

ISSN 2072-6007



КГЭУ

# ВЕСТНИК

КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



KAZAN STATE POWER ENGINEERING  
UNIVERSITY BULLETIN

**2023, том 15**

**№ 1 (57)**

# ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Свидетельство о регистрации СМИ:**  
журнал зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций  
ПИ № ФС77-34079 от 14 ноября 2008 г.

**2023**  
**Т.15, №1(57)**

Периодичность – 4 раза в год

ISSN 2072-6007 (Print)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий  
по специальностям: 05.14.00 «Энергетика»

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

Казанский государственный энергетический университет

**ИЗДАТЕЛЬ:**

Казанский государственный энергетический университет

**ОСНОВНАЯ РУБРИКА ЖУРНАЛА:**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ  
РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

<b>Главный редактор:</b>	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э. Ю.
<b>Заместитель главного редактора</b>	АХМЕТОВА И.Г.
<b>Ответственный секретарь</b>	ГРАЧЕВА Е.И.
<b>Научный редактор</b>	КАЛИНИНА М.В.
<b>Редактор</b>	ВАЛЕЕВА С.Н.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

ТОРКУНОВА Ю.В.	ГРАЧЕВА Е.И.	ЗВЕРЕВА Э.Р.
НОВИКОВА С.В.	ФЕДОТОВ А.И.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
ОРАЗБАЕВ Б.Б.	KOLCUN MICHAEL	ЛАПТЕВ А.Г.
КАБАЕВА Г.Д.	STANIMIR VALTCHEV	ВАЛЕЕВА Ю.С.
ИВШИН И.В.	ВИНОГРАДОВ А.В.	ЗОРИНА Т.Г.
ГИЗАТУЛЛИН З.М.	БОЧКАРЕВ И.В.	ЧИРКОВА И.Г.
ДОВГУН В.П.	БРЯКИН И.В.	КОЛИБАБА В.И.
ИЛЮШИН П.В.	АХМЕТОВА И.Г.	TAN LIGUO
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	

<b>Подписка:</b>	Каталог интернет-подписки «Почта России» – П6739
<b>Сайт:</b>	www.vkgeu.ru
<b>Издатель:</b>	Казанский государственный энергетический университет
<b>Адрес издателя:</b>	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
<b>Адрес редакции:</b>	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
<b>Тел./факс:</b>	+7 (843) 527-92-76
<b>Типография:</b>	ООО "ФОЛИАНТ"
<b>Адрес типографии:</b>	420111 г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в
<b>Email:</b>	vkgeu@bk.ru

# VESTNIK KAZANSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ENERGETICHESKOGO UNIVERSITETA

---

---

**Founder:**  
Kazan State Power Engineering University

**2023**  
**Vol.15, №1(57)**

**Publication Frequency** – Quarterly

**ISSN 2072-6007 (Print)**

---

---

**Publisher:** Kazan State Power Engineering University

**Chief Editor:** EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

## SECTIONS:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES  
ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS  
SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION  
REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

## Editorial board:

TORKUNOVA YULIYA	GRACHIEVA ELENA	ZVEREVA ELVIRA
NOVIKOVA SVETLANA	FEDOTOV ALEXANDER	MINGALEEVA GUZEL
ORAZBAEV BATYR	KOLCUN MICHAIL	LAPTEV ANATOLY
KABAEVA GULNARA	STANIMIR VALTCHEV	VALEEVA YULIYA
IGOR IVSHIN	VINOGRADOV ALEXANDER	ZORINA TATYANA
GIZATULLIN ZINNUR	BOCHKAREV IGOR	CHIRKOVA IRINA
DOVGUN VALERY	BRIAKIN IVAN	KOLIBABA VLADIMIR
ILYUSHIN PAVEL	AKHMETOVA IRINA	TAN LIGUO
SAFIN ALFRED	VANKOV YURY	

<b>Address</b>	Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation
<b>Tel./fax:</b>	+7 (843) 527-92-76
<b>Printing House:</b>	Printing House: LLC "FOLIANT"
<b>Address of the printing house:</b>	Address of the printing house: 420111 g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
<b>Email:</b>	vkgeu@bk.ru
<b>Site:</b>	www.vkgeu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

КАЗАКОВ В.Г., ЛУКАНИН П.В., ФЕДОРОВА О.В., ЗВЕРЕВА Э.Р. Энергосберегающие технологии в процессе производства сульфатной целлюлозы в целлюлозно-бумажной промышленности. ....	3
ШУШПАНОВ И.Н., ПЕРМЯКОВА Д.Н., КОНЮХОВ В.Ю., ОПАРИНА Т.А. Проблемы организации работы энергосистемы объектов железнодорожного транспорта восточного полигона в условиях прироста грузопотока. ....	12
ОЛЕНЦЕВИЧ В.А., ГУСЕВА Е.А., КОНСТАНТИНОВА М.В. Автоматизированная система управления электропотреблением промышленных предприятий. ....	23
СТОЛЯРОВА Е.Ю., ЛАПТЕВА Е.А., ЛАПТЕВ А.Г. Экспериментальные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочной градирни с комбинированными насадками. ....	37
ВАЛИУЛЛИН Б.Р., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Режимные параметры системы пылеприготовления для газогенераторов поточного типа. ....	48

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ПЕТРОВ Т.И., САФИН А.Р., ВЕНЕРА Р.К. Особенности проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи комплексной топологической оптимизации. ....	58
БАЛАБАНОВ А.М., МИТРОФАНОВ С.В. Сезонное резервирование электроснабжения: принцип, устройство, алгоритм. ....	68
ФЕДОТОВ А.И., АНДРЕЕВ Н.К., ВАГАПОВ Г.В., АБДУЛЛАЗЯНОВ А.Ф. Тестирование фидеров древовидной структуры 6 – 10 кВ для определения места ОЗЗ. ....	80
ПЕТРОВА Р.М, АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., VALTCHEV S., YOUSEF IBRAGIM. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения. ....	93
ИВШИН И.В., АУХАДЕЕВ А.Э., ЛЕ К.Т. О применении нейронных сетей в расчетах рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта. ....	106
ION V. ION, RĂZVAN MANU, FLORIN POPESCU, GABRIEL MOCANU, ROBERT CHIVU. Prediction of tar formation in a biomass heating boiler. ....	117
АЛЬКИНА А.Д., ЮРЧЕНКО А.В., МЕХТИЕВ А.Д., МАДИ П.Ш., АЙМАГАМБЕТОВА Р.Ж. Разработка автоматической системы контроля кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков. ....	125
БОЯРСКАЯ Н.П., ДОВГУН В.П., ЕГОРОВ Д.Э., СИНЯГОВСКИЙ А.Ф. Пассивные фильтры для компенсации гармоник в линиях электропередачи высокого напряжения. ....	144

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

КОЛИБАБА В.И., ТАРАСОВА А.С. Оценка влияния тарифного регулирования на устойчивое функционирование и развитие энергокомпаний РФ. ....	152
АНТОНОВ В.С. Разработка структуры формализованной модели управления всеобщим ресурсосбережением. ....	173

К ИНФОРМАЦИИ

ВОДЕННИКОВ Д.А., ЖИЛКИНА Ю.В., АХМЕТШИН А.Р. Россия в СИГРЭ: история сотрудничества. ....	189
---	-----

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

KAZAKOV VG, LUKANIN PV, FEDOROVA OV, ZVEREVA ER. Energy-saving technologies in the production of sulphate cellulose in the pulp and paper industry. ....	3
SHUSHPANOV IN, PERMYAKOVA DN, KONYUKHOV VYU, OPARINA TA. Modern approaches to the organization of power supply of railway lines in remote and isolated territories. .	12
OLENTSEVICH VA, GUSEVA EA, KONSTANTINOVA MV. Problems of organizing the work of the power system of railway transport facilities of the eastern polygon in terms of cargo traffic growth. ....	23
STOLYAROVA EY, LAPTEVA EA, LAPTEV AG. Experimental hydraulic and heat and mass transfer characteristics of a film cooling tower with combined nozzles. ....	37
VALIULLIN BR, MINGALEEVA GR. Operating parameters of the dust preparation system for flow-type gas generator. ....	48

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

PETROV TI, SAFIN AR, BEHERA RK. Peculiarities of designing synchronous motors with permanent magnets using integrated topological optimization. ....	58
BALABANOV AM, MITROFANOV SV. Analysis of the efficiency of Statcom systems in improving the quality of electricity in a mining enterprise. ....	68
FEDOTOV AI, ANDREEV NK, VAGAPOV GV, ABDULLAZYANOV AF. Testing of 6 – 10 kV tree structure feeders to determine the location of the a single-phase earth fault. ....	80
PETROVA RM, ABDULLAZYANOV EYU, GRACHIEVA EI, VALTCHEV S, YOUSEF IBRAGIM. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. ....	93
IVSHIN IV, AUHADEEV AE, KT. LE. Application of neural networks in rational modes calculations of traction electric equipment operation of urban electric transport. ....	106
ION V. ION, RĂZVAN MAHU, FLORIN POPESCU, GABRIEL MOCANU, ROBERT CHIVU. Prediction of tar formation in a biomass heating boiler. ....	117
ALKINA AD, YURCHENKO AV, MEKHTIYEV D, MADI PSH, AIMAGAMBETOVA RZH. Development of an automatic cable monitoring system using quasi-distributed fiber-optic sensors. ....	125
BOYARSKAYA NP, DOVGUN VP, EGOROV DE, SINJAGOVSKY AF. Passive filters for harmonic compensation in high-voltage transvission systems. ....	144

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

KOLIBABA VI, TARASOVA AS. Assessment of the tariff regulation impact on the sustainable functioning and development of energy companies of the Russian Federation . . . . .	152
ANTONOV VS. Creatiion of the structure formalized management model of total resource saving. ....	173

TO INFORMATION

VODENINOV DA, ZHYLKINA YUV, AKHMETSHIN AR. Russia in Seagre: a history of cooperation. ....	189
---	-----

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 66.046.8

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Казаков<sup>1</sup> В.Г., Луканин<sup>1</sup> П.В., Федорова<sup>1</sup> О.В., Зверева<sup>2</sup> Э.Р.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и  
дизайна

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет

*lukanin@gturp.spb.ru*

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящей работе приводятся результаты исследований энергосберегающих технологий в процессе производства сульфатной целлюлозы в целлюлозно-бумажной промышленности. ЦЕЛЬЮ исследования является научное обоснование схемы выпаривания и анализ области выпаривания при оптимальных параметрах, на основе которых предложены конструктивные и технологические параметры процесса выпаривания. МЕТОДЫ. В работе подробно рассмотрены результаты эксергетических балансов основных процессов производства сульфатной целлюлозы - регенерация щелочей в содорегенерационных котельных агрегатах (СРК), процесса выпаривания черного щелока, варки технологической щепы, процесс декарбонизации известняка. Выполненный анализ технологической схемы позволяет выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложена новая энергосберегающая и экологически безопасная технология кислотно-щелочного способа регенерации химикатов, в которой эксергетический КПД возрастает до 90,4 %. Проведено научное обоснование схемы выпаривания и анализ области выпаривания при оптимальных параметрах, на основе которых предложены конструктивные и технологические параметры процесса выпаривания. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Определены основные направления по энергетическому совершенствованию производства сульфатной целлюлозы: снижение эксергетических потерь от необратимости теплообмена, полный или частичный вывод из технологического процесса содорегенерационного котла, а также реализация принципов биорефининга.

**Ключевые слова:** эксергетический анализ; технология теплоты; производство сульфатной целлюлозы; выпаривание; черный щелока; эксергетический КПД; энергосбережение; экологическая безопасность.

**Для цитирования:** Казаков В. Г., Луканин П.В., Федорова О.В., Зверева Э.Р. Энергосберегающие технологии в процессе производства сульфатной целлюлозы в целлюлозно-бумажной промышленности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 3-11.

## ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF SULPHATE CELLULOSE IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

VG. Kazakov<sup>1</sup>, PV. Lukanin<sup>1</sup>, OV. Fedorova<sup>1</sup>, E.R. Zvereva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design»

<sup>2</sup> Kazan State Power Engineering University

*lukanin@gturp.spb.ru*

**Abstract: RELEVANCE.** This paper presents the results of research on energy-saving technologies in the production of sulphate cellulose in the pulp and paper industry. **THE GOAL.** This paper presents the results of research on energy-saving technologies in the production of sulfate cellulose in the pulp and paper industry. The purpose of the study is the scientific substantiation of the evaporation scheme and the analysis of the evaporation region at optimal parameters, on the basis of which the design and technological parameters of the evaporation process are proposed. **METHODS.** The paper considers in detail the results of exergetic balances of the main processes of sulfate cellulose production - the regeneration of alkalis in IBS, the process of evaporation of black liquor, cooking of technological chips, the process of decarbonization of limestone. The analysis of the technological scheme makes it possible to identify the most «bottlenecks» in the use of thermal energy and justify the main directions for improving the energy efficiency of the processes considered. **RESULTS.** A new energy-saving and environmentally friendly technology of acid-base chemical regeneration method is proposed, in which the exergetic efficiency increases to 90.4%. The scientific substantiation of the evaporation scheme and the analysis of the evaporation region at optimal parameters were carried out, on the basis of which the design and technological parameters of the evaporation process were proposed. **CONCLUSION.** The main directions for the energy improvement of the production of sulphate cellulose are determined: reduction of exergetic losses from the irreversibility of heat exchange, complete or partial withdrawal from the technological process of the sodoregeneration boiler, as well as the implementation of the principles of biorefining.

**Keywords:** exergetic analysis; heat technology; sulphate cellulose production; evaporation; black liquor; exergetic efficiency; energy saving; environmental safety.

**For citation:** Kazakov VG, Lukanin PV, Fedorova OV, Zvereva ER. Energy-saving technologies in the production of sulphate cellulose in the pulp and paper industry. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):3-11.

### **Введение**

Задачи снижения затрат сырья, энергии и повышения качества конечной продукции являются **актуальными** и основными при совершенствовании производства целлюлозы и бумаги. Проблема снижения затрат энергии во многом определяет экологическую безопасность производства. Уменьшение энергетических затрат в технологический процесс от внешнего источника обуславливает эквивалентное снижение отвода теплоты в окружающую среду, а, следовательно, тепловые и химические загрязнения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и др).

Около 90 % целлюлозы в настоящее время получают сульфатным методом. Решение задач энергосбережения в основном достигается при варке древесной щепы, выпаривании черных щелоков, сушке растворов с регенерацией карбонатной и сульфидной серы, декарбонизации известняка.

Практически вся подводимая энергия (75%) для непрерывного функционирования технологической схемы производства сульфатной целлюлозы обеспечивается за счет сжигания лигнина и других растворенных органических компонентов древесины, т.е. путем использования биотоплива – внутренних источников перерабатываемого сырья. Технические решения, обеспечивающие энергосбережение путем регенерации вторичных материальных ресурсов, являются **научными и практическими** достижениями в технологии производства сульфатной целлюлозы.

Научная и практическая заочность данного исследования заключается в научном обосновании схемы выпаривания и анализе области выпаривания при оптимальных параметрах, на основе которых предложены конструктивные и технологические параметры процесса выпаривания черного щелока, варки технологической щепы, процесса декарбонизации известняка, который позволяет выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов.

Проведенными термодинамическими исследованиями [1] установлен низкий эксергетический КПД (48 %) действующего производства сульфатной целлюлозы. Такой низкий КПД определяется технологическим процессом регенерации химикатов при получении сульфатной целлюлозы. КПД этого процесса определяется величиной 46,7 % при подводе 93,8 % эксергии от всей подведенной эксергии в технологический процесс.

В процессе регенерации щелочи в содорегенерационных котельных агрегатах затрачивается 71,2% эксергии, подведенной в схеме. Из них 53% затрачивается на процессы

выпаривания воды из раствора и получения водяного пара в котле с эксергетическими КПД - 25,56% и 45,38%, соответственно. Влияние этих процессов на общий эксергетический КПД настолько велико, что они определяют величину эксергетического КПД схемы в целом, который составляет 48%. Вторым теплоиспользующим процессом по величине затраченной эксергии является процесс декарбонизации известняка. Здесь затрачивается 11,46% от всей затраченной эксергии в схеме технологии производства. Этот процесс характеризуется низким (37%) эксергетическим КПД.

Третьим теплоиспользующим процессом является выпаривание черного щелока. Величина затраченной эксергии в процессе составляет 11,10% при эксергетическом КПД этого процесса 81%.

Четвертым теплоиспользующим процессом по величине затраченной эксергии (6,25%) является варка технологической щепы. Этот процесс характеризуется эксергетическим КПД 69,44%, что не отвечает современным требованиям к эксергетическому КПД современных процессов [2-8].

#### **Материалы и методы**

Выполненный эксергетический анализ технологической схемы производства сульфатной целлюлозы позволяет выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов.

Развитие теории эксергетического метода термодинамического анализа проведено путем введения понятия приращения эксергий, что устраняет недостатки, присущие изложенным выше методам. При составлении эксергетических балансов предлагается пользоваться не значениями эксергии относительно окружающей среды, а их приращениями в процессе взаимодействия тепловых потоков. Такой подход позволил установить математическую связь между эксергетическим КПД элемента с эксергетическим КПД сложной тепловой схемы, куда входит этот элемент.

Кардинальным решением этой проблемы является исключение из технологической цепи СРК – этого энергозатратного и экологически опасного процесса.

Предлагается кислотно-щелочной способ регенерации химикатов [3-6].

#### **Результаты**

Техническим результатом предлагаемого авторами способа является исключение энергетических и эксплуатационных затрат в процессах сжигания черного щелока в СРК, обжига известняка, каустизации содового раствора, повышения эксплуатационной надежности оборудования и устранение экологической опасности этих процессов путем их вывода из технологической цепи аппаратов.

На рисунке 1 представлена упрощенная принципиальная схема предлагаемого способа. Производственный черный щелок подкисляется серной кислотой, после чего получается два продукта: суспензия лигнина и газообразные вещества. Газообразные вещества, выделяющиеся при подкислении черного щелока в основном в виде  $H_2S$  и  $CO_2$  взаимодействуют с натриевой щелочью, полученной после регенерации щелочи из смеси сульфата натрия и сульфата калия. В результате такого взаимодействия регенерируют сульфид натрия, который используют в виде оборотного раствора. Суспензию лигнина фильтруют. Лигнин после фильтрации промывают и высушивают в распылительной сушилке. Маточный раствор лигнина обрабатывают оборотным раствором  $NaOH$  до  $pH = 7-8$ . Величина  $pH$  определяется, главным образом исходя из условия возможности применения выпарных аппаратов из обычной углеродистой стали.

Полученный после нейтрализации раствор упаривают в выпарной установке на первой стадии упаривания до концентрации насыщения солей натрия и калия. Укрепленный раствор далее подают на вторую стадию упаривания, где концентрируют раствор до получения суспензии при Ж/Т (вес.) равным 3 – 5. Суспензию щелочей после второй стадии концентрирования разделяют на два продукта: маточный раствор и твердый продукт солей сульфатов. Маточный раствор направляют на смешение с раствором, поступающим на вторую стадию упаривания. Отфильтрованный продукт направляется на конвенцию с 50 % раствором  $KOH$ . В результате конверсии регенерируют едкий натрий и получают товарный сульфат калия. Раствор  $NaOH$  после фильтрации на центрифуге направляют на регенерацию  $Na_2S$  и после корректировки используют в качестве оборотного раствора для варки технологической щепы. Сульфат калия после сушки является товарным продуктом. Приведенные величины параметров являются ориентировочными и подлежат уточнению и оптимизации. По предлагаемому способу можно осуществить коренную модернизацию целлюлозного производства на основе энергосберегающей технологии регенерации химикатов при низких капиталовложениях.



Эффективность предлагаемого способа определяется снижением энергетических, капитальных и эксплуатационных затрат в процессе переработки черных щелоков. При этом обеспечивается экологическая безопасность процессов на основе вывода из технологической цепи аппаратов СРК, печей декарбонизации известняка и каустизации содовых растворов.

Новые технологии теплоты, а также способ выпаривания с кристаллизацией солей потребовали научного обоснования схемы и анализа области выпаривания при оптимальных параметрах

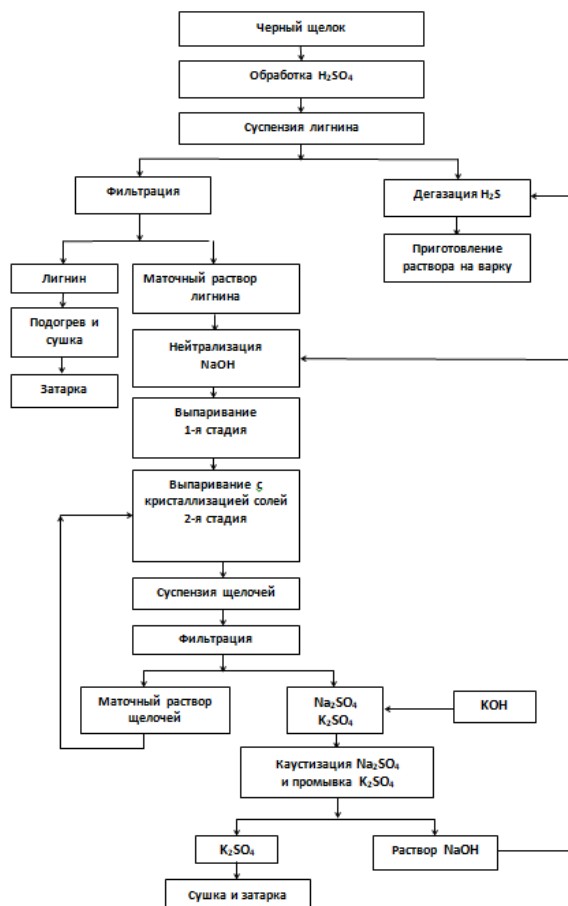


Рис. 1 Принципиальная технологическая схема кислотного-щелочного способа регенерации химикатов из растворов черного сульфатного щелока  
 Fig.1 - Schematic flow diagram of the acid-base method for the regeneration of chemicals from solutions of black sulfate liquor

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

В качестве критерия оптимальности принимается стоимость 1 кг выпаренной воды на 1 кг абсолютно-сухих веществ. Была поставлена задача по определению минимального значения критерия оптимальности в соответствии с заданными исходными данными. Рассмотрим в качестве примера формирование критерия оптимальности, по которому будем определять оптимальные параметры работы выпарной батареи, представленной выпарными аппаратами с принудительной циркуляцией (Источник: составлено автором./Source: compiled by the author.):

$$\frac{c}{W} = \frac{p}{Q_H^p} \cdot \left( \frac{D_j + N_{ци}}{\eta} \right) + (p_f \cdot F + p_{ци} \cdot n) \cdot \left( \frac{A_o}{\tau \cdot 3600} \right),$$

где  $C$  – стоимость выпаривания, руб./кг (руб/кг) выпаренной воды;  $p$  – стоимость топлива, поступающего в выпарную установку с греющим паром, руб./кг (руб/кг);  $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания лигнина, Дж/кг;  $\eta$  – КПД котла, %;  $D_i$  – удельные эксергетические потери, кДж/с;  $N_{ци}$  – общая удельная мощность циркуляционных насосов, кВт;  $P_f$  – стоимость и изготовление 1 м<sup>2</sup> поверхности, руб/м<sup>2</sup>;  $F$  – суммарная поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $A_o$  – доля амортизационных отчислений от общей начальной стоимости оборудования;  $\tau$  – количество рабочих часов в году;  $p_{ци}$  – стоимость циркуляционного насоса, руб;  $n$  – число

ступеней выпаривания (циркуляционных насосов);  $W$  - суммарное количество выпаренной воды, кг/кг.

