО «Радиус Автоматика». М., 2010. 11 с.
- [3] T60 Transformer Protection System UR Series Instruction Manual.
- [4] Sepam Series 80 Protective Relays Reference Manual.
- [5] Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-Т»: руководство по эксплуатации.
- [6] T60 Percent Differential Calculations GE Power Management No. GET-8425.
- [7] Transformer Differential ANSI 87T Parameter Setting Guide.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция № 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ)

<i>Karnaikhov I.</i> Geographical optimization of renewable energy portfolios with regards to output risks in New York state independent system operator (NYISO).....	7
<i>Аганова Е.Э., Савельева Н.С., Толстихина Л.В.</i> Эффективное использование гидроэнергетического потенциала Республики Хакасия .....	9
<i>Айметов И.О., Маряхина С.В., Логачева А.Г.</i> Уровень развития интеллектуальных систем компенсации реактивной мощности для Facts в России и за рубежом .....	13
<i>Алтынбаева Д.Б.</i> Оценка энергии активации термического разложения биомассы методом COATS-REDFERN .....	15
<i>Басенко В.Р., Айметов И.О., Манахов В.А., Логачева А.Г.</i> Интеллектуальные системы электро-, тепло- и газоснабжения, интеграция различных видов энергоресурсов и средства распределенной энергогенерации.....	19
<i>Басова А.Е., Шабаль Н.С.</i> Интеграция объектов распределенной генерации с участием биогазовых установок. Перспективы применения биогазовых установок в России .....	23
<i>Батуева Д.Е., Жуковский Ю.Л.</i> Ключевые технологии интеграции энергоресурсов и средств распределенной генерации .....	28
<i>Болотов П.В.</i> Применение технологии блокчейн в распределённой генерации на основе возобновляемых источников энергии .....	32
<i>Бочков И.С., Амиров Д.И.</i> Влияние окружающей среды на работу солнечных панелей .....	36
<i>Вавилова Ж.Е.</i> Формирование имиджа энергетической компании в социальных сетях.....	38
<i>Ворошилов А.А., Шалухо А.В., Липужин И.А.</i> Исследование работы виртуальной электростанции с источниками распределенной генерации .....	42
<i>Галимова Л.К., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.</i> Определение основных аспектов конкурентоспособности национальной экономики .....	46
<i>Гибадуллин Р.Р.</i> Косвенный метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия.....	48
<i>Гильманова А.Р.</i> Использование возобновляемых источников энергии: сравнительный опыт России и мира.....	52

<i>Демин Ю.И., Скоморохов А.А., Чернокужников В.Д., Шагимарданов П.Д.</i> Разработка электронных устройств в составе электродинамической модели на микромашинах системы электроснабжения с малой распределенной генерацией и ВИЭ.....	54
<i>Дубайлова В.В., Мухлынин Н.Д.</i> Применение модели опережающего управления для формирования управляющего воздействия на распределенную генерацию .....	58
<i>Жданович А.А., Тимошенко Е.Н.</i> Исследование энергетического потенциала промышленных городских стоков .....	62
<i>Жиленков А.А.</i> Анализ применения ВЭС на примере энергосистемы Республики Татарстан.....	66
<i>Зайцев В.В., Толстихина Л.В.</i> Нечёткая классификация по параметрам малых ГЭС Республики Хакасия .....	70
<i>Зенина О.А., Сошинов А.Г., Галуцак В.С., Тихонин С.Н.</i> Расчёт мощности солнечно-сетевой зарядной станции электромобильного транспорта предприятия ...	74
<i>Ивановский Д.А.</i> Оценка экономического ущерба участника оптового рынка вследствие отказов опорных изоляторов комплектных генераторных токопроводов .....	77
<i>Ишкова Е.М.</i> Управление спросом на электроэнергию в ЕЭС России. Состояние и перспективы развития .....	81
<i>Карпов А.И., Акимов Д.А.</i> Анализ используемых для оценки эффективности установки реклоузеров интегральных индексов надёжности электроснабжения .....	85
<i>Колотыгина Е.К., Фролова Я.А.</i> Оптимизация состава и загрузки включенного оборудования при совместной выработке электричества и тепла в энергосистемах малой мощности .....	89
<i>Кононов Н.С., Шульгин А.О., Гольдштейн М.Е.</i> Особенности применения устройств продольной компенсации на базе преобразователей напряжения для управления режимами электрической сети.....	93
<i>Коробец А.С., Степанов С.Ф.</i> Распределённая генерация электроэнергии на низкопотенциальном теплоносителе с помощью роторно-генераторной установки .....	97
<i>Крицкий М.В., Баннов Д.М., Полищук В.И.</i> Оценка экономического ущерба от повреждения в обмотке возбуждения турбогенератора .....	101