Приняты следующие значения: стоимость лигнина  $P = 2$  руб/кг, низшая теплота сгорания лигнина  $Q_H^P = 19274$  кДж/кг, КПД котла  $\eta_k = 0,4$ , температура окружающей среды (холодильника)  $T_x = 290$  К, стоимость и изготовление  $1 \text{ м}^2$  поверхности  $P_f = 16000$  руб./ $\text{м}^2$ , доля амортизационных отчислений от общей начальной стоимости (для теплообменного оборудования  $A_o = 0,15$ ), количество рабочих часов в году  $\tau = 8760$ , стоимость циркуляционного насоса  $p_{\text{ци}} = 15$  тыс. руб;

Для описания области поиска оптимальных параметров тепловой схемы используется рототабельный центральный композиционный план. Выделим три варьируемых переменных:  $x_1$  - общая разность температур;  $x_2$  - число ступеней выпаривания;  $x_3$  - общая мощность циркуляционных насосов.

Для определения исходных данных в натуральных значениях примем значения параметров на нулевом уровне, шаги варьирования для каждого параметра и далее по формуле перехода от кодируемых переменных в натуральные переменные заполним матрицу планирования эксперимента в натуральных значениях переменных.

В качестве нулевого уровня примем:  $x_0^{(1)} = 130$  °С - общая разность температур в выпарной батарее;  $x_0^{(2)} = 8$  - число ступеней выпаривания;  $x_0^{(3)} = 2,0$  м/с - скорость раствора на одну трубу;  $\Delta x_1 = 20$  °С,  $\Delta x_2 = 2$  ступени,  $\Delta x_3 = 0,50$  м/с - шаги для общей разности температур, числа ступеней выпаривания выпарной батареи и скорости циркуляции на одну трубу. *Источник: составлено автором./ Source: compiled by the author.*

Для  $\tilde{x}_1 = +1$

$$x_1 = x_0^{(1)} + \Delta x_1 \cdot \tilde{x}_1 = 130 + 20 \cdot 1 = 150 \text{ °С};$$

$$x_2 = x_0^{(2)} + \Delta x_2 \cdot \tilde{x}_1 = 8 + 2 \cdot 1 = 10;$$

$$x_3 = x_0^{(3)} + \Delta x_3 \cdot \tilde{x}_1 = (2,0 + 0,5 \cdot 1) = 2,5 \text{ м/с}$$

Для  $\tilde{x}_1 = -1$

$$x_1 = x_0^{(1)} + \Delta x_1 \cdot \tilde{x}_1 = 130 + 20 \cdot (-1) = 110 \text{ °С};$$

$$x_2 = x_0^{(2)} + \Delta x_2 \cdot \tilde{x}_1 = 8 + 2 \cdot (-1) = 6;$$

$$x_3 = x_0^{(3)} + \Delta x_3 \cdot \tilde{x}_1 = 2,0 + 0,5 \cdot (-1) = 1,5 \text{ м/с}$$

Для  $\tilde{x}_1 = 1,682$

$$x_1 = x_0^{(1)} + \Delta x_1 \cdot \tilde{x}_1 = 130 + 20 \cdot 1,682 = 164 \text{ °С};$$

$$x_2 = x_0^{(2)} + \Delta x_2 \cdot \tilde{x}_1 = 8 + 2 \cdot 1,682 = 11;$$

$$x_3 = x_0^{(3)} + \Delta x_3 \cdot \tilde{x}_1 = (2,0 + 0,50 \cdot (1,682)) = 2,84 \text{ м/с}$$

Для  $\tilde{x}_1 = -1,682$

$$x_1 = x_0^{(1)} + \Delta x_1 \cdot \tilde{x}_1 = 130 + 20 \cdot (-1,682) = 96 \text{ °С};$$

$$x_2 = x_0^{(2)} + \Delta x_2 \cdot \tilde{x}_1 = 8 + 2 \cdot (-1,682) = 4,6 = 5;$$

$$x_3 = x_0^{(3)} + \Delta x_3 \cdot \tilde{x}_1 = (2,0 + 0,50 \cdot (-1,682)) = 1,16 \text{ м/с}$$

Следующим шагом после построения матрицы плана эксперимента для описания области оптимальных параметров является выбор стратегии постановки плана. Затем проводится расчёт выпарной батареи с целью определения необходимых исходных данных для расчёта критерия оптимальности, по полученным исходным данным осуществляется расчёт критерия оптимальности с составлением теплового баланса выпарной батареи и расчётом эксергетических потерь для всех потоков схемы. По завершению этих действий полученные значения критерия оптимальности обрабатываются регрессионным уравнением второго порядка.

Матрица плана эксперимента для описания области оптимальных параметров. В таблицах 1 и 2 приведен план эксперимента в кодовых и действительных значениях.

Таблица 1  
Table 1План эксперимента в кодовых значениях переменных  
*The plan of the experiment in the code values of variables*

	Номер опыта	Матрица плана			Стоимость выпаренной воды, руб/кг. вып. воды
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
Ядро плана	1	-1	-1	-1	0,104
	2	+1	-1	-1	0,015
	3	-1	+1	-1	0,025
	4	+1	+1	-1	0,028
	5	-1	-1	+1	0,110
	6	+1	-1	+1	0,077
	7	-1	+1	+1	0,168
	8	+1	+1	+1	0,171
Звездные точки	9	-1,682	0	0	0,025
	10	+1,682	0	0	0,033
	11	0	-1,682	0	0,043
	12	0	+1,682	0	0,022
	13	0	0	-1,682	0,021
	14	0	0	+1,682	0,036
Центр плана	15	0	0	0	0,027

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Таблица 2  
Table 2План эксперимента в действительных значениях переменных  
*The plan of the experiment in the actual values of the variables*

	Номер опыта	Матрица плана			Стоимость выпаренной воды, руб/кг. вып. воды
		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	
Ядро плана	1	110	6	1,50	0,104
	2	150	6	1,50	0,015
	3	110	10	1,50	0,025
	4	150	10	1,50	0,028
	5	110	6	2,50	0,110
	6	150	6	2,50	0,077
	7	110	10	2,50	0,168
	8	150	10	2,50	0,171
Звездные точки	9	96	8	2,00	0,025
	10	164	8	2,00	0,033
	11	130	5	2,00	0,043
	12	130	11	2,00	0,022
	13	130	8	1,16	0,021
	14	130	8	2,84	0,036
	Центр плана	15	130	8	2,00

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Анализ результатов показывает, что оптимальные значения параметров наступают в тринадцатом опыте, так как они соответствуют минимальной себестоимости выпаривания. Тринадцатый опыт характеризуется значением общего полезного температурного напора 130 градусов при 8-и ступенях выпаривания и скорости циркуляции на одну трубу 1,16 м/с.

Удельную стоимость выпаривания можно описать следующей математической моделью  
Источник: составлено автором. / Source: compiled by the author:

$$\frac{C}{W} = 2,5151 - 0,7509X_1 + 0,3588X_2 + 2,7645X_3 + 1,2750X_1^2 + 1,6000X_1 \cdot X_2 + 0,7000X_1 \cdot X_3 + 1,3810X_2^2 + 2,7250X_2 \cdot X_3 + 1,2750X_3^2$$

Далее необходимо получить аналитический минимум путем решения системы уравнений, составленных путем  $\frac{\partial C}{\partial X_1} = 0; \frac{\partial C}{\partial X_2} = 0; \frac{\partial C}{\partial X_3} = 0$ .

Решение этих уравнений позволяет определить оптимальные значения параметров выпаривания. Оптимальными значениями переменных для рассматриваемой области технико-экономических исходных данных общий температурный напор по батарее составляет 136 град. при 8 ступенях выпаривания и 1,5 м/с скорости раствора на одну трубу. Уточненные результаты хорошо соответствуют данным, полученным в тринадцатом опыте.

Выполнена оптимизация параметров работы выпарной станции.

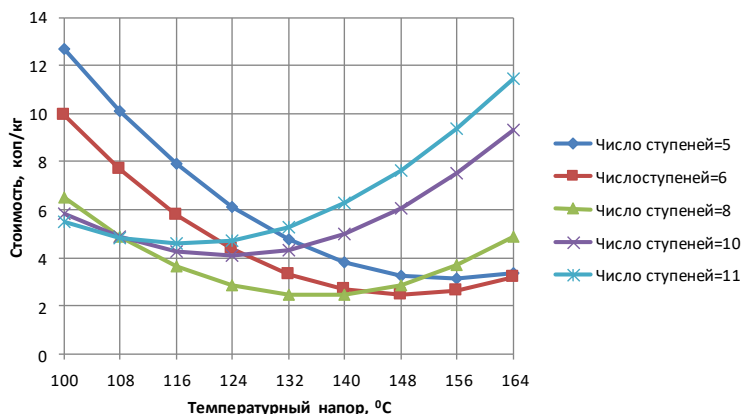


Рис. 2 Зависимость стоимости выпаривания от общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания

Fig. 2 - Dependence of evaporation cost on total temperature pressure with a different number of evaporation steps. Add a caption to English

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для исследования влияния режимных параметров на критерий оптимальности построены графики зависимости критерия оптимальности от: общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания (рис. 2); общего температурного напора при различной скорости пленки; числа ступеней выпаривания при различном общем температурном напоре; числа ступеней выпаривания при различной скорости пленки; скорости пленки при различном числе ступеней выпаривания; скорости пленки при различном общем температурном напоре.

На основе проведенных исследований предложены конструктивные и технологические параметры процесса выпаривания.

### Заключение

1. Определены основные направления по энергетическому совершенствованию производства сульфатной целлюлозы (эксергетический КПД существующей технологии составляет 48 %) – снижение эксергетических потерь от необратимости теплообмена, полный или частичный вывод из технологического процесса содорегенерационного котла, а также реализация принципов биорефайнинга.

2. Предложена новая энергосберегающая и экологически безопасная технология регенерации химикатов. Эксергетический КПД предлагаемой системы возрастает до 90,4 %. Разработаны следующие базовые технологии и аппаратные технические решения: полное или частичное извлечение органических соединений путем обработки черного щелока серной кислотой; вывод из технологического процесса регенерации химикатов всех энергоемких, экологически опасных и капиталоемких процессов (СРК и печи декарбонизации известняка).

3. Проведено научное обоснование схемы выпаривания и анализ области выпаривания при оптимальных параметрах

### Литература

1. Луканин П.В. Эксергетический анализ технологии производства сульфатной целлюлозы /П.В. Луканин, В.Г. Казаков, О.С. Смирнова // Промышленная энергетика. – 2011. №7. С.37-42.

2. Патент №2617569 Российская Федерация, МПК D21C 11/00 (2006.01). Способ кислотно-щелочной переработки черного щелока сульфатного производства целлюлозы: № 2014108629: заявл.05.03.2014: опубл.10.09.2015 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Смирнова О.С.; заявитель СПбГТУРП. – 2с.
3. Патент №2687986 Российская Федерация, МПК D21C 11/00 (2018.08). Способ регенерации натриевых солей из раствора черного щелока при производстве сульфатной целлюлозы: №2018131322: заявл. 30.08.2018: опубл.17.05.2019 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В.; заявитель СПбГУПТД. – 2с.
4. Луканин П.В. Влияние технологических параметров на извлечение органических соединений из растворов черного щелока производства сульфатной целлюлозы / П.В. Луканин, О.В. Федорова, В.Г. Казаков [и др.] // Вестник СПбГУПТД; Сер.1 Естественные и технические науки. – 2016. – №4. – С.49-52.
5. Shyu Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. N74. pp. 220-234.
6. Zhang Z., Way J.D., Wolden C.A., et al. Barium-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonia synthesis // [ACS Sustainable Chemistry and Engineering](#). 2019. Vol. 7, N21. pp.18038-18047.
7. Луканин П.В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий / П.В.Луканин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 3-11.
8. Казаков В.Г. Энерготехнологический комплекс для глубокой переработки древесины / В.Г. Казаков, Е.Н. Громова, А.С. Алешина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 48-58
9. Громова Е.Н.Тепломассообмен на участках свободного хода при сушке бумаги на многоцилиндровых контактно-конвективных установках / Е.Н. Громова, В.Ю. Лакомкин, А.Г. Николаева // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 6. С. 2636-2640.
10. Старжинская Е.В. Промывка смешанного сульфатного мыла нейтрализованной кислой водой / Е.В.Старжинская, А.М. Кряжев., С.И. Третьяков, А.А. Глуханов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 194-202.
11. Пен Р.З. Бумагообразующие свойства пероксидной целлюлозы из пшеничной соломы в композиции с древесной сульфатной целлюлозой / Р.З.Пен, И.Л Шапиро, Ю.А. Амбросович, В.Р. Пен // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 3. С. 227-231.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove // International Journal of Science and Research. 2017. Vol.6, №6. pp. 2200-2207.
13. Hansen E, The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects. R Panwar, R. Vlosky // Taylor & Francis Group (NY); 2017.
14. Sivashanmugam P. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts / P. Sivashanmugam, S. Suresh //Chemical Engineering and Processing. 2007. N46. pp.1292-1298.
15. Бачурихин А.Л. Обезвреживание сточных вод производства сульфатной целлюлозы / А.Л. Бачурихин, И.М. Горицкий, М.Ш. Ефендиев // Водочистка. 2019. № 4. С. 67-70.

#### **Авторы публикации**

**Луканин Павел Владимирович** – др. техн. наук, профессор, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД).

**Казаков Владимир Григорьевич** – др. техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД).

**Федорова Олеся Вячеславовна** – канд. техн. наук, проректор по дистанционному обучению Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД).

**Зверева Эльвира Рафиковна** – др. техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и охрана труда», Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Lukanin PV. Exergetic analysis of sulfate cellulose production technology /P.V. Lukanin, V.G. Kazakov, O.S. Smirnova. *Industrial power engineering*. 2011;7:37-42.
2. Lukanin PV, Kazakov VG, Smirnova OS. Patent No. 2617569 Russian Federation, IPC D21C 11/00 (2006.01). *Method of acid-base processing of black liquor of sulfate pulp production*: No. 2014108629: application 05.03.2014: publ.10.09.2015. applicant SPbGTURP. – 2s.
3. Lukanin PV, Kazakov VG, Fedorova OV Patent No. 2687986 Russian Federation, IPC D21C 11/00 (2018.08). *Method of regeneration of sodium salts from a solution of black liquor in the production of sulfate cellulose*: No.2018131322: application 30.08.2018: publ.17.05.2019 / applicant SPbGUPTD. - 2s.
4. Lukanin PV. The influence of technological parameters on the extraction of organic compounds from solutions of black liquor produced by sulfate cellulose / P.V. Lukanin, O.V. Fedorova, V.G. Kazakov [et al.] *Bulletin of SPbGUPTD*; Ser.1 Natural and Technical Sciences. – 2016; 4:49-52.
5. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;74:220-234.
6. Zhang Z, Way J.D, Wolden C.A, et al. Vagiim-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonium synthesis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019;7(21):18038-18047.
7. Lukanin PV. Evaluation of the energy efficiency of the production of sulfate cellulose by the method of increment of exergies. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;22(2):3-11.
8. Kazakov V.G. Energotechnological complex for deep processing of wood / V.G. Kazakov, E.N. Gromova, A.S. Alyoshina. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2022;14:3 (55):48-58
9. Gromova EN, Lakomkin Y, Nikolaeva AG. Heat and mass transfer in freewheeling areas when drying paper on multi-cylinder contact-convective installations. *Engineering and Physics journal*. 2019;92(6):2636-2640.
10. Starzhinskaya EV, Tretyakov SI, Glukhanov AA, et al. Washing of mixed sulfate soap with neutralized acid water. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*. 2019; 5 (371): 194-202.
11. Pen RZ, Shapiro IL, Ambrosovich YuA, et al. Paper-forming properties of peroxide cellulose from wheat straw in a composition with wood sulfate cellulose. *Coniferous boreal zones*. 2022;40(3):227-231.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove. *International Journal of Science and Research*. 2017;6(6):2200-2207.
13. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects. *Taylor & Francis Group (NY)*; 2017.
14. Sivashanmugam P. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts / P. Sivashanmugam, S. Suresh. *Chemical Engineering and Processing*. 2007;46:1292-1298.
15. Bachurikhin AL. Neutralization of wastewater from the production of sulfate cellulose / A.L. Bachurikhin, I.M. Goritsky, M.Sh. Efendiev. *Water treatment*. 2019;45: 67-70.

### Authors of the publication

**Pavel V. Lukanin** –St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

**Vladimir G. Kazakov** - St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

**Olesya V. Fedorova** - St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

**Elvira R. Zvereva** - Kazan State Power Engineering University.

**Получено** 09.02.2023г

**Отредактировано** 16.02.2023г

**Принято** 28.02.2023г

УДК 656.2, 656.3, 656.4

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ НА УДАЛЕННЫХ И ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Шушпанов <sup>1</sup>И.Н., Пермякова <sup>2</sup>Д.Н., Конюхов <sup>1</sup>В.Ю., Опарина <sup>1</sup>Т.А.

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2785-4332>, [PermyakovaD@student.bmstu.ru](mailto:PermyakovaD@student.bmstu.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ работы заключается в разработке методики бесперебойного транспортного энергоснабжения на удаленных и изолированных участках железнодорожной линии. ЦЕЛЬ. Проанализировать факторы, оказывающие влияние на уровень эксплуатационной работы объектов железнодорожного транспорта на удаленных и изолированных территориях. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи использовались методы математического моделирования в среде КОРТЭС. Объектами исследования являются локомотивы серии 2ЭС5К массой 4192 т, ВЛ85 6588 т и 3ЭС5К массой 7388 т. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе представлена методика расчета для обеспечения своевременного и бесперебойного энергоснабжения. Данные результаты особенно актуальны для труднодоступных районов, в которых любой выход из строя энергетической системы может привести к полной изоляции территории. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Рассмотрена организация работы удаленного участка железнодорожной линии Восточного полигона с учетом применения гибридной системы интервального регулирования движения поездов, работа систем тягового энергоснабжения при различных размерах поездопотоков. Проведена проверка массы состава грузового поезда при условии трогания с места при действующей системе тягового энергоснабжения для максимального значения подъема. Рассчитаны тяговые и энергетические показатели использования электроподвижного состава с учетом максимального использования его мощности. Выявлены ограничивающие участки железнодорожной линии при реализации вариантных графиков движения поездов с напряжением в контактной сети ниже предельно допустимого, что обуславливает не только реконструктивные мероприятия системы тягового энергоснабжения, но и тягового электрооборудования электровоза.

**Ключевые слова:** объекты железнодорожного транспорта; система тягового энергоснабжения; пропускная способность; Восточный полигон; тяговые расчеты; перегрев обмоток тяговых электродвигателей; график движения поездов; тяговое электрооборудование электровоза; иконтактная сеть.

**Для цитирования:** Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Современные подходы к организации энергоснабжения железнодорожных линий на удаленных и изолированных территориях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 12-22.

## MODERN APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF POWER SUPPLY OF RAILWAY LINES IN REMOTE AND ISOLATED TERRITORIES

IN. Shushpanov<sup>1</sup>, DN. Permyakova<sup>2</sup>, VYu. Konyukhov<sup>1</sup>, TA. Oparina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract:** ACTUALITY of the work lies in the development of a methodology for uninterrupted transport power supply on remote and isolated sections of the railway line. OBJECT. To analyze the factors influencing the level of operational work of railway transport facilities in remote and isolated territories. METHODS. When solving the problem, mathematical modeling methods were used in the CORTES environment. The objects of the study are locomotives of the 2ES5K series

*weighing 4192 tons, VL85 6588 tons and 3ES5K weighing 7388 tons. RESULTS. The paper presents a calculation method to ensure timely and uninterrupted power supply. These results are especially relevant for hard-to-reach areas in which any failure of the energy system can lead to complete isolation of the territory. conclusion. The organization of work of a remote section of the railway line of the Eastern polygon is considered, taking into account the use of a hybrid system of interval regulation of train traffic, the operation of traction power supply systems at different sizes of train flows. The mass of the freight train composition was checked under the condition of starting with the current traction power supply system for the maximum lift value. Traction and energy indicators of the use of electric rolling stock are calculated taking into account the maximum use of its power. The limiting sections of the railway line have been identified when implementing variant schedules of trains with a voltage in the contact network below the maximum permissible, which causes not only reconstructive measures of the traction power supply system, but also traction electrical equipment of an electric locomotive.*

**Keywords:** railway transport facilities; traction power supply system; capacity; Eastern landfill; traction calculations; overheating of traction motor windings; train schedule; electric locomotive traction equipment; contact network.

**For citation:** Kazakov VG, Lukanin PV, Fedorova OV, Zvereva ER. Energy-saving technologies in the production of sulphate cellulose in the pulp and paper industry. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):12-22.

#### **Введение. Литературный обзор**

Оптимизация эксплуатационной работы объектов железнодорожного транспорта на удаленных и изолированных территориях страны производится, прежде всего за счет повышения роли технологических и организационных основ перевозочного процесса – плана формирования, графика движения поездов, то есть внедрения новой комплексной технологии управления движением поездов, что невозможно без повышения роли системы тягового энергоснабжения.

Прирост уровня влияния на экономику страны организации транспортного обслуживания на восточном направлении, увеличение грузопотока в рамках инфраструктуры Восточного полигона железных дорог требует новых подходов к процессу поездообразования и поездопродвижения. С целью прироста пропускных способностей транспортной инфраструктуры в ОАО «Российские железные дороги» реализуется программа инновационного развития, которая ставит своей целью обеспечение единой технологии перевозочного процесса, что невозможно без повышения роли системы тягового энергоснабжения.

В целях повышения качества транспортного обслуживания, ускорения продвижения грузов и вагонопотоков, улучшения показателей использования подвижного состава, рационального использования пропускных способностей инфраструктуры в ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») реализуется программа инновационного развития, направленная на обеспечение единой технологии перевозочного процесса и оптимизацию эксплуатационных затрат. Одним из основных эксплуатационных показателей работы железнодорожного транспорта является время простоя подвижного состава, поэтому вопросам эффективной организации работы вагонного парка на удаленных железнодорожных участках уделяется большое внимание [1-3].

Решение данной важнейшей задачи возможно только при перестройке системы организации перевозочного процесса за счет проведения комплекса мероприятий инновационного характера, технических, технологических и организационных, которые позволят обеспечить поэтапный переход на новую технологию организации движения поездов на данных участках [4, 5].

Анализ факторов, оказывающих влияние на уровень эксплуатационной работы объектов железнодорожного транспорта на удаленных и изолированных территориях.

Выполненный авторами анализ факторов, оказывающих влияние на уровень эксплуатационной работы объектов железнодорожного транспорта на удаленных и изолированных территориях страны позволил сформировать следующие выводы:

1. Используемые на данных участках стандартные технологии управления парком грузовых вагонов определяют основную нагрузку на инфраструктуру железных дорог в целом, что непосредственно отражается при расчете основных эксплуатационных показателей работы ОАО «РЖД».