<i>Лысова А.С., Васьков А.Г.</i> Исследование влияния температуры на эффективность солнечных модулей .....	103
<i>Манцеров Т.Ф., Лапченко Д.А., Тымуль Е.И.</i> Проведение энергетического аудита как основа разработки программы энергосбережения на промышленных предприятиях .....	107
<i>Местников Н.П.</i> Разработка децентрализованной системы электроснабжения малочисленных населенных пунктов Республики Саха (Якутия) с использованием гибридных станций с солнечными панелями и суперконденсаторами .....	111
<i>Мирсалихов К.М., Федоренков Д.И., Грибков А.М.</i> Влияние экологических и экономических факторов на выбор оптимальных размеров четырехствольных дымовых труб .....	115
<i>Муштуков Д.А.</i> Накопители энергии и их применение в электроэнергетических системах .....	119
<i>Наумкин Р.Б.</i> О вопросах предоставления диапазона регулирования реактивной мощности электростанциями .....	123
<i>Нестеренко Г.Б., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А.</i> Универсальная математическая модель системы накопления электрической энергии.....	127
<i>Нестеренко Е.С., Чудный В.С., Смирнова Л.С.</i> Требования к разработке схем выдачи мощности ветровых электростанций.....	131
<i>Никулин К.В.</i> Разработка биогазовой электрической станции в Новосибирской области .....	135
<i>Обухова Н.В., Башкатова К.И., Егоров А.О.</i> Режимы работы Сакмарской солнечной электростанции Оренбургской энергосистемы .....	139
<i>Петровская Т.К., Фролова Я.А.</i> Анализ влияния краткосрочного снижения/повышения частоты на эффективность использования оборудования в изолированной энергосистеме с ГПУ .....	143
<i>Пронина О.А., Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Демидова А.С.</i> Разработка и исследование принципов регулирования потоков мощности в распределительных сетях с ТРН на имитационных моделях .....	147
<i>Русецкая М.И., Чиж Е.П.</i> Сценарий развития энергетики стран ЕАЭС в условиях создания общего энергетического рынка.....	151
<i>Салахутдинова В.З., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.</i> Проблемы управления инвестиционной деятельностью предприятия в современной экономике.....	155

<i>Сангов Х.С.</i> Проектирование систем электроснабжения на базе ветроэнергетических установок .....	157
<i>Сангов Х.С.</i> Современная ветроэнергетика: мировые тенденции и перспективы ее развития .....	161
<i>Сафина Э.И., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.</i> Нейромаркетинг как инструмент управления спросом .....	165
<i>Селиванов Н.Н.</i> Развитие электростанций розничного рынка .....	167
<i>Сибгатуллин Р.А., Жиленков А.А.</i> Энергетические установки, применяемые в распределённой генерации .....	169
<i>Смирнов К.С.</i> Оценка сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии из Восточной Сибири и Дальнего Востока в Китай .....	171
<i>Смирнова С.В.</i> Организация теплоснабжения потребителей за счет объектов когенерации.....	175
<i>Снегирев Д.А., Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И., Дубайлова В.В.</i> Модели краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций.....	179
<i>Солдусова Е.О., Проничев А.В., Шишков Е.М.</i> Система управления режимами изолированной микросети с распределённой генерацией.....	183
<i>Субботин П.В., Гусев Ю.П.</i> Применение накопителей электроэнергии для симметрирования нагрузки и компенсации реактивной мощности .....	186
<i>Тупикина А.А.</i> Выбор оптимальных параметров энергосервисного контракта на основе оценки его экономической эффективности.....	188
<i>Тыквинский А.М.</i> Совместный выбор оптимального угла наклона солнечных модулей и расстояния между ними на солнечных электростанциях большой мощности .....	192
<i>Уколова Е.В.</i> Обеспечение качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения.....	196
<i>Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В.</i> Энергетический хаб как базовая концепция интегрированных энергетических систем .....	198
<i>Французова А.Д., Юдина Н.А., Лившиц С.А., Дунаева Т.Ю.</i> Роль автоматизации в управлении энергоэффективностью на предприятии .....	200
<i>Чукреев М.Ю.</i> Вопросы нормирования надежности при планировании развития ЭЭС в условиях рынка .....	202