2. Эффективность использования грузовых вагонов определяет следующие системные риски:

- сравнительно низкая степень продвижения поездопотоков в следствии их формирования без учёта ограничений пропускной способности железнодорожных линий и станционных устройств по причине ограничений по существующей системе тягового энергоснабжения;

- низкий процент использования как технической, так и отправительской маршрутизации, использования длинносоставных и тяжеловесных поездов, причинами чего является недостаточность мощностей систем тягового энергоснабжения отдельных объектов инфраструктуры;

- по причине ограниченных возможностей по оперативному регулированию порожних вагонопотоков, необходимость создания в местах погрузки существенных резервов порожних вагонов;

- несовершенство системы управления порожним парком вагонов среди операторов подвижного состава, отсутствие внешнего контроля.

Увеличение степени влияния на экономику страны работы Восточного полигона железных дорог, значительное наращивание грузонапряжённости железных дорог Восточного полигона требует наличия резервов в использовании технических средств и инфраструктурного комплекса [2, 6-8].

Влияние вышеперечисленных факторов и прогнозных рисков отражается ухудшением эксплуатационных показателей использования как вагонного парка, так и инфраструктуры Восточного полигона ОАО «РЖД» и требует технико-экономического обоснования использования современных систем интервального регулирования движения поездов на данных участках железнодорожных линий, повышения роли системы тягового энергоснабжения [9, 10].

Гибридная система интервального регулирования движения поездов предназначена для реализации алгоритмов интервального регулирования с уменьшенными интервалами попутного следования поездов [6, 11, 12].

Технологический эффект от внедрения гибридной системы управления движением поездов определяется следующими показателями:

- сокращение интервалов попутного следования поездов;
- повышение пропускной способности и увеличение объемов перевозок;
- реализация гибкой технологии восстановления графика движения;
- повышение уровня безопасности движения;
- повышение уровня защиты при передаче ответственной информации;
- повышение уровня безотказности систем управления движением;
- создание платформы для внедрения системы автоматического ведения поездов.

#### *Постановка задачи исследования*

Задача данного исследования является весьма актуальной, особенно с практической точки зрения. Разработка методики организации энергоснабжения железнодорожных линий на изолированных территориях позволит существенно сократить риски полной изоляции территорий. При этом применяемый структурированный подход к разработке энергоснабжения удаленных регионов обеспечит предотвращение аварийных ситуаций, и сделает обслуживание железнодорожного полотна экономически выгодным.

Возможность применения гибридной системы интервального регулирования движения поездов и работу систем тягового энергоснабжения при различных размерах поездопотоков рассмотрим на примере удаленного участка железнодорожной линии 3 – И, входящего в состав Восточного полигона, его протяженность составляет 238,3 километра. Большая пропускная способность достигается за счет расположения на линии двух главных путей. В него входят два диспетчерских участка, 22 железнодорожные станции [13].

#### *Материалы и методы*

Построение графика движения поездов и анализ его показателей [14], с учетом действующей системы энергоснабжения доказал возможность пропуска в четном и нечетном направлениях – 100 и 93 поездов. Наличная пропускная способность составила 125, а потребная 152 и 147 поездов в четном и нечетном направлениях, соответственно. Участковая скорость в четном направлении – 53,4 км/ч, в нечетном – 51,8 км/ч. Техническая скорость в четном направлении – 53,6 км/ч, в нечетном – 52,31 км/ч. Коэффициент участковой скорости в четном /нечетном направлении – 0,996/0,991. Основные параметры рассматриваемых серий локомотивов представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1Основные параметры рассматриваемых серий локомотивов\*  
Main parameters of the locomotive series in question

Технические характеристики	Значение		
	ВЛ85	ВЛ80р	2ЭС5К
Мощность электровоза при продолжительном режиме функционирования, кВт	9360	6160	6120
Мощность электровоза при часовом режиме функционирования, кВт	10020	6520	6560
Длина электровоза по осям автосцепок, мм	45000	32840	35004
Сила тяги часового режима, тс	74	45,1	47,3
Сила тяги продолжительного режима, тс	67	40,9	43,1
Скорость продолжительного режима, км/ч	50	53,6	51
Масса электровоза, т	288	192	192
Сила тяги при трогании с места, тс	95,1	74,6	69,1

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

## Тяговый расчет в математической среде КОРТЭС для участка 3 – И

На основании полученных режимных карт рассматриваемого участка 3 – И первым этапом явилось внесение данных профиля в математическую среду КОРТЭС [15-17]. Очевидно, что определение возможности трогания с места с учетом заявленной массы состава и серии локомотива требует внесения данных о крутизне руководящего подъема. Рассматриваемый участок, как в четном, так и нечетном направлении имеет такие уклоны крутизной до 10%.

Основной задачей тяговых расчетов помимо тех, что изложены выше, является определение параметров тока электровозов всех серий, используемых для организации пропуска поездов на рассматриваемом участке, а также тяговых электродвигателей подвижного состава, величина которых определяет, перегрев обмоток тяговых электродвигателей, потребный расход электроэнергии. Также расчетным путем исчисляются тяговые и энергетические показатели использования электроподвижного состава с учетом максимального использования его мощности, кинетической и потенциальной энергии грузового поезда.

Вес грузового поезда по условиям трогания с места превышает массу состава, следовательно, поезд установленного на рассматриваемом участке веса беспрепятственно может тронуться с места на максимальном подъеме железнодорожного пути.

Проверка массы состава при условии трогания с места при действующей системе тягового энергоснабжения для максимального значения подъема представлена в таблице 2. На основе данных, представленных в таблице, в дальнейшем проводилось моделирование работы системы.

Таблица 2  
Table 2Проверка массы состава при условии трогания с места\*  
Test of the mass of the convoy provided that it is started

Серия локомотива	ВЛ85	3ЭС5К	2ЭС5К
Сила тяги локомотива при трогании,	932		678
Удельное сопротивление состава, Н/кН	1,0874		
Руководящий уклон, ‰	10		
Установленный вес поездного локомотива, т	288	192	
Массы состава при условии трогания с места на расчетном подъеме, т	8280,76		6041,5
Масса состава, т	6500	7100	4192

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

В математической среде КОРТЭС внесены данные о массе состава (6500, 7100 и 4000 тонн) с акцентом на 100 % роликовые подшипники. Для электровоза серии 2ЭС5К с массой состава 4192 т, 192 т – масса самого электровоза, рисунках 1а и 1б.



Рис.1, а – Четное направление движения для электровоза серии 2ЭС5К, масса 4192 т\* *Fig.1, a – Even direction of movement for an electric locomotive of the 2ES5K series, weight 4192 tons\**  
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

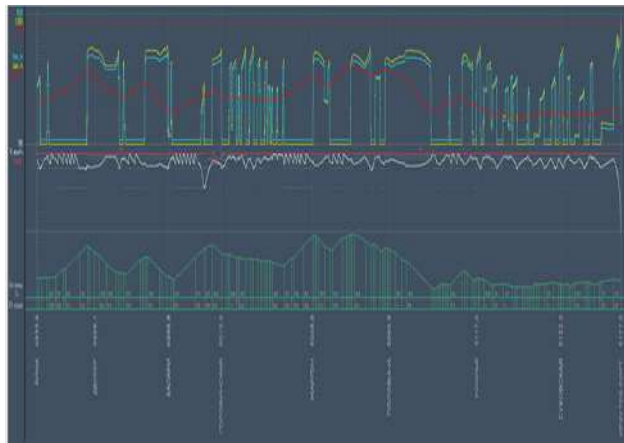


Рис.1, б - Нечетное направление движения для электровоза серии 2ЭС5К, масса 4192 т\* *Fig.1, b - Odd direction of movement for the 2ES5K series electric locomotive, weight 4192 tons\**  
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для электровоза серии ВЛ85 с массой состава 6588 т, 288 т – масса самого электровоза, рисунках 2а и 2б.



Рис.2, а – Четное направление движения для электровоза серии ВЛ85, масса 6588 т\* *Fig.2, a – Even direction of movement for an electric locomotive of the VL85 series, weight 6588 tons\**  
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

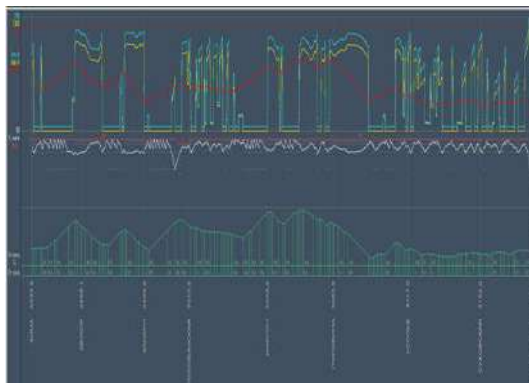


Рис.2, б – Нечетное направление движения для электровоза серии ВЛ85, масса 6588 т\* *Fig.2, b – Odd direction of movement for an electric locomotive of the VL85 series, weight 6588 tons\**

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Для электровоза серии ЗЭС5К с массой состава 7388 т, 288 т – масса самого электровоза, рисунках 3а и 3б.



Рис.3, а – Четное направление движения для электровоза серии ЗЭС5К, масса 7388 т\* *Fig.3, a – Even direction of movement for an electric locomotive of the 3ES5K series, weight 7388 tons\**

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

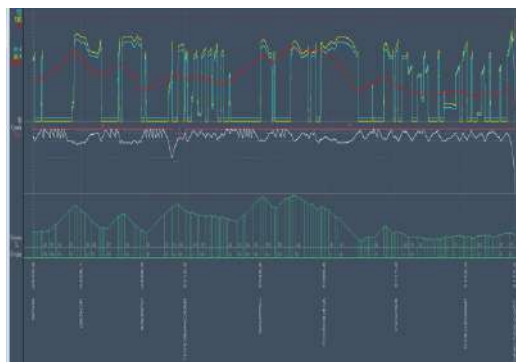


Рис.3, б – Нечетное направление движения для электровоза серии ЗЭС5К, масса 7388 т\* *Fig.3, b – Odd direction of movement for an electric locomotive of the 3ES5K series, weight 7388 tons\**

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

### **Результаты и их обсуждение**

На основании представленных отчетов определены значения максимального перегрева обмоток тяговых электродвигателей с акцентом на профиль железнодорожного пути, которые не превышают предельно допустимых. Представленные на рисунках 1-3 данные свидетельствуют, что рассмотренные серии локомотивов с учетом используемой массы состава могут быть использованы для эффективной организации движения поездов на рассматриваемом участке.

Выполненные расчеты позволяют перейти к построению существующего и вариантных графиков движения поездов с целью оценки возможностей инфраструктуры системы тягового энергоснабжения [18].

Уменьшение межпоездного интервала с 10 до 5 минут позволили акцентировать внимание на тех местах, которые нуждаются в реконструктивных мероприятиях (рисунок 4), выполнить расчет показателей (табл. 3).

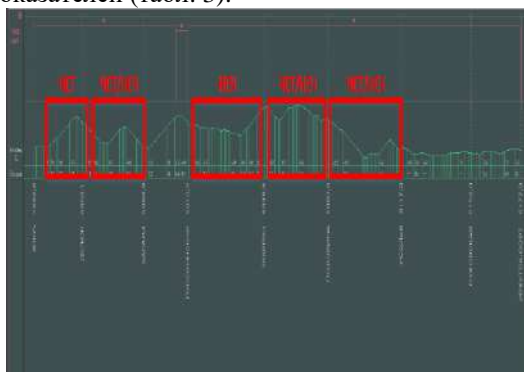


Рис. 4. Участки системы тягового энергоснабжения, требующие усиления при росте поездопотока и снижении межпоездного интервала\*  
 Fig. 4. Sections of the traction power supply system that require strengthening with an increase in train traffic and a decrease in the inter-train interval\*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Таблица 3  
 Table 3

Показатели вариантных графиков движения поездов\*  
 Indicators of variant train schedules

Наименование показателя	Единицы измерения	10 минут		9 минут		8 минут	
		чет	неч	чет	неч	чет	неч
Количество поездов:							
грузовые	поезд	100	93	105	97	110	105
пассажирские	поезд	13	14	13	14	13	14
пригородные	поезд	11	11	11	11	11	11
сборные	поезд	2	2	2	2	2	2
Участковая скорость	км/ч	53,40	51,84	53,78	52,12	53,98	52,78
Техническая скорость	км/ч	53,60	52,31	53,93	52,83	54,02	53,15
Коэффициент участковой скорости	-	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99
Наличная пропускная способность	пар поездов	125		139		157	
Потребная пропускная способность	поездов	152	147	157	151	162	159
Наименование показателя	Единицы измерения	7 минут		6 минут		5 минут	
		чет	неч	чет	неч	чет	неч
	поезд	125	117	142	126	160	145
	поезд	13	14	13	14	13	14
	поезд	11	11	11	11	11	11
	поезд	2	2	2	2	2	2
Участковая скорость	км/ч	54,07	53,86	54,14	53,95	54,26	53,95
Техническая скорость	км/ч	54,09	53,89	54,14	53,95	54,26	53,95
Коэффициент участковой скорости	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Наличная пропускная способность	пар поездов	179		209		251	
Потребная пропускная способность	поездов	177	171	194	180	212	199

\* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На отмеченных участках при реализации вариантных графиков движения поездов были получены значения напряжения в контактной сети ниже предельно допустимого, что обуславливает не только реконструктивные мероприятия системы тягового энергоснабжения, но и тягового электрооборудования электровоза.

На графиках поездов, разработанных с уменьшением интервала и увеличением объемов работы наличная пропускная способность увеличивается в среднем на 15 %. Максимальное увеличение пропускной способности составило 60 %. Пропускная способность максимально выросла на 60%. Участковая и техническая скорости возросли на 2 и 4 процентов соответственно. [14, 18-20]. Прирост грузооборота составил 9185,47 млн. т-км/год, что вызвано увеличением пропускной способности на 25 грузовых поезда в сутки.

Значение себестоимости работ по участку в условиях изменения межпоездного интервала снизилось на 0,087 руб./10 т-км. Прирост величины доходов за счет увеличения объема грузооборота, составит 12951,5 млн. руб./год. Экономический эффект ОАО «РЖД» – 11786,46 млн. руб./год.

#### **Выводы**

В данной работе была описана методика, позволяющая оказывать своевременное и бесперебойное энергоснабжение, в том числе и на удаленных и изолированных территориях. Основой для разработки методики послужило моделирование в математической среде КОРТЭС.

Очевидно, что реализация поэтапной реконструкции в комплексе с современными системами интервального регулирования позволят реализовать минимально возможный межпоездной интервал (5 мин.).

Руководствуясь полученными данными следует, что вопросы модернизации и усиления системы тягового энергоснабжения, тягового электрооборудования электровоза носят первоочередный характер. Оценка работы электрического полупроводникового вариатора на электровозе позволит в режимах управления уменьшить нагрузку на питающую сеть. Выявленные направления модернизации требуют комплексных технико-экономических расчетов.

Применение программного комплекса КОРТЭС позволило определить направление исследования и отсеять малоэффективные варианты еще на этапе построения модели. Поэтому результаты данной статьи могут служить базой для дальнейших исследований при помощи других компьютерных систем. Отдельную актуальность они приобретут в совокупности с такими методами, как анализ системы при помощи нейронных сетей и машинного обучения. Также будет актуально использовать результаты для построения более развернутой математической модели. В этом случае, возможно, будет сопоставить результаты и оптимизировать исходные модели.

#### **Литература**

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (дата обращения: 03.10.2022). – Текст: электронный.
2. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области / Ю.И. Солюянов, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, В.И. Солюянов, А.Н. Горлов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 20-28.
3. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation / Y. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, 11–13 марта 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 9388018.
4. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a «virtual coupling» technology / V. A. Olentsevich, N. P. Astashkov, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger, A. I. Karlina // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.
5. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, R. Insa Franco, V. Yepes // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 222. – P. 153-162.
6. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, M. G. Shtayger and A. I. Karlina IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020),

Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.

7. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.

8. Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks / A. Akhmetshin, S. Gaponenko, G. Marin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 241-245.

9. Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок / Ю. И. Солюянов, А. Р. Ахметшин, В. И. Солюянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 156-166.

10. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей / В. В. Романова, С. В. Хромов, К. В. Суслов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 80-89.

11. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями 25 кВ на многопутных участках / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, К. В. Суслов, Д. А. Середкин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 2(54). – С. 3-14.

12. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 184-194.

13. Optimal Operation of Electrified Railways with Renewable Sources and Storage / S. R. Salkuti // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 16. – No 1. – P. 239-248.

14. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. приказом Первым Вице – президентом ОАО «РЖД», 2010. – 124 с.

15. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. В. Черепанов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – № 1(156). – С. 31-43.

16. Тяговые расчеты. Справочник / Под ред. П.Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987.

17. Инструкция о порядке выбора параметров и мест размещения установок продольной и поперечной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока №ЦЭТ-2/52\_(П-04/11): утв. Управлением электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры - филиала ОАО «РЖД»: ввод в действие с 28.11.2011. – М.: Управление электрификации и электроснабжения, 2011. – 17 с.

18. Организация движения на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов / Ф.П. Кочнев, В.М. Акулиничев, А.М. Макаровичкин. – М.: Транспорт, 2001. – 568 с.

19. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network / T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchyonok, L. A. Astrakhantsev, V.A. Tikhomirov, N.P. Astashkov, A.L. Martusov, M.E. Alekseev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.

20. Энергетическая эффективность электрической тяги поездов / Н. А. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1(61). – С. 144-156.

#### **Авторы публикации**

**Шушпанов Илья Николаевич** – канд. тех. наук, доцент ИрННТУ, заместитель руководителя Национального исследовательского комитета С1 «Планирование развития энергосистем и экономика» Российского национального комитета CIGRE.

**Пермьякова Дарья Николаевна** – магистрант МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Конюхов Владимир Юрьевич** – канд. тех. наук, профессор ИрНИТУ, почётный работник сферы образования Российской Федерации.

**Опарина Татьяна Александровна** – программист 1 категории ИрНИТУ.

### References

1. *Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030*. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (date of access: 03.10.2022). – Text: electronic.
2. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR., et al. Analysis of the actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region. *Industrial Energy*. 2022;4:20-28.
3. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. *Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation*. Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021: 3, Moscow, March 11–13, 2021. – Moscow, 2021. – P. 9388018.
4. Olentsevich VA, Astashkov NP, Akhmetshin AR, et al. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a virtual coupling technology. *Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, June 15–16, 2021*. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.
5. P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, R. Insa Franco A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. *Journal of Cleaner Production*. – 2019;222:153-162.
6. Akhmetshin AR, Suslov KV, Astashkov NP, et al. *Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.
7. Astashkov NP, Olentsevich VA., Akhmetshin AR. *Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.
8. Akhmetshin A., Gaponenko S., Marin G. *Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks*. Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, May 17–21, 2021. – Sochi, 2021. – P. 241-245.
9. Soluyanov YuI., Akhmetshin AR., Soluyanov VI. Energy-resource-saving effect in power supply systems of residential complexes from the actualization of electrical load standards *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(1):156-166.
10. Romanova VV., Khromov SV., Suslov KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(3):80-89.
11. Buyakova NV, Kryukov AV, Suslov KV, et al. Modeling of electromagnetic fields created by 25 kV traction networks on multi-track sections. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2022;14(2(54):3-14.
12. Buyakova NV, Kryukov AV, Suslov KV Investigation of the operating modes of an isolated power supply system with controlled distributed generation installations, electric power storage and motor load. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(5):184-194.
13. Salkuti SR. Optimal Operation of Electrified Railways with Renewable Sources and Storage. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2021;16(1):239-248.
14. *Instructions for calculating the available capacity of railways: approved by the order of the First Vice-President of JSC Russian Railways*, 2010. – 124 p.
15. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV. Operational determination of static stability reserves in power supply systems with distributed generation installations. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2021;25:1(156):31-43.
16. *Traction calculations*. Guide / Edited by P.T. Grebenyuk. – M.: Transport, 1987.
17. *Instructions on the procedure for selecting parameters and locations of longitudinal and transverse compensation installations in AC traction power supply systems No. CEt-2/52\_(P-*



04/11): approved. Department of Electrification and Power Supply of the Central Directorate of Infrastructure - branch of JSC «Russian Railways»: commissioning from 28.11.2011. – М.: Department of Electrification and Power Supply, 2011. – 17 p.

18. Kochnev FP, Akulinichev VM, Makarochkin AM. *Organization of movement on railway transport*: Textbook for universities. М.: Transport, 2001. – 568 p.

19. Alekseeva TL, Ryabchyonok NL, Astrakhantsev LA, et al. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.

20. Ryabchenok NA., Alekseeva TL., Astrakhantsev LA. Energy efficiency of electric traction of trains. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019;1(61):144-156.

#### **Authors of the publication**

*Ilya N. Shushpanov* – Irkutsk National Research Technical University.

*Darya N. Permyakova* – Bauman Moscow State Technical University.

*Vladimir Yu. Konyukhov* – Irkutsk National Research Technical University.

*Tatiana A. Oparina* – Irkutsk National Research Technical University.

*Получено* *03.02.2023г*

*Отредактировано* *13.02.2023г*

*Принято* *27.02.2023г*

УДК 656.222.6

## ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА В УСЛОВИЯХ ПРИРОСТА ГРУЗОПОТОКА

Оленцевич<sup>1</sup> В.А., Гусева<sup>2</sup> Е.А., Константинова<sup>2</sup> М.В.

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Россия

olencevich\_va@mail.ru

**Резюме:** Актуальность. С целью освоения новых объемов грузопотока необходимо максимально усиливать пропускную способность данного железнодорожного направления, что возможно в основном за счет модернизации действующей энергосистемы объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, строительства дополнительных разъездов, двухпутных вставок и новых железнодорожных станций.

**ЦЕЛЬ.** Целью представленного научного исследования являлось рассмотрение способов увеличения пропускной и перерабатывающей способностей объектов транспортной инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» в рамках прироста грузопотока Восточного полигона железных дорог за счет проверки технических возможностей действующих систем энергообеспечения. Представленные научные исследования нацелены на оптимальное использование резервов тяговой мощности локомотивного парка и повышение эффективности наличной пропускной способности инфраструктуры железных дорог. **МЕТОДЫ.** Методологической базой исследования послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых в области организации движения поездов и эффективного обслуживания объектов транспортной инфраструктуры, теории управления проектами, теории рисков, теории надежности. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Полученные авторами результаты научных исследований, проведенных на ограничивающем участке Восточного полигона железных дорог в условиях пропуска поездов повышенной длины, позволили выявить, что показатели рабочего режима системы тягового энергоснабжения имеют предельные значения и не позволяют увеличивать размеры грузопотоков на данном направлении движения. Действующий инфраструктурный комплекс позволяет увеличить пропускную способность заданного участка не более чем на 4 пары поездов в сутки, что говорит об актуальности скорейшей модернизации системы тягового энергоснабжения БАМа и Транссиба. **ВЫВОДЫ.** Проблемы организации работы энергосистемы объектов железнодорожного транспорта Восточного полигона в условиях прироста грузопотока становятся особенно актуальным. В настоящее время использование технического потенциала магистрали находится на пределе. С целью освоения новых объемов грузопотока необходимо максимально усиливать пропускную способность данного железнодорожного направления, что возможно в основном за счет модернизации действующей энергосистемы объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, строительства дополнительных разъездов, двухпутных вставок и новых железнодорожных станций.

**Ключевые слова:** Восточный полигон железных дорог; энергоресурсы; направляемые на тягу поездов; энергосистема объектов инфраструктура; пропускная способность участка; предельные значения; тяговые расчёты.

**Для цитирования:** Оленцевич В.А., Гусева Е.А., Константинова М.В. Проблемы организации работы энергосистемы объектов железнодорожного транспорта восточного полигона в условиях прироста грузопотока. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 23-36.

## PROBLEMS OF ORGANIZING THE WORK OF THE POWER SYSTEM OF RAILWAY TRANSPORT FACILITIES OF THE EASTERN POLYGON IN TERMS OF CARGO TRAFFIC GROWTH

Olentsevich VA.<sup>1</sup>, Guseva EA.<sup>2</sup>, Konstantinova MV.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

olencevich\_va@mail.ru

**Abstract:** *Relevance. In order to develop new volumes of freight traffic, it is necessary to maximize the capacity of the railway line, which is possible mainly due to modernization of the existing energy system of railway infrastructure facilities, construction of additional intersections, double track inserts and new railway stations. THE PURPOSE.. The purpose of the presented scientific research was to consider ways to increase the throughput and processing capacity of the transport infrastructure facilities of JSC "Russian Railways" within the framework of the increase in freight traffic of the Eastern Polygon of Railways by checking the technical capabilities of existing power supply systems. The presented scientific research is aimed at the optimal use of the reserves of traction power of the locomotive fleet and increasing the efficiency of the available capacity of the railway infrastructure. METHODS. The methodological basis of the research was the scientific work of domestic and foreign scientists in the field of organization of train traffic and efficient maintenance of transport infrastructure facilities, project management theory, risk theory, reliability theory. RESULTS. The results of scientific research obtained by the authors, conducted on the limiting section of the Eastern polygon of railways in conditions of passing trains of increased length, revealed that the indicators of the operating mode of the traction power supply system have limiting values and do not allow increasing the size of cargo flows in this direction of movement. The existing infrastructure complex allows increasing the capacity of a given section by no more than 4 pairs of trains per day, which indicates the urgency of the earliest modernization of the traction power supply system of BAM and Transsib. CONCLUSION. The problems of organizing the work of the power system of the railway transport facilities of the Eastern polygon in the conditions of an increase in cargo traffic are becoming particularly relevant. Currently, the use of the technical potential of the highway is at its limit. In order to develop new volumes of cargo traffic, it is necessary to maximize the capacity of this railway direction, which is possible mainly due to the modernization of the existing power system of railway infrastructure facilities, the construction of additional sidings, double-track inserts and new railway stations.*

**Keywords:** *The Eastern polygon of railways, energy resources directed to train traction, the power system of infrastructure facilities, the capacity of the site, limit values, traction calculations.*

**For citation:** Olentsevich VA, Guseva EA, Konstantinova MV. Problems of organizing the work of the power system of railway transport facilities of the eastern polygon in terms of cargo traffic growth. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57): 23-36.

### **Введение**

ОАО «Российские железные дороги» (далее – ОАО «РЖД») входит в тройку крупнейших потребителей топливных и энергетических ресурсов Российской Федерации, так в 2020 году объемы потребления Холдингом электрической энергии, направляемой на тяговые нужды, составили 53 млрд кВт·ч, что более чем 5 % от суммарной величины электропотребления страны [1-3].

Начиная с 2004 года объемы грузовых перевозок ОАО «РЖД» в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона увеличились почти в три раза и продолжают наращиваться ежегодно, как за счет внутреннего грузопотока, так и за счет прироста транзитного направления. В период когда расчетные прогнозные значения поездопотоков по Транссибирской и Байкало-Амурской (далее БАМ) магистралям достигли критических отметок и дальнейший их прирост не позволил бы эффективно справляться с предстоящими объемами грузовых перевозок, актуальной проблемой стала тема увеличения пропускной способности в «узких местах» объектов транспортной

инфраструктуры, а также преобразование организации перевозочного процесса, повсеместное внедрение цифровых технологий, автоматизация отрасли [1, 2, 4, 5].

С 2015 года начались первые шаги к переходу от региональных принципов управления к полигонному планированию и организации движения поездов – открылся Центр управления перевозками Восточного полигона, основной задачей которого явилось оптимизировать работу вагонного парка, стабилизировать тяговые ресурсы и деятельность энергосистем объектов транспортной инфраструктуры данного направления железных дорог России, усилить состояние всех видов ремонтных баз. Центр позволил соединить воедино и четко контролировать процессы по организации движения поездов на четырех крупнейших дорогах ОАО «РЖД».

На втором этапе усиления пропускных способностей объектов транспортной инфраструктуры запущен проект модернизации БАМа и Транссиба, который включил в себя два крупнейших проекта, основная цель которых – прирост уровня пропускной способности до 250 млн тонн в год. Реализация проекта рассчитана до конца 2025 года. С целью его скорейшей реализации и достижения плановых показателей работы инфраструктуры необходимо не только строить дополнительные железнодорожные пути, тоннели, мосты, вторые главные пути, развязки, развивать железнодорожные станции, что позволит существенно повысить основной показатель работы отрасли – скорость движения поездов, но и в первую очередь рассматривать вопросы усиления существующей энергосистемы объектов железнодорожного транспорта в рамках работы Восточного полигона. Проведение данных реконструктивных мероприятий требует больших капиталовложений, но является стратегически важным для дальнейшего устойчивого развития экономики России [3-6].

В настоящее время использование технического потенциала магистрали находится на пределе. По ней перевозятся около 14 миллионов тонн грузов в год. Исследуя заявки грузоотправителей, можно сделать вывод, что в перспективе объемы перевозок по северной дороге могут увеличиться в разы.

#### ***Материалы и методы***

*Проблемы организации работы энергосистемы объектов железнодорожного транспорта Восточного полигона*

Планы ОАО «РЖД» по расширению БАМа и Транссиба до пропускной способности 180 млн тонн к 2024 году потребуют ввода дополнительной генерации и нескольких тысяч километров электросетей вдоль трасс. При этом вопрос стоимости и механизмов финансирования строительства сетевой инфраструктуры пока не решён. ОАО «РЖД» совместно с Минэнерго необходимо пересмотреть существующие проектные схемы строительства дополнительной генерации для энергоснабжения Восточного полигона с целью увеличить объём поставок электроэнергии на БАМе и Транссибе. Согласно плановым показателям развития ОАО «РЖД», до 2030 г. для обеспечения потребностей БАМа и Транссиба необходимо соорудить свыше 4 тыс. км электросетей.

В проекте модернизации БАМа и Транссиба тема развития инфраструктуры – это одна из частей проблемы, которая сегодня существует, данный вопрос должен развиваться своим путём, не завязываясь с проблемами электроэнергетики. Если плановый грузопоток предусматривает сооружение вторых главных путей, то необходимо так же предусмотреть изменение количества или удлинения приёмо-отправочных путей железнодорожных станций, выполнить сопутствующие работы по модернизации прилегающей инфраструктуры, произвести усиление контактной сети. Со стороны инфраструктурного комплекса должна быть полная готовность к организации движения поездов в рамках плановой политики [4-8].

Энергосистема объектов железнодорожного транспорта является сложноструктурированным транспортным комплексом, выполняет огромный объём бесперебойной работы и находится в регулярном взаимодействии с достаточно большим числом хозяйствующих субъектов регионального уровня. Особенностью работы энергосистемы ОАО «РЖД» является географическая разобщённость потребителей. Эффективность деятельности также осложняет существующая технология работы системы, поскольку в соответствии со своей спецификой работы она разделена на два основных вида деятельности:

- реализация услуг по энергоснабжению объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования;
- реализация услуг по снабжению электроэнергией сторонних потребителей [9-11].

Такое разделение приводит к частым отклонениям от исполнения требований

действующего законодательства РФ в сфере раздельного учета затрат по электросетевой деятельности и технологическому присоединению потребителей к электросетям [9, 12].

Результаты подробного анализа работы энергосистем железнодорожного транспорта с 2016 по 2020 гг. позволили определить основную проблему функционирования объектов транспортной инфраструктуры стационарной электроэнергетики – существенные потери электрической энергии при передаче ее железнодорожным потребителям ресурсов [12]. Значения суммарных годовых потерь электроэнергии в процессе передачи ее железнодорожным потребителям представлены на рисунке 1 [9-13].

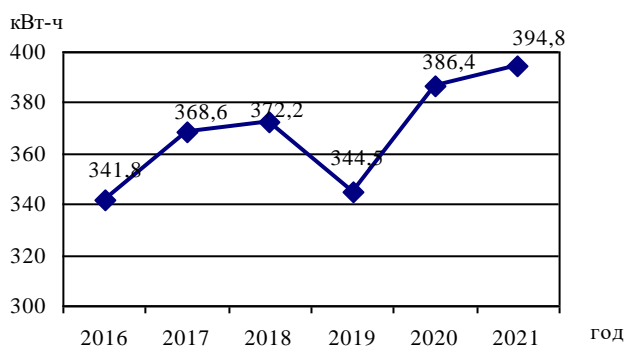


Рис. 1. Суммарные годовые потери электроэнергии в процессе передачи ее железнодорожным потребителям транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД».

\* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Суммарные годовые потери электроэнергии в процессе передачи ее железнодорожным потребителям транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» в процентном соотношении составляют: в 2016 году – 6,8 % от общего объема электрической энергии, предъявленного стационарным потребителям, в 2017 году – 7,9 %, в 2018 году – 7,8 %, в 2019 году – 7,22 %, в 2020 году – 7,22 %. При этом необходимо также отметить, что большинство крупных инвестиционных проектов по автоматизации существующих систем учета затрат электроэнергии оптимизировали работу по энергосетевой и энергосбытовой деятельности предприятий и структурных подразделений железнодорожного транспорта, однако, остались не реализованы базовые функции по анализу и управлению общим комплексом электропотребления по их данным. Также отмечено, что новая система учета часто не выполняет в полной мере своего прямого назначения – эффективная организация процедуры достоверного учета затрат электроэнергии.

Проведенный авторами анализ организации работы энергосистемы объектов железнодорожного транспорта показал, что основной причиной сохранения высокого уровня энергопотерь, при условии сокращения норматива по объему реализации услуги по передаче электроэнергии, является моральный и материальный износ технологического оборудования, что в свою очередь приводит к повышению издержек отрасли. Согласно проведенному анализу состояния технических постоянных средств и устройств системы электроснабжения Восточного полигона, которые непосредственно принимают участие в передаче электрической энергии внутри потребителей, 100%-ный финансовый износ имеет более 800 объектов. Основная причина сложившейся ситуации – недостаточность выделяемых средств на проведение реконструкционных мероприятий по обновлению устройств электроснабжения, непосредственно обеспечивающих перевозочный процесс [14-17]. Создавшаяся ситуация не может не оказывать влияние на работу тяговых ресурсов, что отрицательно сказывается на выполнении плановых значений объемных и качественных показателей работы отрасли в условиях постоянно возрастающего грузопотока.

*Влияние веса грузового поезда на рациональное использование технических ресурсов объектов транспортной инфраструктуры*

Основным показателем, в полной мере характеризующим работу участка железнодорожной линии, а также величину его пропускной и перерабатывающей способности является масса грузового поезда, который учитывает вес самого перевозимого груза и тару вагонов, входящих в его состав, унифицированный для

конкретной дороги или ее отдельно взятых участков согласно существующему графику движения поездов. Фактический состав грузового поезда должен включать в себя такое количество вагонов, чтобы его весовой показатель имел значение не ниже нормы веса, установленного на рассматриваемом участке. Принятие оптимального веса грузового поезда на участке железнодорожной линии с учетом его географических условий функционирования и воздействующих природно-климатических факторов позволяет рационально использовать ресурсы локомотивного парка, сокращает объем потребления электроэнергии, повышает процент пропускной способности объектов транспортной инфраструктуры. Выбор оптимального веса в большей степени зависит от профиля железнодорожного пути, мощности тягового подвижного состава, путевого развития, текущего состояния устройств системы электроснабжения, участвующих в передаче электроэнергии. Зависимость представляет собой обратную пропорциональность: менее крутые подъемы позволяют провезти более «тяжелые» поезда [18].

Факторы, связанные с принятием весовых норм грузовых поездов, следует тщательно изучать. При пропуске поездов с заниженной весовой нормой не рационально используются тяговые ресурсы, что приводит к ухудшению таких основных показателей работы отрасли, как энергетические и тяговые, а, следовательно и финансово-экономические. При обороте грузовых поездов с завышенными весовыми показателями возникает понижение установленной эксплуатационной надежности тягового подвижного состава, что может повлечь неисполнение принятого на участке графика движения поездов, т.е. любое возможное отклонение массы грузового поезда от принятых оптимальных значений способно привести к сбоям в работе объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Норма веса грузовых поездов определяет условия эксплуатации железных дорог: размеры движения поездов, мощность тяги, потери электроэнергии, полезную длину приемоотправочных путей на станциях, динамическую надежность приборов сцепки и рамы вагона, иных технических ресурсов отрасли. В зависимости от принятого веса формируется потребность в вагонном и локомотивном парках для реализации заданного объема перевозки.

Модернизация действующей энергосистемы объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечение продольной стабилизации железнодорожного пути в условиях интенсификации работы Восточного полигона, повышение веса и длины грузовых поездов, осевых нагрузок подвижного состава, грузоподъемности и статической нагрузки грузовых вагонов, скоростей движения поездов является актуальной задачей ОАО «РЖД» [4-8].

В настоящее время обращение поездов повышенной массы и длины занимает особое место в политике ОАО «РЖД». Подобный способ организации грузовых перевозок дает возможность значительно увеличить объем перемещаемого груза при существующем локомотивном парке, снизить потери электроэнергии, сократить затраты на перевозку груза. Обращение тяжеловесных и длинносоставных поездов сопряжено с применением интенсивного пневматического и рекуперативного торможения и сосредоточением на малой длине большого количества единиц тяги. Возникает вопрос текущего состояния устройств электроснабжения, участвующих в передаче тяговой электроэнергии, надежности их эксплуатации при наращивании грузопотока на объектах транспортной инфраструктуры БАМа и Транссиба.

Пропускная способность участка рассчитывается для ограничивающего перегона, т.е. это перегон железнодорожной линии, на котором величина периода движения поездов максимальна, а количество возможных проложенных ниток графика движения минимально. Произведем оценку уровня надежности работы системы энергоснабжения при наращивании веса поезда на примере организации пропуска поездов на участке Н-Х Восточного полигона железных дорог при условии обращения на рассматриваемом участке электровозов серий ЗЭС5К, 2ЭС5К. При их эксплуатации примем, что тяговая мощность используется более чем на 90%, т.е. находится на пределе [18, 19].

Введение в обращение поездов повышенной длины уменьшит количество ниток грузовых поездов на графике движения, что позволяет сократить количество потребных локомотивов и локомотивных бригад, повысить пропускную и перерабатывающую способности участка железнодорожной линии, возрастет участковая скорость движения, сократится время оборота как вагонного, так и локомотивного парков. Совокупность указанных факторов позволяет снизить себестоимость перевозки 1 тонны груза, при этом необходимо отметить, что безопасность и бесперебойность передвижения поездов по участку остается приоритетной задачей в организации перевозок. Усложнение условий эксплуатации отражается на стабильности функционирования железнодорожного пути и

системы тягового электроснабжения, что требует принятия дополнительных усиливающих мер и прогнозирования безотказной работы объектов инфраструктуры.

Для выполнения всех требований на железнодорожных станциях где обращаются тяжеловесные и длинносоставные поезда, вводят изменения в техпроцессы их работы, разрабатываются специальные инструкции по приему и отправлению таких составов. Учитывая тяговый резерв локомотивов и вместимость приемо-отправочных путей станций анализируемого участка, предлагается увеличить длину порожнего поезда на 7 вагонов. Вследствие данного организационно-технического мероприятия количество нечетных ниток графика сократится на 4 единицы. Это позволит дополнительно пропустить до 2500 поездов в год, что соответствует 14,73 млн тонн в год. Дополнительный доход отрасли от увеличения грузооборота составит 1,8 млрд руб.

Выполнив построение графиков движения поездов при существующем поездопотоке и при условии изменения длины грузового поезда и уменьшении количества нечетных ниток графика, произведем расчет технико-эксплуатационных показателей работы, динамика которых представлена в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Динамика технико-эксплуатационных показателей работы участка при различных вариантах организации пропуска грузовых поездов

*Dynamics of the technical and operational performance of the section under various options for the organization of the transit of freight trains*

Показатель		Значение показателя	
		При пропуске грузовых поездов установленной длины	При пропуске грузовых поездов повышенной длины
Количество грузовых поездов, поезд	четное направление движения	17	17
	нечетное направление движения	17	14
Участковая скорость, км/ч	железнодорожный участок НУ-Т	48,7	48,9
	железнодорожный участок Т-НЧ	44,35	44,75
	железнодорожный участок НЧ-Х	36,28	36,9
Техническая скорость, км/ч	железнодорожный участок НУ-Т	52,95	53,11
	железнодорожный участок Т-НЧ	50,58	50,93
	железнодорожный участок НЧ-Х	46,18	46,57
Среднесуточный пробег локомотива, км/сут	железнодорожный участок НУ-Х	667	684
Участковый оборот локомотива, час.		25,28	23,81
Производительность локомотива, млн. км/сут		2,371	2,402
Потребное число локомотивов, ед.		20	18
Потребное количество локомотивных бригад, ед.	железнодорожный участок НУ-Т	29	24
	железнодорожный участок Т-НЧ	33	29
	железнодорожный участок НЧ-Х	27	21

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

*Проверка эффективности работы устройств тягового электроснабжения объектов транспортной инфраструктуры участка железнодорожной линии*

Введение в обращение на рассматриваемом участке поездов повышенной длины приводит к снижению количества ниток поездов на графике движения, но при этом вызывает повышенную нагрузку на устройства электроснабжения, участвующих в передаче тяговой электроэнергии.

Тяговыми расчётами предусматривается проверка значения веса грузового поезда на трогание с места при условии эффективной работы устройств тягового

электроснабжения на расчетном подъёме поездным локомотивом после вынужденной остановки поезда. На основании проведенных расчетов получили значения данных величин для грузового движения, таблице 2. Основные технико-эксплуатационные показатели поездного локомотива серии 2(3)ЭС5К приведены в таблице 3. Ограничение по скорости движения на участке составляет 80 км/ч. Серия поездного локомотива, согласно примеру – 2(3)ЭС5К. Тип железнодорожного пути – звеньевой, состав поезда – грузовой, 85 % вагонов с роликовыми подшипниками. В таблице 4 представлены прогнозные значения суточных объемов движения грузовых поездов на участке Н – Х на период до 2025 год.

Таблица 2

Table 2

Расчетные значения массы и длины грузовых поездов по сериям локомотивов, обслуживающих участок Н – Х

*Calculated mass and length of freight trains for series of locomotives serving section H - X*

Наименование участка	Серия локомотива	Вес грузового поезда				Длина состава в условных вагонах			
		Унифицированная для транзитных поездов		По мощности локомотива для участковых поездов		Максимальная для транзитных поездов		Для участковых поездов	
		четный	нечетный	четный	нечетный	четный	нечетный	четный	нечетный
Н-	2(3)ЭС5К	5800	5800	5800	5800	71	71	71	71
Х	1,5ВЛ80тк	6000	6000	6000	6000	71	71	71	71

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Основные технико-эксплуатационные показатели поездного локомотива серии 2(3)ЭС5К

*Main technical and operational performance of train locomotive 2(3)ES5K*

Серия	U <sub>ном</sub> , кВ	Масса, т	Длина, м	Конструкционная скорость, км/ч	Мощность часового режима, кВт	Мощность собственных нужд, кВт	Ток собственных нужд, А
2(3)ЭС5К	25	192	35	110	6560	349.8	18

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Прогнозные значения размеров движения грузовых поездов на участке Н – Х на 2025 год

*Projected 2025 freight train dimensions on section H-X*

Наименование участка	Весовые нормы грузовых поездов, тонн	Размеры движения грузовых поездов, поездов/сутки	
		четное	нечетное
Н – Х	5800	7	1
	6000	14	10
	4000-4200	19	19
	3000 сборные	10	10
	3000 контейнерные	1	1
	1500-1700 порожние	-	10
	Итого	51	51

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Для дальнейшего расчета режимов нагрузки тягового электроснабжения участка Н – Х необходимо произвести тяговые расчеты для базовых весовых норм грузовых поездов, осуществляющих движение по участку. Согласно результатам, проведенных авторами тяговых расчётных значений получено: перегонный расход энергии (полной и активной), удельный расход энергии (полной и активной), время хода грузового поезда по участку (полное и под током), максимальный перегрев обмоток двигателя, касательно расчётного участка, отдельно в четном и нечетном направлениях. Результаты расчета представлены в табл. 5-8. При использовании программного комплекса КОРТЭС [20-22] произведено построение графической зависимости токопотребления на участке Н – Х, как для поездов в четном направлении, так и в нечетном, при различной массе грузового поезда (рис. 2-5).



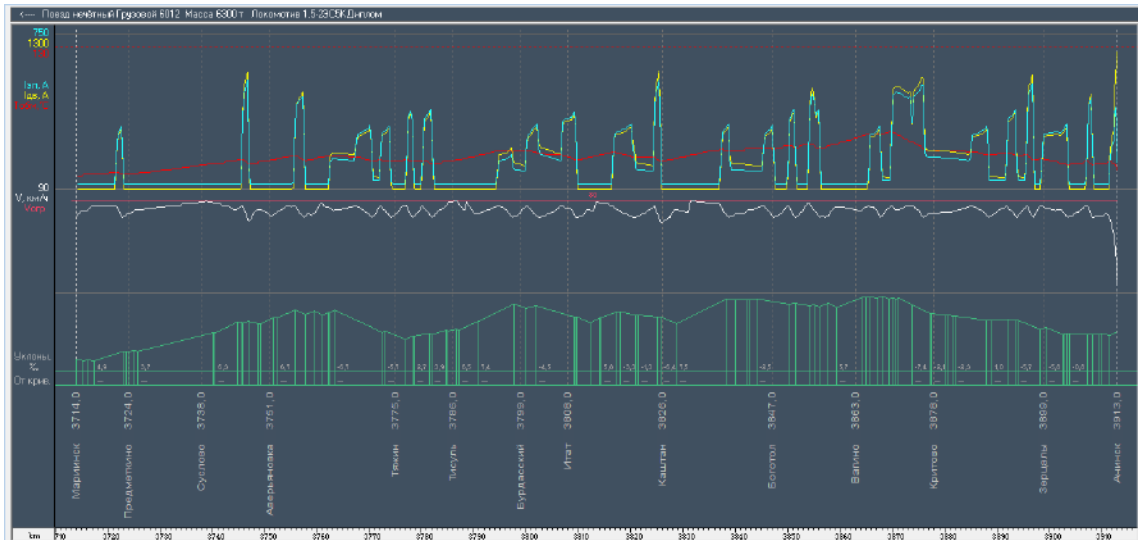


Рис. 2. Токопотребление нечетного грузового поезда массой 6000 тонн с локомотивом серии 3ЭС5К на участке Н – Х.