<i>Чуркина Ю.О., Кормилицын Д.Н.</i> Влияние управляемой продольной емкостной компенсации на динамическую устойчивость электроэнергетической системы .....	206
<i>Шайхутдинов М.Р., Соловьёва А.А.</i> Сетевые накопители электроэнергии в электрической сети .....	210
<i>Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р., Васьков А.Г.</i> Оценка потенциальных ресурсов солнечной энергии на территории Республики Таджикистан .....	212
<i>Шибачев Ю.С., Чистякова С.В., Пшеничникова А.А.</i> Исследование влияния распределенной управляемой емкостной компенсации на динамическую устойчивость электроэнергетической системы, содержащей дальнюю линию электропередачи сверхвысокого напряжения.....	216
<i>Шишкин А.С., Лямов А.С., Паздерин А.В., Смолвик С.В., Солодянкин С.А., Тупицина А.Л.</i> Математическое моделирование быстродействующих устройств режимного регулирования и исследование их влияния на показатели устойчивости.....	220
<i>Шубина С.К., Хрещатая О.И., Кубышкина А.А.</i> Перспективы развития топливно-энергетического комплекса.....	222
<i>Щербаков Е.В., Высоких Д.Д., Толстихина Л.В.</i> Влияние на надёжность электроснабжения потребителей при распределении малой генерации с использованием теории игр .....	224

## **Секция №6. ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**

<i>Алтухов И.В., Шамарова Н.А.</i> Инфракрасная электротехнология для сушки растительного сырья.....	231
<i>Аль-Окби Ахмед Кхалиль Карим, Николаева Л.А.</i> Осушка природного газа карбонатным шламом .....	233
<i>Баннов Д.М., Крицкий М.В.</i> Разработка экспериментальной установки для исследований диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя.....	237
<i>Ву Нгок Зан, Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф.</i> Влияние природы растворителя на разделение фурановых соединений в трансформаторном масле методом тонкослойной хроматографии .....	239
<i>Галиев А.А., Соловьёва О.В.</i> Численное моделирование сепаратора для повышения эффективности разделения эмульсий.....	243

<i>Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Ибадов А.А.</i> Усовершенствование акустико-резонансного метода и разработка информационно-измерительного комплекса контроля местоположения трубопроводов .....	245
<i>Гура Д.Н., Тучина Д.С., Яловой В.Я., Корольков А.Л.</i> Решение проблемы сохранения заряда аккумуляторной батареи электромобиля.....	249
<i>Гурьев И.А., Новиков Е.А.</i> Анализ способов осуществления параллельной работы задающих генераторов с разбросом параметров .....	251
<i>Додов И.Р., Москаленко Н.И., Паржин С.Н., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С.</i> Измерительный комплекс для исследований оптических характеристик и микроструктуры антропогенных зольей.....	255
<i>Желудков А.А., Кадыров Р.Н.</i> Сезонные, водяные системы антиобледенения кровель и удаления снега .....	259
<i>Загретдинов А.Р., Базукова Э.Р.</i> Контроль работы топливного дозатора ДВС с применением преобразования Гильберта-Хуанга.....	261
<i>Ибадов А.А., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Нигматулина А.Ф.</i> Математическое моделирование колебаний упругой оболочки при внешнем воздействии на примере трубопровода .....	265
<i>Исламова Г.Н., Садыков М.Ф., Галиева Т.Г.</i> Смарт-драйвер для системы интеллектуального освещения на основе микроконтроллера.....	269
<i>Кириллова Н.А.</i> Модернизация метода расчета интенсивности отказов теплопроводов систем децентрализованного теплоснабжения .....	271
<i>Кравец Э.А., Поздеев В.А., Кулдин Н.А.</i> Исследование причин пульсаций факела в топках паровых котлов .....	273
<i>Ларионова А.А., Егоров А.О., Люханов Е.А.</i> Системы оперативного мониторинга баланса электрической энергии объектов электросетевого предприятия .....	276
<i>Логунов А.В., Копырин В.А.</i> Оценка энергетической эффективности применения магнитогидродинамических насосов для добычи углеводородов .....	281
<i>Мубаракшин А.Х., Ахмеров А.В.</i> Энергосберегающие пульсационные аппараты для бионанотехнологического крупнотоннажного производства .....	285
<i>Мубаракшин А.Х., Ахмеров А.В.</i> Энергоэффективный пульсационный биофильтр с подвижной загрузкой для установок замкнутого водоснабжения .....	287