Fig. 2. Current consumption of an odd 6,000-ton freight train with a 3ES5K locomotive on the H - X section.

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 5  
Table 5

Результаты тягового расчета для нечетного грузового поезда массой 6000 тонн с локомотивом серии 3ЭС5К на участке Н – Х

Results of traction calculation for an odd 6,000 ton freight train with 3ES5K locomotive on H - X section

Участок	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии		Удельный расход	
		полное	под током	активной, кВт·ч	полной, кВА·ч	активной, кВт·ч Т-км	полной, кВА·ч Т-км
Н – Х	199,0	169,1	82,1	7777,0	9010,2	6,4	7,5
Макс. ток поезда, А	559 А на км 3831,1						
Макс. перегрев обмоток двигателя, °С	46,5° (доп. 120°) на км 3871,45						

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

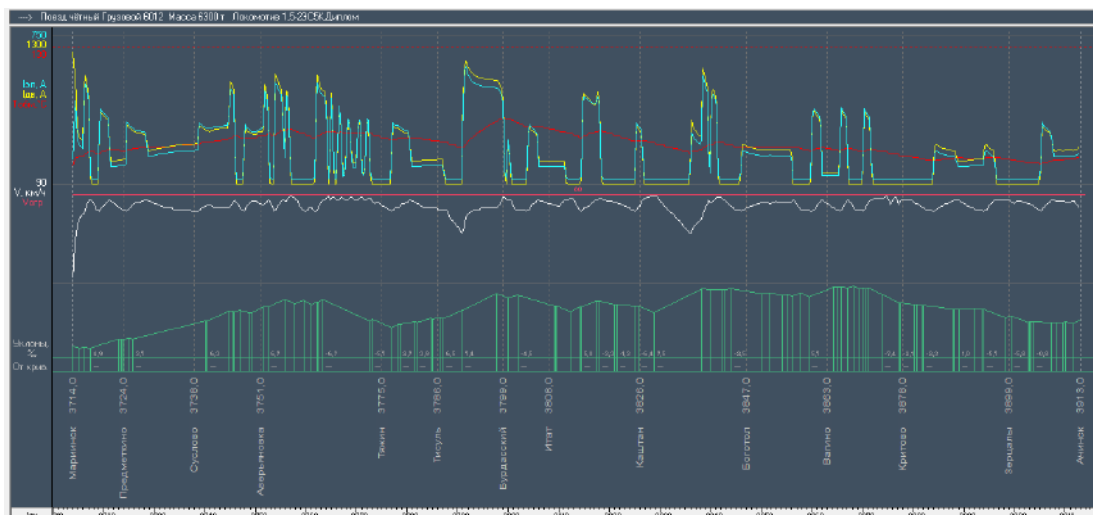


Рис. 3. Токопотребление четного грузового поезда массой 6000 тонн с локомотивом серии 3ЭС5К на участке Н – Х.

Fig. 3. Current consumption of an even freight train weighing 6,000 tons with a 3ES5K locomotive on the H - X section.

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 6

Table 6

Результаты тягового расчета для четного грузового поезда массой 6300 тонн с локомотивом серии 3ЭС5К на участке Н – Х

Results of traction calculation for an even freight train weighing 6300 tons with a locomotive of series 3ES5K on section H – X

Участок	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии		Удельный расход	
		полное	под током	активной, кВт·ч	полной, кВА·ч	активной, кВт·ч т-км	полной, кВт·ч т-км
Н – Х	199,0	173,1	108,7	9859,1	11349,9	7,9	9,1
Макс. ток поезда, А	612 А на км 3779,90						
Макс. перегрев обмоток двигателя, °С	55,5° (доп. 120°) на км 3788,10						

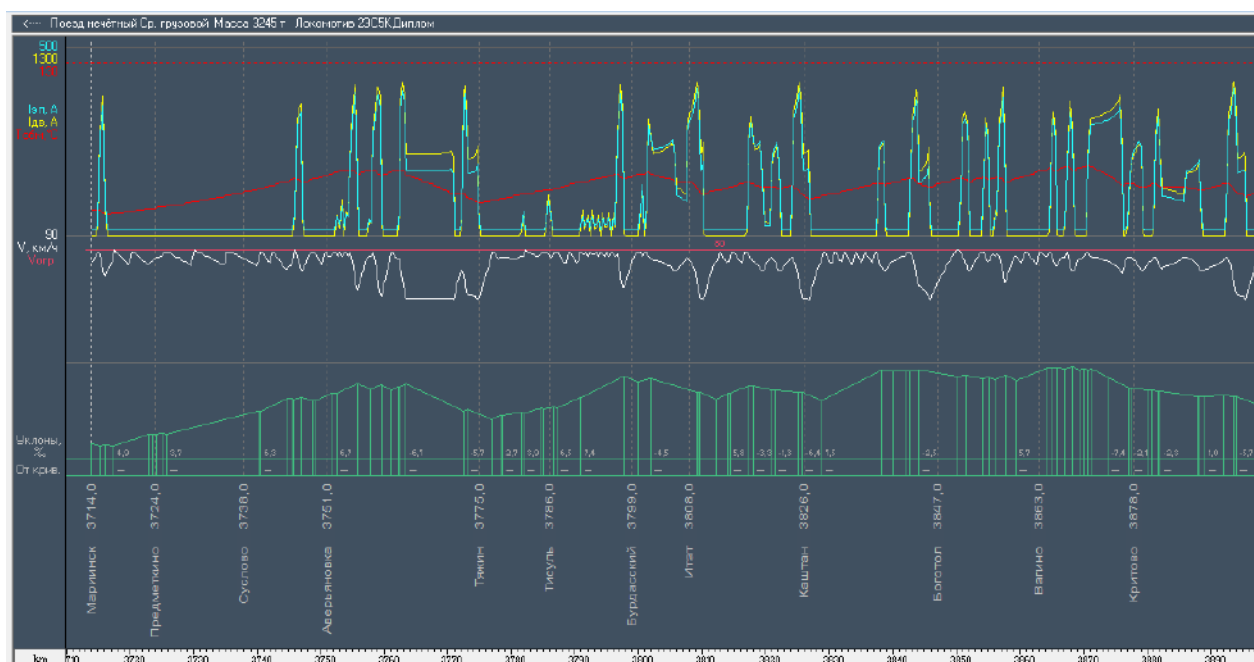


Рис. 4. Токпотребление нечетного грузового поезда массой 3245 тонн с локомотивом серии 2ЭС5К на участке Н – Х.

Fig. 4. Current consumption of an odd-numbered freight train weighing 3,245 tons with a 2ES5K locomotive on the H - X section.

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 7

Table 7

Результаты тягового расчета для нечетного грузового поезда массой 3245 тонн с локомотивом серии 2ЭС5К на участке Н – Х

Traction results for an odd freight train weighing 3245 tonnes with a 2ES5K locomotive on a section H - X

Участок	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии		Удельный расход	
		полное	под током	активной, кВт·ч	полной, кВА·ч	активной, кВт·ч т-км	полной, кВт·ч т-км
Н – Х	199,0	176,1	76,6	6261,8	7211,2	9,3	12,3
Макс. ток поезда, А	408 А на км 3828,02						
Макс. перегрев обмоток двигателя, °С	48° (доп. 120°) на км 3871,12						

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

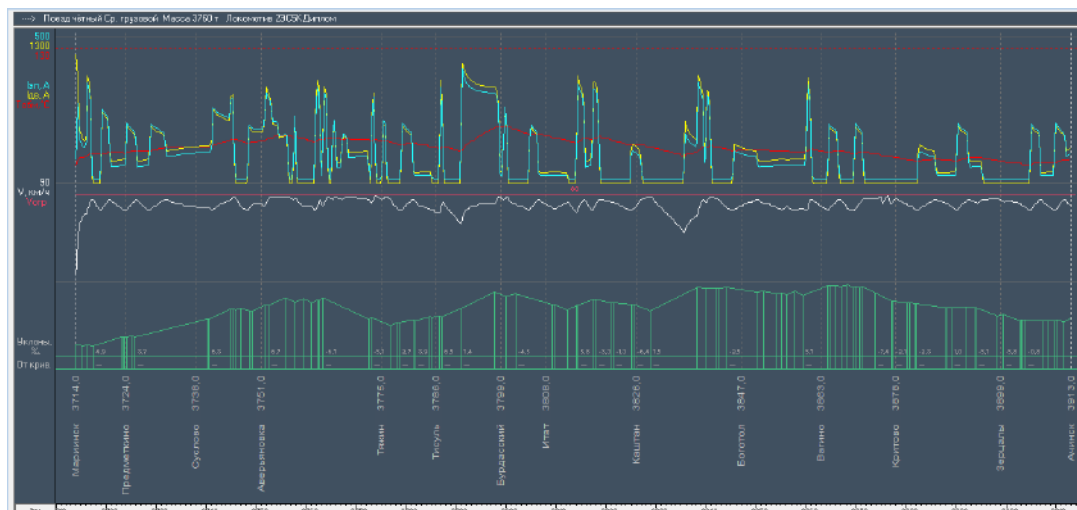


Рис. 5. Токпотребление четного грузового поезда массой 3760 тонн с локомотивом серии 2ЭС5К на участке Н – Х.

Fig. 5. Current consumption of an even freight train weighing 3,760 tons with a 2ES5K series locomotive on the H - X section.

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 8

Table 8

Результаты тягового расчета для четного грузового поезда массой 3760 тонн с локомотивом серии 2ЭС5К на участке Н – Х  
Traction calculation results for an even freight train weighing 3,760 tonnes with a 2ES5K locomotive on H - X section

Участок	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии		Удельный расход	
		полное	под током	активной, кВт·ч	полной, кВА·ч	активной, кВт·ч т-км	полной, кВА·ч т-км
Н – Х	199,0	170,9	108,4	5994,9	6921,2	8,1	9,3
Макс. ток поезда, А	408 А на км 3792,13						
Макс. перегрев обмоток двигателя, °С	50° (доп. 120°) на км 3799,22						

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

### Результаты и обсуждение

В рамках значительного увеличения грузопотока на восточном направлении железных дорог процессы стабилизации системы обеспечения тяговыми ресурсами и эффективного функционирования энергосистемы объектов транспортной инфраструктуры БАМа и Транссиба становятся особенно значимыми. Особое место занимают исследования по проверке устойчивости работы устройств тягового электроснабжения участков железнодорожных линий с наибольшей грузонапряженностью, вызванной введением в обращение грузовых поездов повышенного веса и длины, т.к. именно данные факторы вызывают прирост нагрузки на весь комплекс контактной сети.

С целью подтверждения целесообразности, а в некоторых случаях, даже возможности применения различных известных способов усиления уровня пропускной и провозной способностей участков, эффективность которых на первый взгляд очевидна, авторами представленной статьи произведена оценка уровня надежности функционирования системы энергоснабжения при увеличении веса грузового поезда на примере организации работы участка Н-Х Восточного полигона железных дорог для электровозов серий ЗЭС5К, 2ЭС5К, при условии, что тяговая мощность устройств находится на пределе. Конечной задачей исследования являлось ответить на вопрос – представляется ли возможным получить величину максимально доступной пропускной способности. Исследования проводились с использованием программного комплекса КОРТЭС.

Проведенные авторами тяговые расчеты позволили получить развернутые характеристики рабочих режимов системы энергоснабжения участка Н – Х Восточного полигона железных дорог при пропуске поездов повышенной длины и тяжеловесных.

Выявлено, что ограничивающий коэффициент нагрузки для грузовых поездов массой 6000 тонн и 3760 тонн, четного и нечетного направлений не превышает

допустимого значения 2,0. Расчетные значения напряжения находятся в пределах допустимого значения. Температура в контактной сети и отсасывающей линии не превышает максимального допустимого значения 90 °С. Что говорит о допустимости пропуска поездов предложенной массы 6000 тонн и составности 60 условных вагонов на рассматриваемом участке при бесперебойном функционировании системы тягового энергоснабжения.

По результатам проведённых исследований можно сказать, что согласно полученным характеристикам рабочего режима системы тягового энергоснабжения отдельного ограничивающего участка Восточного полигона железных дорог при пропуске поездов повышенной длины и тяжеловесных, показатели его функционирования не выходят за предельные значения, но находятся на пограничных значениях. Расчеты показали, что существующий инфраструктурный комплекс позволяет увеличить пропускную способность не более чем на 4 пары поездов в сутки, вот почему вопрос энергоснабжения БАМа и Транссиба остаётся актуальным.

С целью оптимизации своей деятельности при приросте грузопотока на восточном направлении ОАО «РЖД» имеет как финансовые, так и технические возможности для сооружения новых и модернизации существующих объектов инфраструктурного комплекса на плановые объёмы перевозок. Однако необходимо понимать, что главным ограничением сегодня является недостаточность тягового энергоснабжения и любое техническое развитие одних объектов не будет давать предполагаемый эффект или будет простаивать неопределенное время без развития энергетики в целом.

### **Заключение**

Повышение уровня эффективности организации движения поездов на инфраструктурном комплексе Восточного полигона в рамках усиления пропускных способностей и экономии всех видов ресурсов сегодня играет большое значение в целом для всей экономики страны, поскольку именно данная стратегия позволит существенно укрепить международные позиции транспортной отрасли, расширить и повысить эффективность функционирования транспортных коридоров.

В настоящий момент согласно полученным характеристикам рабочих режимов системы тягового энергоснабжения отдельных ограничивающих участков БАМа и Транссиба, при пропуске поездов повышенного веса и длины, показатели функционирования находятся на пограничных значениях и не позволяют обеспечить перспективный уровень пропускной и перерабатывающей способностей. С целью обеспечения плановых показателей грузооборота Восточного полигона железных дорог необходимо срочное проведение мероприятий по дополнительной генерации электроэнергии, что является затруднительным, поскольку комплексы энергосистем Дальнего Востока и Восточной Сибири не синхронизированы.

Усиление пропускной и провозной способностей участков и линий Восточного полигона, повышение перерабатывающей способности железнодорожных станций и узлов до 200 млн тонн к 2024 году возможно за счет пропуска поездов повышенного веса, длинносоставных поездов, использования инновационного вагонного парка, применения систем интервального регулирования и «виртуальная» сцепка, что требует строительства дополнительной генерации и нескольких тысяч километров электросетей. Все проектные решения по усилению данного транспортного направления взяты под особый контроль правительства Российской Федерации, поскольку сегодня только финансовая поддержка со стороны государства является единственным способом обеспечить оптимальное электроснабжение БАМа и Транссиба.

### **Литература**

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [электронный ресурс] URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (дата обращения 12.09.2022).
2. Распоряжение правительством Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р «Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» на период до 2030 года»
3. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р, 2016. 76 с.
4. Olentsevich V.A., Belogolov Y.I., Kramynina G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 832(1). pp. 012038.

5. РЖД предстоит торговля за энергию для БАМа [электронный ресурс] URL: <https://vgudok.com/lenta/rzhd-predstoit-torgovlya-za-energiyu-dlya-bama-vedomstvo-shulginova-predlagaet-sekonomit-na> (дата обращения 01.10.2022)

6. Долгие провода на БАМ [электронный ресурс] URL: [www.kommersant.ru/doc/5490899](http://www.kommersant.ru/doc/5490899) (дата обращения 01.10.2022)

7. Минэнерго против электрификации БАМа и Транссиба после 2024 года <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/09/02/885009-minenergo-elektrifikatsii-bama> (дата обращения 01.10.2022)

8. Olentsevich V.A., Konyukhov V.Y., Olentsevich A.A., et al. Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1661(1). pp. 012106.

9. Третьяков Е.А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / Е.А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2015. – № 140. – С. 155-159.

10. Третьяков Е.А. Совершенствование методов управления качеством электрической энергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта / Е.А. Третьяков, А.В. Краузе. – Текст: непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 119 – 128.

11. Воропай Н.И. Системные исследования проблем энергетики // Н.И. Воропай. – Новосибирск: Новосибирский филиал ФГУП Академический научно-издательский и книгораспространительский центр «Наука», 2000. – 168 с.

12. Каштанов А.Л., Никифоров М.М., Комяков А.А. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» // Материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте»; 6 февраля 2015 г. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 141–147.

13. Никифоров М.М., Каштанов А.Л., Комяков А.А. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года // Материалы междунар. научн.-практ. конф. «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем»; Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения. 2016. С. 159–165.

14. Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Akhmetshin A.R., et. al. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1111. pp. 012005.

15. Suslov K., Piskunova V., Gerasimov D., Ukolova E., Akhmetshin A., Lombardi P., Komarnicki P. Development of the methodological basis of the simulation modelling of the multi-energy systems. E3S Web of Conferences 2019: International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems; 18-20 September 2019; Kazan, Russia. Kazan: EDP Sciences; 2019. pp. 01049.

16. Akhmetshin A. R., Suslov K. V., Astashkov N. P., Olentsevich V. A., Shtayger M. G., Karlina A. I. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020: International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020); 27-29 Oct 2020; Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: IOP Publishing; 2021. pp. 012001.

17. Olentsevich V. A., Astashkov N. P., Akhmetshin A. R., Suslov K. V., Shtayger M. G., Karlina A. I. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a "virtual coupling" technology. Journal of Physics: Conference Series 2021: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering; 15-16 June 2021; Novorossiysk, Russia. Novorossiysk: Virtual; 2021. pp. 012112.

18. Архангельский Е.В., Воробьев Н.А., Дроздов Н.А., Мирошниченко Р.И., Сегал Л.Г. Расчет пропускной способности железных дорог. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1977. 310 с.

19. Ресельс А.П., Филатов Е.В. Проблемы эксплуатации кривых участков пути при организации тяжеловесного движения на Восточном полигоне // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 6. С. 42–48.

20. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. М.: Транспорт, 2007. 450 с.

21. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985.

22. Тяговые расчеты. Справочник / Под ред. П.Т. Гребенюка. М.: Транспорт, 1987.

#### Авторы публикации

**Оленцевич Виктория Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения.

**Гусева Елена Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий», Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Константинова Марина Витальевна** – канд. хим. наук, доцент кафедры «Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий», Иркутский национальный исследовательский технический университет.

#### References

1. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [electronic resource]. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (accessed 12.09.2022).
2. Rasporyazhenie pravitel'stvom Rossiiskoi Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-г «Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZhD» na period do 2030 goda»
3. Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem OAO «RZhD» 14 dekabrya 2016;2537r:76.
4. Olentsevich VA, Belogolov YI, Kramynina GN Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;832(1):012038.
5. RZhD predstoit trgovlya za energiyu dlya BAMA [electronic resource]. URL: <https://vgudok.com/lenta/rzhd-predstoit-torgovlya-za-energiyu-dlya-bama-vedomstvo-shulginova-predlagaet-sekonomit-na> (accessed 01.10.2022).
6. Dolgie provoda na BAM [electronic resource]. URL: [www.kommersant.ru/doc/5490899](http://www.kommersant.ru/doc/5490899) (accessed 01.10.2022).
7. Minenergo protiv elektrifikatsii BAMA i Transsiba posle 2024 goda [electronic resource]. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/09/02/885009-minenergo-elektrifikatsii-bama> (accessed 01.10.2022).
8. Olentsevich VA, Konyukhov VY, Olentsevich AA, et al. Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1661(1):012106.
9. Tretyakov E.A. Regulation of mode parameters in the power supply system of non-traction consumers of railways / E.A. Tretyakov. – Text: direct. *Omsk Scientific Bulletin*. – 2015;140.:155-159.
10. Tretyakov EA, Krause AV. Improvement of methods of electric energy quality management in railway distribution networks. Text: direct. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2013;1:119 – 128.
11. Voropai NI. System researches of problems of power engineering. N.I. Voropai. – Novosibirsk: Novosibirsk branch of FSUE Academic Scientific Publishing and Book Distribution Center Nauka. 2000. 168 p.
12. Kashtanov AL, Nikiforov MM, Komyakov AA. Aktualizatsiya energeticheskoi strategii kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi». *Materialy nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu rossiiskoi nauki "Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte"*; 6 Feb 2015; Omsk, Russia. Omsk: Omskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya, 2015. pp. 141-147.
13. Nikiforov MM, Kashtanov AL, Komyakov AA. O rabote po aktualizatsii energeticheskoi strategii kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda. *Materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. "Povyshenie energeticheskoi effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem"*; Omsk, Russia. Omsk: Omskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya, 2016. pp. 159-165.
14. Astashkov NP, Olentsevich VA, Akhmetshin .R, et. al. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;

1111:012005.

15. Suslov K, Piskunova V, Gerasimov D, et al. Development of the methodological basis of the simulation modelling of the multi-energy systems. *E3S Web of Conferences 2019: International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems; 18-20 September 2019; Kazan, Russia*. Kazan: EDP Sciences; 2019. pp. 01049.

16. Akhmetshin AR, Suslov KV, Astashkov NP, et al. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020: International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020); 27-29 Oct 2020; Saint-Petersburg, Russia*. Saint-Petersburg: IOP Publishing; 2021. pp. 012001.

17. Olentsevich VA, Astashkov NP, Akhmetshin AR, et al. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a «virtual coupling» technology. *Journal of Physics: Conference Series 2021: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering; 15-16 June 2021; Novorossiysk, Russia*. Novorossiysk: Virtual; 2021. pp. 012112.

18. Arkhangel'skii EV, Vorob'ev NA, Drozdov NA, et al. *Raschet propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog*. 2nd ed. Moscow: Transport; 1977.

19. Resel's AP, Filatov EV. Problemy ekspluatatsii krivykh uchastkov puti pri organizatsii tyazhelovesnogo dvizheniya na Vostochnom poligone. *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2019; 6:42-48.

20. *Pravila ustroystva sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii TsE-462*. Moscow: Transport; 2007.

21. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty*. Moscow: Transport; 1985.

22. *Tyagovye raschety. Spravochnik*. Moscow: Transport; 1987.

#### **Authors of the publication**

**Victoria A. Olentsevich** – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

**Elena A. Guseva** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

**Marina V. Konstantinova** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

**Получено** 08.02.2023г

**Отредактировано** 15.02.2023г

**Принято** 22.02.2023.

УДК 66.021.3/4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАСАДКАМИ

Столярова Е.Ю., Лаптева Е.А., Лаптев А.Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме.** АКТУАЛЬНОСТЬ в статье рассмотрены современные импортозамещающие насадки. Они являются важным элементом в системе охлаждения воды в оборотных циклах. Насадка дискретно-шероховатой поверхность и хаотичная, металлическая насадка «Инжехим-2012» показала высокую эффективность.

ЦЕЛЮЮ данной статьи является экспериментальное исследование и обобщение результатов по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам комбинированного насадочного слоя при проведении процесса охлаждения воды воздухом на макете градирни. МЕТОДЫ. На макете градирни, оборудованном комбинированной насадкой из полиэтиленовых труб с регулярно-дискретной шероховатостью и дополнительным верхним хаотичным слоем, исследован процесс охлаждения воды воздухом при пленочном противотоке фаз. Регулярная насадка состоит из вертикальных труб диаметром 50 мм и высотой один метр и хаотичной насадкой, засыпанной сверху регулярной с высотой слоя 0,20 метра. Хаотичная насадка состоит из аналогичных труб, нарезанных на цилиндры 50x50 мм или металлической 16 мм «Инжехим - 2012». Хаотичные насадки предназначены для более равномерного распределения воды на входе в регулярную насадку и созданию дополнительной зоны контакта фаз с максимальной движущей силой тепломассообмена. Исследовался процесс охлаждения воды с температурой около 40°C воздухом, с температурой 20-25°C. Скорость воздуха в градирне достигала 2,6 м/с, а плотность орошения до 19,4 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час). Режимные характеристики близки к работе мини градирен. РЕЗУЛЬТАТЫ. Экспериментально определены перепад давления воздуха макета с насадкой, объемный коэффициент массоотдачи и тепловые эффективности по охлаждению воды и нагрева воздуха. Построены графические зависимости от режимных параметров. Выполнено сравнение с коэффициентами массоотдачи в насадочных градирнях с близкими конструктивными и режимными характеристиками. Показано преимущество комбинированных насадок. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам пленочных оросителей с интенсификаторами и активным участком могут применяться как в теоретических, так и практических методах расчета градирен при их модернизации или проектировании в различных отраслях промышленности и на тепловых станциях.

**Ключевые слова:** градирня; тепломассообмен; насадки; эффективность; пленочный режим.

**Благодарность.** Российскому научному фонду, грант №18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>

**Для цитирования:** Столярова Е.Ю., Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Экспериментальные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочной градирни с комбинированными насадками // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 37-47.

## EXPERIMENTAL HYDRAULIC AND HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS OF A FILM COOLING TOWER WITH COMBINED NOZZLES

E.Y. Stolyarova, E.A. Lapteva, A.G. Laptev  
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract.** RELEVANCE: the article discusses modern import-substituting nozzles. They are an important element in the water cooling system in the circulating cycles. The nozzle has a discretely rough surface and a chaotic, metal nozzle "Injexhim-2012" has shown high efficiency.



*THE PURPOSE* of this article is an experimental study and generalization of the results on the hydraulic and heat and mass transfer characteristics of the combined packing layer during the process of cooling water with air on a model of a cooling tower.

*METHODS.* On a model of a cooling tower equipped with a combined nozzle made of polyethylene pipes with regularly discrete roughness with an additional upper chaotic layer, the process of cooling water with air with a film counterflow of phases is investigated. The regular nozzle consists of vertical pipes with a diameter of 50 mm and a height of one meter and a chaotic nozzle filled with a regular top with a layer height of 0.20 meters. The chaotic nozzle consists of similar pipes cut into cylinders of 50x50 mm or metal 16 mm "Injehim - 2012". Chaotic nozzles are designed for a more uniform distribution of water at the entrance to the regular nozzle and the creation of an additional phase contact zone with the maximum driving force of heat and mass transfer. The process of cooling water with a temperature of about 40 ° C with air, with a temperature of 20-25 ° C. was studied. The air velocity in the cooling tower reached 2.6 m/s, and the irrigation density was up to 19.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h). The operating characteristics are close to the operation of mini cooling towers.

*RESULTS.* The air pressure drop of the model with a nozzle, the volumetric mass transfer coefficient and thermal efficiencies for cooling water and heating air were experimentally determined. Graphical dependences on the operating parameters are constructed. The comparison with the mass transfer coefficients in the cooling towers with similar design and operating characteristics is carried out. The advantage of combined nozzles is shown.

*CONCLUSION.* The results obtained on the hydraulic and heat and mass transfer characteristics of film sprinklers with intensifiers and an active site can be used in theoretical as well as practical methods for the modernization or design of cooling towers in various industries and at thermal power plants.

**Key words:** cooling tower; heat and mass transfer; packings; efficiency; film mode.

**For citation** Stolyarova E., Lapteva EA, Laptev AG. Experimental hydraulic and heat and mass transfer characteristics of a film cooling tower with combined nozzles. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57): 37-47.

### **Введение**

Регулярные насадки чаще применяются в ректификационных и абсорбционных колоннах, где необходим небольшой перепад давления, например при ректификации [1], хемосорбции [2], абсорбции [3]. Кроме этого регулярные насадки находят широкое применение в пленочных градирнях [4] и скрубберах-охладителях и очистки дымовых и технологических газов [5,6]. К настоящему времени известны сотни конструкций различных регулярных [7] и нерегулярных (хаотичных) насадок [8] и различных комбинированных [9]. Регулярные насадки отличаются от хаотичных меньшим гидравлическим сопротивлением, стоимостью и более высокими удельными гидравлическими нагрузками [10]. Скорость газа при подвешивании жидкой фазы примерно в два раза выше, чем у хаотичных насадок при аналогичных условиях работы [9]. Причем в регулярных насадках меньше обратное перемешивание потоков, однако, эффективность немного уступает хаотичным насадкам из-за небольшой интенсивности турбулизации газового потока [8].

Гидравлические и тепломассообменные характеристики газожидкостных потоков исследовались в многочисленных работах различных авторов. Например, дисперсно-кольцевых потоков [11], насадок с перекрестным током фаз [12], с различными материалами насадок [13], с различной формой насадок [14], с различным расстоянием между листами регулярных контактных устройств [15], насадок из пленки, стекла и шариков с противотоком фаз [16]. Разработана термодинамическая модель [17] с поперечным потоком, тепловой эффективностью и эффективностью увлажнения воздуха с учетом потерь на испарение. Выполнена [18] оценка влияния различных факторов на характеристики теплопередачи поперечных потоков. Отмечена трудность решения тепловой модели из-за двумерного описания потоков воды и воздуха. Также моделированию и расчету градирен посвящены работы [19,20], где использованы полуэмпирические подходы. Однако в ряде случаев отсутствуют экспериментальные данные по ряду важных характеристик градирен, таких как гидравлическое сопротивление, коэффициенты тепло-и массоотдачи и эффективность теплообмена по жидкой и газовой фазам. Следует вывод, что интенсификация процесса охлаждения воды на промышленных предприятиях [21] и тепловых станциях [22] является важным направлением развития

теоретических и прикладных исследований в теплоэнергетике. Отличительной особенностью данной работы является применение и исследование насадочного слоя с активным участком в пленочной градирне с интенсификаторами.

**Материалы и методы**

Известно что, в хаотичных насадках турбулентный режим газа начинается при числе Рейнольдса  $Re_3 > 40$ , а в регулярных с гладкой поверхностью примерно как в трубах при  $Re_3 > 2300$ . Однако при наличии поверхностных интенсификаторов (выступы, накатки, лепестки и т.д.) турбулизация начинается при  $Re_3 > 300-500$ , где  $Re_3 = w_T d_3 / \nu_T$ ;  $w_T$  – средняя скорость воздуха в слое, м/с;  $w_T = w_0 / \epsilon_{CB}$ ;  $w_0$  – скорость воздуха на полное сечение аппарата, т.е. без насадки, м/с;  $d_3 = 4\epsilon_{CB} / a_V$  – эквивалентный диаметр насадки, м;  $\epsilon_{CB}$  – удельный свободный объем;  $a_V$  – площадь удельной поверхности,  $m^2/m^3$ ;  $\nu_T$  – коэффициент кинематической вязкости газа,  $m^2/c$ . В статье экспериментально исследован турбулентный режим движения газа в слое комбинированной насадки.

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки с колонной для исследования процесса охлаждения водывоздухом. Нагрев воды происходит в емкости Электронагревателем ЭЛ. На схеме К – колонна макета градирни с внутренним диаметром 190 мм из оргстекла, высота колонны два метра; N1, N2 – насосы; В – газодувка; Е – емкость. Измерение температур воды и воздуха осуществляется термомпарами на входе потоков  $T_{жн}$ ,  $T_{гн}$  и на выходе  $T_{жк}$ ,  $T_{гк}$ ; измеряются также объемные расходы воды  $V_{ж}$  и воздуха  $V_{г}$ ; влагосодержание воздуха  $x_{н}$  и  $x_{к}$ , кг/кг; перепад давления воздуха в насадке  $\Delta P_T = P_1 - P_2$ , Па. Для орошения используется распылитель воды с отверстиями диаметром 1 мм; число отверстий 130 шт. Число точек орошения около 1000 на  $m^2$ . Высота регулярной насадки  $H_1=1,0$  м; нерегулярной  $H_2=0,20$ м. Общая высота комбинированной насадки  $H=1,2$  м. Расстояние от распылителя воды до слоя комбинированной насадки 180 мм. Допущения: основной теплообмен происходит в насадочных слоях; теплопередача через стенки градирни в окружающей воздух незначительная; основное сопротивление теплообмена сосредоточено в газовой фазе.

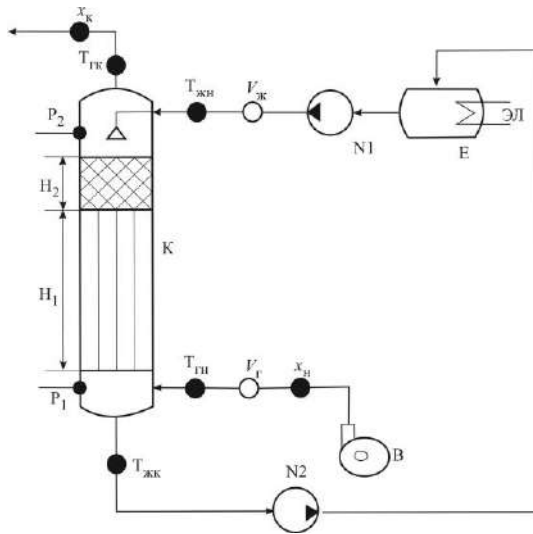


Рис 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: К – колонна; В – вентилятор (газодувка); N – насосы; Е – емкость; H1, H2 – высота слоев насадки; ЭЛ – электронагреватель воды. Остальные обозначения в тексте.

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation: K – column; B – fan (gas blower); N – pumps; E – capacity; H1, H2 – height of the nozzle layers; EL – electric water heater. The rest of the notation in the text.

\*Источник: составлено автором \*Source: compiled by the author

На рисунке 2 показаны расположение регулярной трубчатой насадки и размеры выступов на ее поверхности.

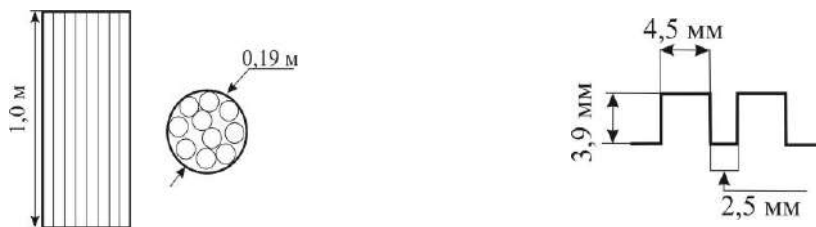


Рис. 2. Схема трубчатой регулярной насадки с дискретной шероховатостью в виде прямоугольных выступов. Fig. 2. Diagram of a regular tubular nozzle with discrete roughness in the form of rectangular protrusions.

\*Источник: составлено автором \*Source: compiled by the author.

Дискретно – регулярная шероховатость создает ламинарно-волновой, а при повышенном расходе воды развитый турбулентный режим течения пленки.

Нерегулярная насадка, засыпанная поверх основного слоя, выполняет несколько функций.

Во-первых – более равномерное орошение регулярной насадки за счет перераспределения жидкой фазы хаотичными элементами [23]. Во-вторых – создание дополнительного контакта фаз – активного участка теплообмена, где максимальная движущая сила процесса охлаждения воды; в-третьих – уменьшение расстояния от распылителя жидкости до слоя насадки. Известно, что на большом расстоянии происходит значительное дробление струй на капли и мелкие капли при повышении скорости начинают захватываться газовым потоком и уносятся в шлемовую линию аппарата (а в градирне в атмосферу).

В качестве регулярной насадки применялись гладкие и с регулярной дискретной шероховатостью полиэтиленовые трубки диаметром 50 мм (10 штук), а нерегулярной (хаотичной) аналогичные трубки, нарезанные в цилиндры высотой 50 мм (35 шт.) (т.е. аналог колец Рашига 50x50мм), а также металлические «Инжехим -2012» размером 16 мм [24]. Удельная поверхность верхнего слоя с кольцами –  $77 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , с «Инжехим 2012» –  $267 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , нижнего слоя  $110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Удельный свободный объем всех насадок  $\varepsilon_{\text{св}} = 0,95$ . Температура воздуха в зависимости от температуры окружающей среды от эксперимента к эксперименту находилось в интервале,  $T_{\text{гн}} = 25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ ; а воды  $T_{\text{жн}} = 35\text{-}38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Плотность орошения  $q_{\text{ж}} = 8,8\text{-}19,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$ ; скорость воздуха  $w_0 = 0,7\text{-}2,6 \text{ м/с}$ . Расходные параметры соответствуют работе промышленных пленочных градирен и мини градирен, а также ряда других теплообменных аппаратов, например абсорберов и скрубберов-охладителей газов.

#### Результаты экспериментальных исследований

Эксперименты выполнялись в три этапа. Первоначально исследовалась насадка только из полиэтиленовых шероховатых труб 50 мм ( $H_1=1,0 \text{ м}$ ) без верхнего хаотичного слоя, затем с верхним слоем ( $H_2=0,2 \text{ м}$ ) из полиэтиленовых колец (50x50мм) и на третьем этапе с хаотичной металлической насадкой «Инжехим-2012» 16 мм ( $H_2=0,2 \text{ м}$ ).

При экспериментальных исследованиях процесса на макете насадочной градирни измерялись: объемные расходы воды  $V_{\text{ж}}$  и воздуха  $V_{\text{г}}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; температуры воды на входе  $T_{\text{жн}}$ , выходе  $T_{\text{жк}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; температуры воздуха на входе  $T_{\text{гн}}$ , выходе  $T_{\text{гк}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; влагосодержание на входе  $x_{\text{н}}$ , и выходе  $x_{\text{к}}$ ,  $\text{кг/кг}$ ; перепад давления воздуха насадочного слоя  $\Delta P_{\text{г}} = P_1 - P_2$ , Па. Погрешность экспериментальных исследований не более  $\pm 7\text{-}8\%$ .

Вычислялась удельная энтальпия воздуха на входе  $I_{\text{н}} = (c_{\text{рв}} + c_{\text{рп}}x_{\text{н}})T_{\text{гн}} + r_0x_{\text{н}}$ , на выходе  $I_{\text{к}} = (c_{\text{рв}} + c_{\text{рп}}x_{\text{к}})T_{\text{гк}} + r_0x_{\text{к}}$ ,  $\text{Дж/кг}$ , где  $c_{\text{рв}}$ ,  $c_{\text{рп}}$  – удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ;  $r_0$  – скрытая теплота парообразования воды,  $\text{Дж/кг}$ . Значения равны  $c_{\text{рв}} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кгК})$ ;  $c_{\text{рп}} = 1850 \text{ Дж}/(\text{кгК})$ ;  $r_0 \approx 245 \cdot 10^4$ ,  $\text{Дж/кг}$ .

Также вычислялись значения удельных энтальпий на линии насыщения  $I_{\text{н}}^* = (c_{\text{рв}} + c_{\text{рп}}x_{\text{н}}^*)T_{\text{жн}} + r_0x_{\text{н}}^*$ ,  $I_{\text{к}}^* = (c_{\text{рв}} + c_{\text{рп}}x_{\text{к}}^*)T_{\text{жк}} + r_0x_{\text{к}}^*$ ,  $\text{Дж/кг}$ , где  $x_{\text{н}}^*$ ,  $x_{\text{к}}^*$  – влагосодержание ( $\text{кг/кг}$ ) при  $T_{\text{жн}}$ ,  $T_{\text{жк}}$  и относительной влажности  $\varphi = 100\%$ . Эти значения имеются в справочных данных и для удобства сведены в таблице 1.

Термодинамические параметры влажного воздуха на линии насыщения  
Thermodynamic parameters of humid air on the elevation line

$T, ^\circ\text{C}$	$x^*, \text{кг/кг}$	$I^*, \text{кДж/кг}$	$T, ^\circ\text{C}$	$x^*, \text{кг/кг}$	$I^*, \text{кДж/кг}$
20	0,0147	57,3	34	0,0345	122,46
21	0,01566	60,77	35	0,03659	128,89
22	0,01667	64,37	36	0,03874	135,48
23	0,01775	68,15	37	0,04111	142,65
24	0,01888	72,06	38	0,04357	150,05
25	0,0201	76,20	39	0,04616	157,80
26	0,02136	80,45	40	0,04890	165,94
27	0,0227	84,91	41	0,05178	174,46
28	0,02412	89,58	42	0,05484	186,86
29	0,02562	94,45	43	0,05806	192,86
30	0,02721	99,57	44	0,06146	202,76
31	0,02889	104,92	45	0,06506	213,18
32	0,03066	110,50	46	0,0689	222,1
33	0,03253	116,35			

\*Источник: составлено автором \*Source: compiled by the author

Локальный поток теплоты (Вт) в элементарном объеме

$$dQ = \alpha_v (T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}) dV + I_{\text{п}} dL_u, \quad (1)$$

где  $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи (Вт/(м<sup>3</sup>К)) в элементарном объеме  $dV$ ;  $I_{\text{п}}$  – энтальпия пара, Дж/кг;  $L_u$  – массовый расход испарившейся жидкости, кг/с.

Количество испарившейся жидкости  $dL_u = \beta_{xv} (x^* - x) dV$ ,  $\beta_{xv}$  – объемный коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>3</sup>с);  $\beta_{xv} = \beta_x dF / dV$ ;  $dF$  – площадь межфазной поверхности в элементарном объеме, м<sup>2</sup>.

Из приведенных выражений записывают

$$dQ = \alpha_v (T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}) dV + I_{\text{п}} \beta_{xv} (x^* - x) dV. \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса противоточной градирни

$$Q = L c_{\text{рж}} (T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}) + Q_u = G (I_{\text{к}} - I_{\text{н}}), \quad (3)$$

где  $L, G$  – массовый расход воды и воздуха, кг/с;  $Q_u = c_{\text{рж}} T_{\text{жк}} G (x_{\text{к}} - x_{\text{н}})$  – поток теплоты с испарившейся водой, Вт.

Тепловой баланс (3) на экспериментальной установке соблюдался с расхождением не более 2,5-3,0%.

На основе выражений (2), (3) с применением аналогии Льюиса записывается поток теплоты в градирне в известной форме

$$Q = G (I_{\text{к}} - I_{\text{н}}) = \beta_x F \Delta I_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $\Delta I_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила процесса теплообмена, Дж/кг;  $\beta_x$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м<sup>2</sup>с);  $F$  – площадь поверхности контакта фаз, м<sup>2</sup>.

На основе уравнения (4) из эксперимента находится объемный коэффициент массоотдачи

$$\beta_{xv} = \frac{\beta_x F}{S_{\text{к}} H} = \frac{G (I_{\text{к}} - I_{\text{н}})}{S_{\text{к}} H \Delta I_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{к}}$  – площадь поперечного сечения колонны, м<sup>2</sup>;  $H$  – общая высота слоя насадки, м; значение  $\Delta I_{\text{ср}}$  записывается как среднее логарифмическое  $\Delta I_{\text{ср}} = (\Delta I_{\text{б}} - \Delta I_{\text{м}}) / \ln(\Delta I_{\text{б}} / \Delta I_{\text{м}})$  при  $\Delta I_{\text{б}} / \Delta I_{\text{м}} \geq 2$ . При  $\Delta I_{\text{б}} / \Delta I_{\text{м}} < 2$  – как среднее арифметическое  $\Delta I_{\text{ср}} = 0,5(\Delta I_{\text{б}} + \Delta I_{\text{м}})$ .

$\Delta I_{\text{б}} = I_{\text{к}}^* - I_{\text{к}}$ ;  $\Delta I_{\text{м}} = I_{\text{н}}^* - I_{\text{н}}$  – большая и меньшая движущая сила теплообмена, Дж/кг.

Эффективность охлаждения воды  $E_{\text{ж}}$  и нагрева воздуха  $E_{\text{г}}$ , исходя из достигнутых величин к максимально возможным, записывается в форме:

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}}{T_{\text{жн}} - T_{\text{м.т.}}}, E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}^* - I_{\text{н}}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{м.т.}}$  – температура смоченного термометра окружающего воздуха, °С.

Перепад давления воздуха комбинированного насадочного слоя составит из суммы перепадов давлений нижнего (регулярного)  $\Delta P_1$  и верхнего (хаотичного)  $\Delta P_2$  слоев и имеет форму

$$\Delta P_1 = \xi_1 \frac{H_1}{d_{\text{э}1}} \frac{\rho_{\text{г}} w_0^2}{2\varepsilon_{\text{св}1}^2}; \Delta P_2 = \xi_2 \frac{H_2}{d_{\text{э}2}} \frac{\rho_{\text{г}} w_0^2}{2\varepsilon_{\text{св}2}^2}, \quad (7)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  – коэффициенты гидравлического сопротивления нижнего и верхнего слоя; нижние индексы «1» – нижний слой; «2» – верхний слой.

Экспериментальные исследования регулярной насадки из труб с дискретно-регулярной шероховатостью (рис.2) без орошения и без верхнего хаотичного слоя дают зависимость  $\xi_{1\text{сух}} = 2,2 / \text{Re}_3^{0,3}$ , при  $1500 < \text{Re}_3 < 5500$ . Верхнего хаотичного слоя из колец 50x50 мм с шероховатостью  $\xi_{2\text{сух}} \approx 2,2$  и слабо зависит от числа Рейнольдса. Коэффициент сопротивления верхнего слоя из хаотичной насадки «Инжехим-2012»  $\xi_{2\text{сух}} \approx 2,1$  и также слабо зависит от  $\text{Re}_3$ .

Средний коэффициент гидравлического сопротивления комбинированного насадочного слоя можно вычислить как сумму

$$\xi_{\text{ср}} = \xi_{1\text{сух}} \frac{H_1}{H_1 + H_2} + \xi_{2\text{сух}} \frac{H_2}{H_1 + H_2}. \quad (8)$$

Тогда перепад давления комбинированного насадочного слоя

$$\Delta P_{\text{г}} = \xi_{\text{ср}} \frac{H_1 + H_2}{d_{\text{э ср}}} \frac{\rho_{\text{г}} w_0^2}{2\varepsilon_{\text{св ср}}^2}, \quad (9)$$

где  $d_{\text{э ср}}$  – средний эквивалентный диаметр насадки  $d_{\text{э ср}} = d_{\text{э}1} H_1 / (H_1 + H_2) + d_{\text{э}2} H_2 / (H_1 + H_2)$ ; средний удельный свободный объем  $\varepsilon_{\text{св ср}} = \varepsilon_{\text{св}1} H_1 / (H_1 + H_2) + \varepsilon_{\text{св}2} H_2 / (H_1 + H_2)$ .

Представленные выражения (7)-(9) справедливы для сухого комбинированного насадочного слоя.

При подачи воды значение  $\Delta P_{\text{г}}$  зависит также и от плотности орошения (рис. 3). Очевидно, что перепад давления комбинированного слоя с насадкой «Инжехим-2012» больше, чем из колец, из-за более высокой удельной поверхности.