<i>Нгуен Зуи Хынг, Снугирева Ю.В., Новиков В.Ф.</i> Проблема старения диэлектрических материалов силового маслонаполненного оборудования .....	289
<i>Рокина Е.Г., Сидорова В.Т.</i> Создание электрической модели линии 0,4 кВ для исследования компенсации реактивной мощности .....	293
<i>Саитов С.Р.</i> Моделирование и оптимизация схемы водоподготовки ТЭС с обратно-осмотическими модулями .....	295
<i>Таймаров М.А., Осипов А.Л., Тюреева С.А., Ялалов И.Ф.</i> Получение энергоносителя на основе нового способа газификации угля .....	299
<i>Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Сулов К.В.</i> Техничко-экономическое обоснование применения преобразователей электрической энергии в тепловую.....	302
<i>Халлыев И.А., Платонова А.В.</i> Моделирование гелиоабсорбционной теплонасосной системы отопления с льдоаккумулятором для жилого дома .....	304
<i>Хафизова А.И., Круглов Л.В., Дмитриева О.С.</i> Истечение жидкости через отверстие в струйно-пленочном контактном устройстве.....	308
<i>Шагиева Г.К., Лаптева Е.А.</i> Повышение эффективности очистки воды от коррозионно-активных газов за счет сильного взаимодействия воды и воздуха (пара) .....	310
<i>Шакиров Р.А.</i> Нейросетевое моделирование поверхностных интенсификаторов теплообмена .....	314
<i>Ширяев А.С., Гиришин С.С.</i> Анализ зависимости приведённых затрат от длины линии при поиске оптимальной комбинации технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии .....	317

## **Секция № 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

<i>Абдуллин Д.Р., Грищук Д.В.</i> Разработка программно-аппаратного комплекса «Тренажер для обучения водителей рельсового наземного городского электрического транспорта энергоэффективным режимам движения» .....	323
<i>Авдеев А.В., Волков И.Д., Мусихина В.А., Толстихина Л.В.</i> Моделирование объектов электроэнергетики с использованием режимного тренажёра .....	327
<i>Агафонов А.Н., Болотов П.В.</i> База знаний энергетика «AMPER.PRO» .....	330

<i>Гура Д.Н., Байрамуков М.А., Яловой В.Я., Корольков А.Л.</i> Развитие и итоги по созданию программных комплексов проверки УРЗА . . . . .	332
<i>Исмагилов А.В.</i> Образование человека как основа технологического прорыва . . . . .	334
<i>Карташова А.А., Танеева А.В., Новиков В.Ф.</i> Инновационные технологии повышения квалификации работников энергетической отрасли промышленности по диагностике маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами . . . . .	338
<i>Ларионова А.А., Егоров А.О., Филимошкин И.Д.</i> Конструктор линейной арматуры и изоляции воздушных линий электропередачи . . . . .	342
<i>Ларионова А.А., Егоров А.О., Филимошкин И.Д.</i> Конструктор элегазового выключателя ВЭБ-110 (УЭТМ) в масштабе 1/10 . . . . .	346
<i>Сидоров А.В., Молчагина К.Д.</i> Обновление технического комплекса для выполнения лабораторных работ по курсу «Электромеханические переходные процессы в ЭЭС» . . . . .	350
<i>Шлепенков А.А., Мухлынин Н.Д.</i> Разработка учебных моделей цифровых дифференциальных защит силового трансформатора . . . . .	354







*Научное издание*

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2018

Материалы  
IX Международной молодежной научно-технической конференции  
1–5 октября 2018 г.

В трех томах

Том 3

Корректоры: М.С. Беркутова, Л.Р. Гайнуллина, Е.С. Дремичева, И.В. Краснова  
Компьютерная верстка И.В. Краснова  
Дизайн обложки Ю.Ф. Мухаметшина

Подписано в печать 14.11.2018.  
Формат 60×84/8. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Усл. печ. л. 42,78. Уч.-изд. л. 21,45. Тираж 60. Заказ № 5129

Редакционно-издательский отдел КГЭУ  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51



ISBN 978-5-89873-520-3



9 785898 735203