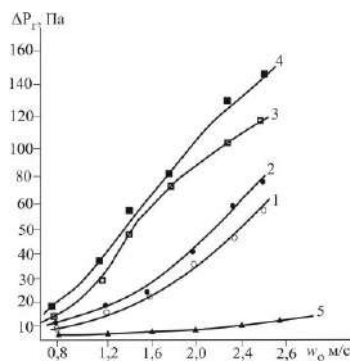


Рис. 3 Зависимость перепада давления комбинированных насадочных слоев от скорости воздуха. 1,2 – комбинация с кольцами; 3,4 – комбинация с «Инжехим-2012». 1,3 – плотность орошения  $q_{\text{ж}}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ ; 2,4 –  $q_{\text{ж}}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ ; 5 – трубы без верхнего слоя при  $q_{\text{ж}}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$

Fig. 3 Dependence of the pressure drop of the combined packing layers on the air velocity. 1,2 – combination with rings; 3,4 – combination with "Injechim-2012". 1,3 – irrigation density  $q_j=8.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ; 2,4 –  $q_j=19.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ; 5 – pipes without top layer at  $q_j=8.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

На рисунке 4 даны экспериментальные зависимости объемных коэффициентов массоотдачи (5) от скорости воздуха для комбинированных насадок. При повышении

скорости воздуха и плотности орошения объемные коэффициенты увеличиваются. Объемные коэффициенты массоотдачи комбинированных насадок больше на 20-35%, чем у шероховатой насадки без верхнего слоя. У насадки из гладких труб без верхнего хаотичного слоя коэффициент массоотдачи меньше на 8-12%, а у цилиндрической сетчатой насадки (10 трубок), исследованной в работе [25], меньше в 1,5-3 раза.

Коэффициенты массоотдачи можно вычислить с применением математических моделей для регулярных и хаотичных орошаемых насадок [9,26]. Расчеты по данным выражениям  $Sh_T \propto f(Re_o, \xi_{ор}, Sc_T)$  делают средние значения коэффициентов массоотдачи, отнесенные к площади межфазной поверхности (контакта фаз), где  $Sh_T = \beta_T d_o / D_T$  – число Шервуда;  $\beta_T$  – средний коэффициент массоотдачи, м/с;  $D_T$  – коэффициент молекулярной диффузии влаги (паров) в воздухе, м<sup>2</sup>/с;  $Sc_T = \nu_T / D_T$  – число Шмидта.

Объемный коэффициент массоотдачи (5) запишется в виде  $\beta_{XV} = \beta_T \rho_T \psi_a a_V$ , где  $\psi_a$  – коэффициент активной поверхности, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>[9]. Значение  $\psi_a$  можно весьма приблизительно вычислить для близких по конструкции и материалу насадок [8,9], что дает очень приближенное значение  $\beta_{XV}$ . Поэтому далее дано обобщенное эмпирическое выражение для комбинированной насадки с «Инжеим-2012» в виде широко используемого для градиен.

Для комбинированной насадки с хаотичной «Инжеим 2012» (16 мм) зависимость объемного коэффициента массоотдачи получена в виде

$$\beta_{XV} = 0,198 q_{ж}^{1,02} (G/L)^{0,75}. \quad (10)$$

Выражение (10) обеспечивает согласование с экспериментальными данными (рис. 4) в пределах  $\pm 10\%$  (кривые 3,4).

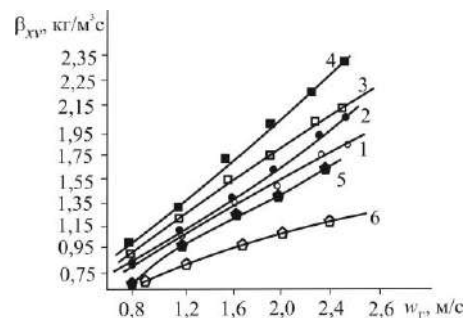


Рис. 4 Зависимость объемных коэффициентов массоотдачи различных насадок от скорости воздуха с кольцами (кривые 1,2) и «Инжеим-2012» (кривые 3,4) 1,3 –  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 2,4 –  $q_j = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 5 – гладкие трубы; 6 – сетчатая насадка [15] при  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$

Fig. 4 Dependence of the volumetric mass transfer coefficients of various nozzles on the air velocity with rings (curves 1,2) and "Injechim-2012" (curves 3,4) 1,3 –  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$ ; 2,4 –  $q_j = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$ ; 5 – smooth pipes; 6 – mesh nozzle [15] at  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$ ;

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

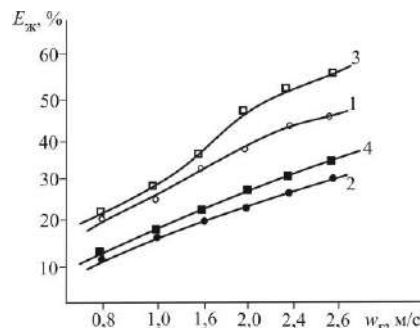


Рис. 5. Зависимость эффективности охлаждения воды от скорости воздуха. 1,2 – плотность орошения  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 2,4 –  $q_j = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 5 – трубы без верхнего слоя при  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$

Fig. 5. Dependence of water cooling efficiency on air velocity. 1,2 – combination with rings; 3,4 – combination with "Injechim-2012". 1,3 – irrigation density  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$ ; 2,4 –  $q_j = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$ ; 5 – pipes without top layer at  $q_j = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ h})$

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости тепловой эффективности (6) от скорости воздуха при различной плотности орошения. С комбинированной насадкой «Инжехим-2012» эффективность охлаждения воды выше 1,5-2 раза, чем в комбинации с кольцами. Эффективность  $E_{ж}$  при увеличении скорости воздуха повышается, а в газовой фазе  $E_{г}$  – понижается. Повышения  $E_{ж}$  объясняется большим притоком охлаждающего воздуха и его турбулизацией. Снижение  $E_{г}$  при увеличении скорости  $w_{г}$  происходит из-за зависимости теплового числа единиц переноса  $N_{г} = \beta_{хв} S_{к} H / (\rho_{г} V_{г})$ , где числитель повышается при увеличении  $w_{г}$  примерно в степени 0,7-0,8 (коэффициент массоотдачи), а знаменатель в первой степени (расход воздуха). Это в итоге дает понижение  $N_{г} \propto w_{г}^{-(0,2-0,3)}$ , что и вызывает уменьшение тепловой эффективности  $E_{г}$  в газовой фазе исходя из законов тепломассопередачи.

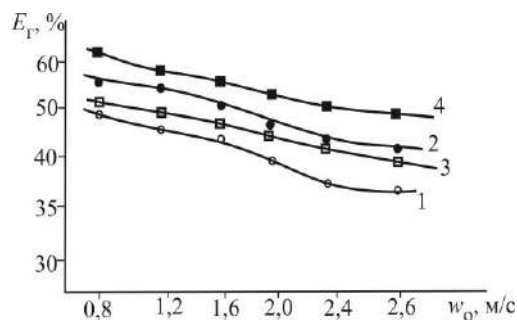


Рис. 6 Зависимость тепловой эффективности в газовой фазе от скорости воздуха при различной плотности орошения. 1,3 – плотность орошения  $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ ; 2,4 –  $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ ; 5 – трубы без верхнего слоя при  $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$

Fig. 6 Dependence of thermal efficiency in the gas phase on air velocity at different irrigation densities. 1,2 – combination with rings; 3,4 – combination with "Injechim-2012". 1,3 – irrigation density  $q_j=8.8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{h})$ ; 2,4 –  $q_j=19.4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{h})$ ; 5 – pipes without top layer at  $q_j=8.8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{h})$

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

### Выводы

Физическое и математическое моделирование проводимых процессов является важной составляющей при разработке новых конструкций аппаратов или модернизации действующих. В настоящее время известны сотни разнообразных конструкций контактных устройств для процессов тепломассообмена в газожидкостных средах, и в частности в пленочных градириях.

При применении теоретических методов расчета градирен в виде численных или приближенных математических моделей необходимы экспериментальные исследования тепломассообменных характеристик новых типов контактных устройств. В первую очередь к таким характеристикам относится объемный коэффициент массоотдачи, который существенно зависит от конструкции и гидродинамики потоков. Таким образом, экспериментальные исследования имеют важное значение как для теории, так и для практики организации процессов в газожидкостных средах.

Одним из перспективных направлений развития конструкций контактных устройств (блоков оросителей градирен) является комбинация различных типов, что позволяет снизить их стоимость и повысить эффективность охлаждения воды. Организация сверху насадки активного участка тепломассообмена в виде хаотичного слоя позволяет максимально использовать движущую силу процесса испарительного охлаждения воды. Исследованные в данной работе два вида комбинированных насадок – регулярной и нерегулярной (хаотичной) повышают эффективность охлаждения воды на 15-35% по сравнению с применением только регулярной насадки. Представлены и сделаны выводы по полученным графическим зависимостям перепада давления, объемного коэффициента массоотдачи и тепловой эффективности по жидкой (воде) и газовой (воздуху) фазам.

Экспериментальные данные могут применяться при проектировании или модернизации градирен на различных промышленных предприятиях и тепловых станциях.

### Литература

1. Мадышев И.Н., Гарипов М.Г., Латыпов Д.Н., Харьков В.В., Дмитриев А.В. Определение гидравлического сопротивления контактного устройства со встроенным дефлегматором // Вестник технологического университета. 2022. Т.25, №1. – С. 41.

2. Laptev A.G., Farakhov T.M., Basharov M.M. Processes and apparatuses of chemical technologies: modeling and modernization of industrial desulfurizing packed columns at refineries // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016. Т. 52. № 5. С. 472-479.

3. Скачков И. В., Бальчугов А. В., Рыжов С. О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2012. – № 3(35). – С. 147-150.

4. Пушнов А. С., Цурикова Н. П., Шинкунас С. [и др.] Совершенствование конструкций контактных устройств для градирен: / под об.ред. А. С. Пушнова, А. Сакалаускаса. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 382 с.

5. Bespalov V.V. Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating / V.V. Bespalov, L.A. Belyaev, L.S. Kuchman // *MATEC Web of Conferences*. 2017. № 91. 01003.,

6. Boyadjiev C.H.R.B., Dzhonova D.B., Popova-Krumova P.G., Stefanova K.V., Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. Liquid wall flow in counter-current column apparatuses for absorption processes with random packings // *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. V. 52. P. 74–79.

7. Сокол, Б. А., Чернышев А. К., Баранов Д. А.. Насадки массообменных колонн : – Москва : Галилея-принт, 2009. – 358 с.

8. Витковская Р.Ф., Пушнов А.С, Шинкунас С. Аэрогидродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов: Лань-Пресс. 2019. – 288с.

9. Каган А. М., Лаптев А. Г, Пушнов А. С., Фарахов М. И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

10. Федяев В. Л., Власов Е. М., Гайнуллина Р. Ф., Гайнуллин Р. Ф. Оценка охлаждающей способности оросительных градирен // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2011. – № 3-4. – С. 27-32.

11. Cioncolini, A. Pressure drop prediction in annular two-phase flow in macroscale tubes and channels / A. Cioncolini, J.R. Thome // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. – No. 89. – P. 321–330.

12. A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, V.V. Kharkov, O.S. Dmitrieva, V.E. Zinurov. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower. *ThermSciEngProg*. 22 (2021) 9.

13. R. Ramkrishnan, R. Arumugam. Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing. *ProcessingandApplicationofCeramics*. 7 (2013) 21-7.

14. R. Ramkumar, A. Ragupathy. Optimization of cooling tower performance with different types of packings using Taguchi approach. *J BrazSocMechSciEng*. 37 (2015) 929-36.

15. M. Rahmati, S.R. Alavi, M.R. Tavakoli. Experimental investigation on 486 performance enhancement of forced draft wet cooling towers with special emphasis on the role of stage numbers. *EnergyConvManag*. 126 (2016) 971-81.

16. G. Raj, P. Chandra, P.K. Pathak. Comparative analysis of two different types of fills used in wet cooling tower for higher-scale water with conventional film type fill. *HeatTransf-AsianRes*. 48 (2019) 493 4000-15.

17. B.K. Naik, P. Muthukumar. A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. *ApplThermEng*. 121 (2017) 14-26.

18. L. Wang, X. Wang, J. Lu. Research on heat transfer model and affecting factors for cross flow cooling towers. *JournalofThermalScienceandTechnology*. 14 (2015) 278-82.

19. Interfacial friction in upward annular gas–liquid two-phase flow in pipes / A.M. Aliyu, Y.D. Baba, L. Lao et al. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – No. 84. – P. 90–109.

20. Prediction of interfacial shear stress of vertical upward adiabatic annular flow in pipes / P. Ju, Y. Liu, C.S. Brooks, M. Ishii // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – No. 133. – P. 500–509.

21. Федяев В.Л., Снигерев Б.А., Моренко И.В., Гайнуллин Р.Ф., Гайнуллина Р.Ф. О модернизации градирен СК-1200 // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2009. № 5-6. С. 43-51.

22. Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Круглов Л.В., Чичирова Н.Д. Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена в трехпоточной испарительной градирне с наклонно-гофрированными контактными элементами // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2020. Т. 12. № 4 (48). С. 126-135.

23. Розен, А. М., Мартюшин Е. И., Олевский В. М. [и др.] Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования: / под ред. А. М. Розена. – Москва : Химия, 1980. – 320 с.



24. Фарахов Т.М., Фарахов М.М., Лаптева Е.А. Обобщенные гидравлические и массообменные характеристики новых контактных насадок колонных аппаратов// Химическая промышленность сегодня. 2016. № 2. С. 50-56.

25. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен. Казань: КГЭУ, 2004. – 180с.

26. Laptev A.G., Lapteva E.A. Mathematical models of friction on the surface of phase separation and heat and mass transfer in film units of cooling-tower sprinklers with intensifiers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. Т. 55. № 5. С. 906-913.

#### Авторы публикации

**Столярова Екатерина Юрьевна** – аспирант, Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

**Лаптева Елена Анатольевна** – доцент, к.т.н., доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия.

**Лаптев Анатолий Григорьевич** – профессор, д.т.н., профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия.

#### References

1. Madyshev IN, Garipov MG, Latypov DN, et al. Opredeleniye gidravlicheskogo soprotivleniya kontaktnogo ustroystva so vstroynym deflegmatorom. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2022;25(1):41.

2. Laptev AG, Farakhov TM, Basharov MM. Processes and apparatuses of chemical technologies: modeling and modernization of industrial desulfurizing packed columns at refineries. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;52(5):472-479.

3. Skachkov IV, Bal'chugov AV, Ryzhov SO. Gidrodinamicheskiye issledovaniya tekhnologii gazozhidkostnykh protsessov na novoy regul'arnoy nasadke. Sovremennyye tekhnologii. *Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2012;3(35).

4. Pushnov AS, Tsurikova NP, Shinkunas S. *Sovershenstvovaniye konstruktivnykh kontaktnykh ustroystv dlya gradiren: / pod ob.red. A. S. Pushnova, A. Sakalauska*. Sankt-Peterburg : POLITEKH-PRESS, 2020. 382 P.

5. Bepalov VV, Belyaev LA, Kuchman LS. Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating. *MATEC Web of Conferences*. 2017;91. 01003.,

6. Boyadjiev C.H.R.B, Dzhonova DB, Popova-Krumova PG, et al. Liquid wall flow in counter-current column apparatuses for absorption processes with random packings. *Bulgarian Chemical Communications*. 2020;52:74-79.

7. Sokol BA, Chernyshev AK, Baranov DA. *Nasadki massoobmennykh kolonn: – Moskva: Galileya-print, 2009. 358 P.*

8. Vitkovskaya RF, Pushnov AS, Shinkunas S. *Aerogidrodinamika i teplomassoobmen nasadochnykh apparatov: Lan'-Press. 2019. 288P.*

9. Kagan AM, Laptev AG, Pushnov AS, et al. *Kontaktnyye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennykh apparatov: Kazan': Otechestvo, 2013. 454 P.*

10. Fedyayev VL, Vlasov YeM, Gaynullina RF, et al. Otsenka okhlazhdayushchey sposobnosti orositel'nykh gradiren. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2011;3-4:27-32.

11. Cioncolini A, Thome JR. Pressure drop prediction in annular two-phase flow in macroscale tubes and channels. *International Journal of Multiphase Flow*. 2017;89:321–330.

12. Dmitriev AV, Madyshev IN, Kharkov VV, et al. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower. *ThermSciEngProg*. 22 (2021):9.

13. R. Ramkrishnan, R. Arumugam. *Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing*. *ProcessingandApplicationofCeramics*. 7:(2013):21-7.

14. R. Ramkumar, A. Ragupathy. Optimization of cooling tower performance with different types of packings using Taguchi approach. *J BrazSocMechSciEng*. 37:(2015):929-36.

15. M. Rahmati, S.R. Alavi, M.R. Tavakoli. Experimental investigation on 486 performance enhancement of forced draft wet cooling towers with special emphasis on the role of stage numbers. *EnergyConvManag.* 126 (2016) 971-81.
16. G. Raj, P. Chandra, P.K. Pathak. Comparative analysis of two different types of fills used in *wet cooling tower for higher-scale water with conventional film type fill.* *HeatTransf-AsianRes.* 48 (2019) 493 4000-15.
17. B.K. Naik, P. Muthukumar. A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. *ApplThermEng.* 121 (2017) 14-26.
18. L. Wang, X. Wang, J. Lu. Research on heat transfer model and affecting factors for cross flow cooling towers. *JournalofThermalScienceandTechnology.* 14 (2015) 278-82.
19. Aliyu AM., Baba YD., Lao L, et al. Interfacial friction in upward annular gas–liquid two-phase flow in pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2017;84:90–109.
20. Prediction of interfacial shear stress of vertical upward adiabatic annular flow in pipes / P. Ju, Y. Liu, C.S. Brooks, M. Ishii. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019;133:500–509.
21. Fedyayev VL, Snigerev BA, Morenko IV, et al. O modernizatsii gradiren SK-1200. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki.* 2009;5-6:43-51
22. Dmitriyev AV, Madyshev IN, Kruglov LV, et al. Otsenka effektivnosti protsessov teplo- i massoobmena v trekhpotochnoy isparitel'noy gradirne s naklonno-gofrirovannymi kontaktnymi elementami. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta.* 2020;12(4 (48):126-135.
23. Rozen, AM, Martyushin YeI, Olevskiy VM, et al. *Masshtabnyy perekhod v khimicheskoy tekhnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya:* / pod red. A. M. Rozena. Moskva : Khimiya, 1980. 320 p.
24. Farakhov TM, Farakhov MM, Lapteva YeA. Obobshchennyye gidravlicheskiye i massoobmennyye kharakteristiki novykh kontaktnykh nasadok kolonnykh apparatov. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya.* 2016;2:50-56.
25. Laptev AG, Ved'gayeva IA. *Ustroystvo i raschet promyshlennykh gradiren.* Kazan': KGEU, 2004. 180p.
26. Laptev AG, Lapteva EA. Mathematical models of friction on the surface of phase separation and heat and mass transfer in film units of cooling-tower sprinklers with intensifiers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2021;55(5):906-913.

#### **Authors of the publication**

**Ekaterina Yu. Stolyarova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Elena A. Lapteva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Anatoly G. Laptev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Получено** **13.02.2023г.**

**Отредактировано** **27.02.2023г.**

**Принято** **01.03.2023г.**

УДК 662.76

## РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ПОТОЧНОГО ТИПА

Валиуллин Б.Р., Мингалеева Г.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
[mingaleeva-gr@mail.ru](mailto:mingaleeva-gr@mail.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью диверсификации топливно-энергетического баланса России и использования угля в качестве сырья для получения генераторного газа. Целью данной работы является обоснование выбора системы пылеприготовления для поточной газификации угля и определение режимных параметров, влияющих на работу поточного газогенератора. МЕТОДЫ. Обоснован выбор системы пылеприготовления замкнутого типа с промежуточным бункером пыли и шаровыми барабанными мельницами. С использованием нормативной методики проведен ее расчет при изменении параметров сушки и измельчения с определением составляющих теплового баланса для углей наиболее перспективных месторождений России Соколовского угля марки ДГ и Ирша-Бородинского бурого угля. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены зависимости расхода топлива и удельных затрат на измельчение от дисперсного состава угольной пыли. Определена температура и расход сушильного агента для каждого значения показателя крупности измельчения  $R_{90}$ . При увеличении диаметра частиц, который определяется параметром  $R_{90}$ , наблюдается снижение удельных затрат энергии на размол примерно в 2 раза, как для Соколовского каменного угля, так и для бурого Ирша-Бородинского. При этом расход сушильного агента для сушки и измельчения Соколовского угля соответствует номинальному во всем диапазоне изменения параметров, а для Ирша-Бородинского при более низких значениях влажности готовой пыли превышает номинальные значения в 1,5-2 раза. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При расчете системы пылеприготовления угля для поточного газогенератора могут быть получены исходные данные для моделирования процесса газификации, такие как дисперсный состав и влажность пыли в достаточно широком диапазоне изменения данных параметров, влияющих на состав получаемого генераторного газа. Также получены значения удельных расходов энергии на размол, которые учитываются при определении затрат на собственные нужды газификационной установки.

**Ключевые слова:** пылеприготовление; поточный газогенератор; дисперсный состав; влажность пыли; измельчение угля.

**Для цитирования:** Валиуллин Б.Р., Мингалеева Г.Р. Режимные параметры системы пылеприготовления для газогенераторов поточного типа // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1(57). С. 48-57.

## OPERATING PARAMETERS OF THE DUST PREPARATION SYSTEM FOR FLOW-TYPE GAS GENERATORS

BR. Valiullin, GR. Mingaleeva

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russia  
[mingaleeva-gr@mail.ru](mailto:mingaleeva-gr@mail.ru)

**Abstract:** RELEVANCE of this study is due to the need to diversify the fuel and energy balance of Russia and use coal as a raw material for generating gas. THE PURPOSE of this work is to justify the selection of a dust production system for in-line coal gasification and to determine the operating parameters affecting the operation of the in-line gas generator. METHODS. The choice of a closed-type dust preparation system with an intermediate dust hopper and ball drum mills is justified. Using the regulatory procedure, it was calculated when changing the drying and grinding parameters with the determination of the heat balance components for the coals of the most promising deposits of Russia, Sokolovsky coal of the DG brand and Irsha-Borodino brown coal. RESULTS. Dependence of fuel consumption and specific costs of grinding on dispersed composition of coal dust is obtained. Temperature and flow rate of drying agent for each value of  $R_{90}$  grinding size index are determined. With an increase in particle diameter, which is determined by the  $R_{90}$  parameter, there is a decrease in specific energy costs for grinding by

*about 2 times, both for Sokolovsky coal and for brown Irsh-Borodinsky. Consumption of drying agent for drying and grinding Sokolovsky coal corresponds to nominal value in the whole range of parameters change, and for Irsh-Borodinsky at lower values of moisture content of finished dust exceeds nominal value by 1.5-2 times. CONCLUSION. In calculating the coal dusting system for the in-line gas generator, initial data can be obtained for simulating the gasification process, such as dispersion composition and dust humidity over a sufficiently wide range of changes in these parameters affecting the composition of the resulting generator gas. The values of specific energy consumption for grinding were also obtained, which are taken into account when determining the costs for own needs of the gasification plant.*

**Keywords:** *dust preparation; in-line gas generator; dispersion composition; dust humidity; coal grinding.*

**For citation:** Valiullin BR, Mingaleeva GR. Operating parameters of the dust preparation system for flow-type gas generators. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57): 48-57.

### **Введение и литературный обзор**

В условиях резких колебаний цен на нефть и газ и ограниченных возможностей возобновляемых источников энергии твердое топливо, в частности угли различных марок, остается доступным и достаточно дешевым топливом для многих стран. Для России еще в недавнем прошлом уголь являлся широко используемым ресурсом, на основе которого вырабатывалась значительная часть тепловой и электрической энергии путем его прямого сжигания в котлах пылеугольных электростанций. Однако в связи с развитием парогазовых технологий актуальным является интегрирование в их структуру установок переработки твердого топлива для получения газа, пригодного для сжигания в камерах сгорания газотурбинных установок. Наиболее перспективными в этом контексте являются процессы газификации угля [1] и других видов топлив, в том числе и низкокачественных (торф, биомасса и др.).

Существуют различные способы газификации, каждый имеет предпочтительную область применения, определенные достоинства и недостатки [2, 3]. Наиболее перспективными на сегодняшний день являются технологии поточной газификации [4], которые особенно активно развиваются в Китае и других странах Азии. Одной из наиболее перспективных областей применения газификационных установок является производство водорода [5, 6] при комплексной переработке углеводородного сырья.

Конструкции поточных газогенераторов весьма разнообразны и отличаются по способу подачи компонентов, вариантам подвода теплоты к реагирующей смеси, отведения и охлаждения полученного газа [7-11].

Однако крайне редко встречаются работы, в которых бы рассматривались системы подготовки топлива для подачи в газогенератор. Например, системы подготовки твердого топлива для процесса газификации рассматривались в работах [12, 13], где определялись основные факторы, влияющие на процесс переработки углей, такие как дисперсный состав получаемой пыли и влажность.

Очевидно, что могут быть отличия данных систем от тех, которые используются для сушки и пылеприготовления для котельных установок. Например, влажность пыли для поточного газогенератора может быть выше, поскольку влага топлива способствует образованию водорода в генераторном газе, что является благоприятным фактором. Кроме того, затраты энергии на измельчение угля также играют значительную роль в общих затратах на собственные нужды газификационной установки, которые необходимо минимизировать.

Поэтому целью настоящей работы является определение режимных параметров работы систем пылеприготовления угля, влияющих на работу поточного газогенератора, таких как дисперсный состав и влажность угольной пыли. Рассмотренная система пылеприготовления является составной частью газификационной установки, и параметры ее работы влияют на общую эффективность процесса получения генераторного газа определенного состава. Научная значимость полученных результатов связана с формированием последовательности расчета и выбора режимных параметров системы пылеприготовления угля для поточного газогенератора. Полученные значения затрат энергии на измельчение и расходов угля и сушильного агента обладают практической значимостью для последующего проектирования газификационной установки.

**Материалы и методы**

Параметры угольной пыли, подаваемой в газогенератор, в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к дисперсному составу и влажности угольной пыли, сжигаемой в котельных установках. Для определения крупности пыли используют сита с размерами отверстий 90, 200 и 1000 мкм и показатели в виде остатка на сите соответствующего размера  $R_{90}$  и  $R_{200}$  в процентах от общего количества пыли. Выбор данных значений зависит от вида угля и типа углеразмольной мельницы.

Для проведения расчетов выбраны угли наиболее перспективных месторождений РФ – Соколовского и Ирша-Бородинского, состав которых приведен в таблице 1 [14]. Данные угли существенно отличаются по своим характеристикам, таким как влажность и размолоспособность, что оказывает влияние на режимные параметры системы пылеприготовления.

Таблица 1  
Table 1Состав и свойства углей различных марок [14]  
*Composition and properties of coal grades [14]*

Угли	Содержание элементов в горючей массе угля, %					Зольность $A^p$ , %	Влажность, $W^p$ , %	Выход летучих, $V^r$ , %	Коэффициент размолоспособности, $K_{10}$
	$C^r$	$H^r$	$O^r$	$N^r$	$S^r$				
Соколовский ДГ	80,9	5,8	9,7	1,5	0,3	15,9	10	42,9	1,15
Ирша-Бородинский Б	72	5	20,8	1,3	0,9	10,2	32	49	1,2

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Из всего многообразия систем подготовки твердого топлива, представленных в работе [15] для газификационных установок подходят далеко не все. В качестве сушильного агента в таких системах целесообразно использовать только воздух, поэтому системы с сушкой продуктами сгорания исключаются из рассмотрения, поскольку продукты сгорания в газогенераторах отсутствуют, а получаемый генераторный газ является целевым продуктом.

Система пылеприготовления должна быть замкнутой с промежуточным бункером готовой пыли. Воздух, поступающий в качестве транспортирующего агента в газогенератор, является также окислителем.

Для исследования выбрана система, оборудованная шаровой барабанной мельницей (ШБМ), поскольку она применяется практически для всех типов углей и в настоящее время производится Сызранским заводом тяжелого машиностроения. Основные характеристики мельницы представлены в таблице 2. Мельница является наименьшей по производительности среди мельниц данного типа и может использоваться в газификационных и энергетических установках малой мощности.

Таблица 2  
Table 2Основные характеристики шаровой барабанной мельницы ШБМ 220/330 [15]  
*Main characteristics of ball drum mill WBM 220/330 [15]*

Показатель	Значение
Номинальная производительность, т/ч	6
Частота вращения (номинальная), $\text{мин}^{-1}$	21,8
Максимальная температура сушильного агента, °C	450
Остаток на сите с размером ячейки 0,09 мм ( $R_{90}$ ), %	6-10
Внутренняя длина барабана, мм	3300
Внутренний диаметр барабана, мм	2200
Мощность, потребляемая электродвигателем, кВт, не более	150
Масса шаров, загружаемых в мельницу, т, не более	14
Расход сушильного агента за мельницей, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$	16,4

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Номинальная производительность мельницы определяется для условного угля с коэффициентом размолоспособности, равном 1. При измельчении углей с иными значениями данного коэффициента производительность мельницы будет изменяться. В ходе расчета необходимо определить расход угля и затраты энергии на размол при различном заданном дисперсном составе угольной пыли и ее влажности. Повлиять на

выходные параметры можно путем изменения расхода и температуры подаваемого сушильного агента (воздуха).

При расчете использовались следующие основные зависимости для определения эффективности и расхода топлива в шаровых барабанных мельницах [16].

Расход топлива в шаровой барабанной мельнице (ШБМ) при условии, что после нее установлен центробежный сепаратором, определяется по формуле, т/ч:

$$B = K_c \cdot \Pi_g \cdot \Pi_T \cdot \varphi^{0,8} \cdot \psi^{0,8} \cdot V_{\delta}, \quad (1)$$

где  $K_c = K_{бр} \cdot K_{эк}$  – суммарный эксплуатационный коэффициент, в котором  $K_{бр}$  – коэффициент, учитывающий форму брони (для неизношенной волнистой брони равный 1,0);  $K_{эк}$  – коэффициент, учитывающий снижение производительности в эксплуатационных условиях из-за увеличения присосов, ухудшения качества топлива, износа брони и шаров и ряда других причин, обычно его принимают равным 0,9;  $\Pi_g$  – коэффициент, учитывающий влияние вентиляции барабана на производительность мельницы.

В формуле (1) используется коэффициент, который позволяет учесть влияние размоловоспособности исходного угля и дисперсного состава получаемой пыли на производительность мельницы, рассчитывается следующим образом:

$$\Pi_T = \frac{2,8 \cdot K_{ло} \cdot \Pi_{вл1} \cdot \Pi_{вл2}}{\Pi_{оп} \cdot \sqrt{\ln \frac{100}{R_{90}}}}, \quad (2)$$

где  $K_{ло}$  – коэффициент размоловоспособности топлива;  $R_{90}$  – остаток на сите с размерами ячеек 90 мкм.

Коэффициент  $\Pi_{вл1}$  в формуле (2), в свою очередь, учитывает влияние влажности на размоловоспособность угля и определяется по зависимости:

$$\Pi_{вл1} = \sqrt{\frac{K^2 - W_{cp}^2}{K^2 - (W^{su})^2}}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий максимальную влажность топлива:

$$K = 1 + 1,07 \cdot W^p, \quad (4)$$

где  $W^{su}$  и  $W^p$  – гигроскопическая и рабочая влажность угля соответственно.

При помощи коэффициента  $\Pi_{вл}$  можно пересчитать массу угля с влажностью  $W_{cp}$  на влажность  $W_1$  при наличии предварительной подсушки угля:

$$\Pi_{вл2} = \frac{100 - W_{cp}}{100 - W_1}, \quad (5)$$

где  $W_1$  – влажность угля, поступающего в мельницу (если отсутствует предварительная подсушка угля, то  $W_1 = W^p$ ). Здесь средняя влажность угля рассчитывается по формуле:

$$W_{cp} = \frac{W_1 + a \cdot W^{nl}}{a + 1}, \quad (6)$$

где  $a = 3$  для бурых углей и сланцев,  $a = 6$  для каменных углей;  $W^{nl}$  – влажность пыли.

В формулу (1) также входит  $\varphi$  – безразмерная величина, характеризующая частоту вращения барабана мельницы, для ее определения используют соотношение:

$$n_{\delta} = \varphi \cdot n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{D_{\delta}}} \cdot \varphi, \quad (7)$$

где  $n_{\delta}$  – частота вращения барабана, мин<sup>-1</sup>;  $n_{кр}$  – критическая частота вращения барабана, мин<sup>-1</sup>;  $D_{\delta}$  – внутренний диаметр барабана, м.

В (1)  $\psi_{\delta}$  – степень заполнения барабана шарами. При этом:

$$\psi_{\delta} = \frac{m_{ш}}{\rho_{н.ш} \cdot V_{\delta}}, \quad (8)$$

где  $m_{ш}$  – масса шаров, загружаемых в мельницу, т;  $\rho_{н.ш}$  – насыпная плотность шаров, т/м<sup>3</sup>;  $V_{\delta}$  – внутренний объем барабана, м<sup>3</sup>.

При определении коэффициента вентиляции  $\Pi_g$  для вентилируемых ШБМ оптимальный расход сушильного агента, м<sup>3</sup>/ч, через мельницу по условиям размола определяется в виде:

$$V_{MBoпт} = \frac{0,9 \cdot V_{\delta}}{\varphi} \cdot (1000 \cdot \sqrt{K_{ло}} + 36 \cdot R_{90} \cdot \sqrt{K_{ло}} \cdot \sqrt[3]{\psi_{\delta}}) \quad (9)$$

Мощность, потребляемая электродвигателем из сети, кВт, рассчитывается по соотношению:

$$N_c = \frac{N_{e.d.}}{\eta_{эл}}, \quad (10)$$

где  $N_{e.d.}$  – мощность на валу двигателя, кВт/ч, определяемая в зависимости от конструктивных параметров мельницы;  $\eta_{эл}$  – КПД электродвигателя. Таким образом, мощность на валу двигателя определяется по зависимости:

$$N_{e.d.} = \frac{0,122 \cdot D_б^3 \cdot L_б \cdot n_б \cdot \rho_{н.ш} \cdot \psi_б^{0,9} \cdot K_{бр} \cdot K_T + 1,86 \cdot D_б \cdot L_б \cdot n_б \cdot S_б}{\eta_{II}}, \quad (11)$$

где  $\eta_{II}$  – КПД привода;  $D_б$  и  $L_б$  – внутренние диаметр и длина барабана мельницы соответственно, м.

После определения расхода топлива через мельницу при заданных параметрах угольной пыли составляется тепловой баланс пылеприготовительной установки.

Согласно исследованиям, результаты которых представлены в работе [17], на эффективность мельницы и качество процесса измельчения влияют как конструктивные параметры мельницы (скорость вращения барабана, форма брони и др.), так и режимные (степень заполнения барабана шарами, расход и температура сушильного агента, присосы воздуха).

Изменение данных параметров регулируется в рамках теплового баланса, в который входят следующие составляющие, определяемые в кДж на 1 кг сырого (исходного) топлива:

- теплота сушильного агента, поступающего в мельницу, температура и расход которого определяется исходя из условий сушки,  $q_{са}$ ;
- теплота, которая выделяется в результате трения мелющих органов мельницы и угля, зависящая от параметров измельчения и затрат энергии на размол угля,  $q_{мех}$ ;
- теплота, поступающая с присосами воздуха и зависящая от доли присосов для систем, работающих под разрежением,  $q_{прс}$ ;
- теплота, которая затрачивается на испарение влаги топлива и зависит от влажности поступающего угля и заданной влажности готовой пыли,  $q_{исп}$ ;
- теплота сушильного агента, покидающего пылеприготовительную установку, зависящая от температуры на выходе,  $q_2$ ;
- теплота, которая затрачивается на подогрев топлива от 0 °С до температуры сушильного агента на выходе из пылеприготовительной установки,  $q_t$ ;
- потери теплоты в окружающую среду, определяемые по справочным данным с учетом расхода топлива через установку,  $q_5$ .

Таким образом, тепловой баланс имеет следующий вид:

$$q_{са} + q_{мех} + q_{прс} - q_{исп} - q_2 - q_t - q_5 = 0. \quad (12)$$

Составляющие теплового баланса определялись по рекомендациям [15]. Невязка теплового баланса составляла не более 5%.

Удельные затраты энергии на размол топлива определялись по зависимости:

$$\mathfrak{E}_p = \frac{N_c + N_{доп}}{B}, \quad (13)$$

где  $N_{доп}$  – дополнительная мощность, затрачиваемая на собственные нужды пылеприготовительной установки (в случае применения синхронных двигателей  $N_{доп}=50$  кВт, асинхронных двигателей  $N_{доп}=15$  кВт).

### **Результаты и обсуждение**

Для определения режимных параметров системы пылеприготовления угля проведены расчеты при изменении следующих параметров:

- остаток на сите с размерами ячеек 90 мкм  $R_{90}$  изменялся от 10 до 60%, то есть частицы пыли становились более крупными;
- влажность пыли для каждого угля устанавливалась в зависимости от исходной влажности.

Для Соколовского угля марки ДГ влажность получаемой угольной пыли задавалась от 5 до 10%, то есть большее значение соответствовало процессу измельчения без сушки. Гигроскопическая влажность данного угля составила  $W^H=4\%$ . Для Ирша-Бородинского бурого угля влажность пыли изменялась от 12 до 27% при  $W^H=10\%$ .

Авторами получены зависимости режимных параметров системы пылеприготовления для Соколовского каменного угля марки ДГ (рис.1-4) и для Ирша-Бородинского бурого угля (рис.5-8).

Зависимости расхода Соколовского каменного угля марки ДГ при различной крупности пыли и при изменении ее влажности представлены на рисунке 1.

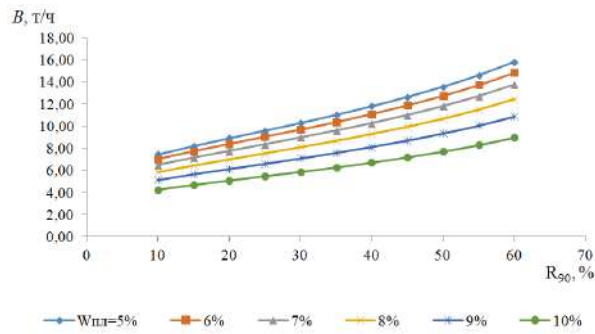


Рис.1. Зависимости расхода топлива от крупности пыли  $R_{90}$  для Соколовского угля марки ДГ при различных значениях влажности готовой пыли  
*Fig.1. Dependence of fuel consumption on dust size  $R_{90}$  for Sokolovsky coal of DG brand at different humidity values of finished dust*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Наибольший расход наблюдается при наименьшей влажности пыли равной 5% и при увеличении влажности пыли расход угля через мельницу снижается. При угрублении помола расход угля увеличивается с 7,44 до 15,8 т/ч. Аналогичные зависимости наблюдаются и для других значений влажности пыли.

При этом удельный расход энергии на размол, представленный на рисунке 2, будет наименьшим при влажности пыли равной 5% и снижается с укрупнением помола, т.е. увеличением параметра  $R_{90}$ .

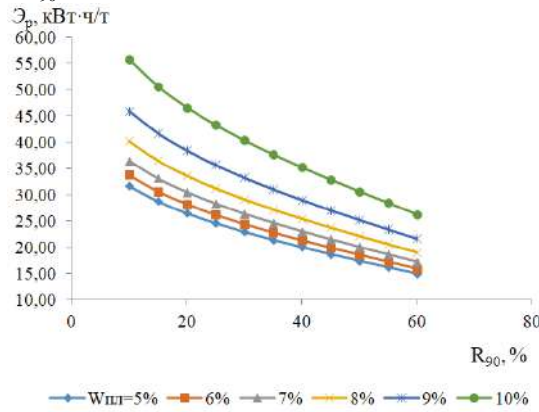


Рис.2. Зависимости удельного расхода электроэнергии на размол от крупности пыли  $R_{90}$  для Соколовского угля марки ДГ при различных значениях влажности готовой пыли  
*Fig.2. Ratio of specific electricity consumption for grinding to dust  $R_{90}$  for Sokolovsky coal of DG brand at different humidity values of finished dust*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

При изменении влажности готовой пыли существенно изменяется удельный расход сушильного агента, приходящийся на 1 кг исходного сырого угля, и его температура. График данных зависимости для Соколовского угля марки ДГ представлен на рисунках 3 и 4.

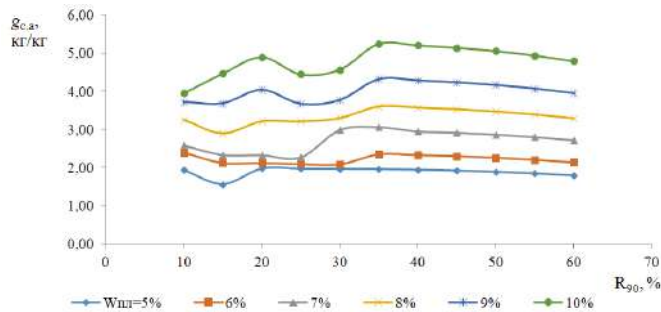


Рис.3. Зависимости удельного расхода сушильного агента от крупности пыли  $R_{90}$  для Соколовского угля марки ДГ при различных значениях влажности готовой пыли  
*Fig. 3. Ratio of specific drying agent consumption to dust  $R_{90}$  for Sokolovsky coal brand DG at different humidity values of finished dust*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Видно, что меньшему расходу сушильного агента для  $W_{пл}=5\%$  от 1,56 до 1,97 кг/кг сырого угля соответствует более высокая температура сушильного агента от 130 до 180 °С для установленного диапазона крупности пыли. При увеличении влажности пыли расход сушильного агента повышается, а температура снижается. Для предельного случая



измельчения без сушки для сушильного агента не требуется подогрев, он подается при температуре примерно 20 °С.

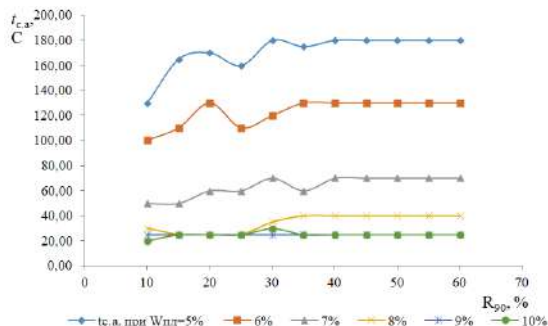


Рис. 4. Зависимости температуры сушильного агента от крупности пыли  $R_{90}$  для Соколовского угля марки ДГ при различных значениях влажности готовой пыли

Fig. 4. Dependence of drying agent temperature on dust  $R_{90}$  for Sokolovsky coal brand DG at different humidity values of finished dust

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Аналогичный анализ проведен и для Ирша-Бородинского бурого угля, изменение расхода топлива при укрупнении готовой пыли и удельные затраты энергии на размол представлены на рисунках 5 и 6. Поскольку данный уголь имеет гораздо более высокую исходную влажность на рабочую массу топлива, изменение влажности пыли задавалось в более широких пределах – от 12 до 27%. Измельчение без сушки не предполагалось.

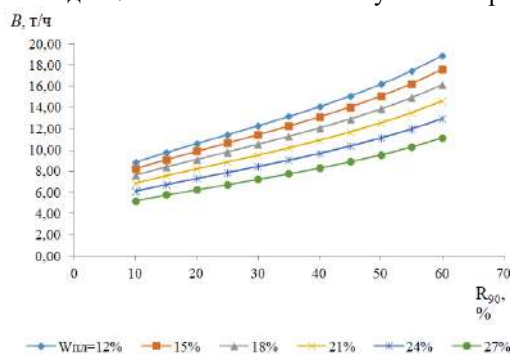


Рис.5. Зависимости расхода топлива от крупности пыли значениях  $R_{90}$  для Ирша-Бородинского бурого угля при различных значениях влажности готовой пыли

Fig.5. Dependence of fuel consumption on dust size  $R_{90}$  for Irsha-Borodinsky brown coal at different humidity values of finished dust

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Расход топлива изменялся от 8,9 до 18,89 т/ч для влажности пыли  $W^{пл}=12\%$  и от 5,25 до 11,15 т/ч для  $W^{пл}=27\%$ . При остальных значениях влажности пыли расход угля принимал промежуточные значения.

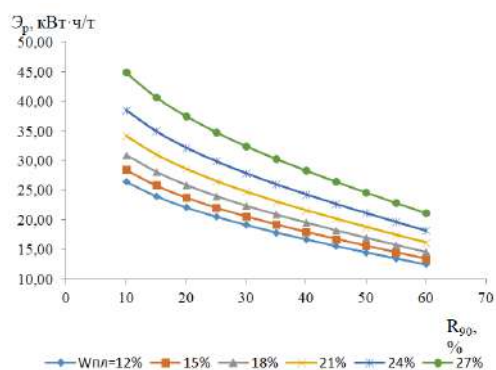


Рис.6. Зависимости удельного расхода электроэнергии на размол от крупности пыли  $R_{90}$  для Ирша-Бородинского бурого угля при различных значениях влажности

Fig. 6. Ratio of specific electricity consumption for grinding to dust  $R_{90}$  for Irsha-Borodinsky brown coal at different humidity values

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Удельные затраты энергии на размол для предельных значений готовой пыли имеют следующие значения: при  $W^{пл}=12\%$   $\mathcal{E}_p=12,47\div 26,48$  кВт·ч/т, а при  $W^{пл}=27\%$   $\mathcal{E}_p=21,14\div 44,88$  кВт·ч/т, т.е. при укруплении помола затраты энергии на размол существенно снижаются.

Повлиять на конечную влажность угольной пыли можно путем изменения расхода и температуры сушильного агента. Для наиболее сложных условий измельчения при наибольшей влажности готовой пыли и наиболее тонком помоле удельный расход сушильного агента составляет более 3 кг/кг сырого топлива (рис. 7) при наименьшей температуре сушильного агента от 55 до 145 °С (рис.8). При этом расход воздуха через мельничный вентилятор не изменяется и соответствует номинальному значению.

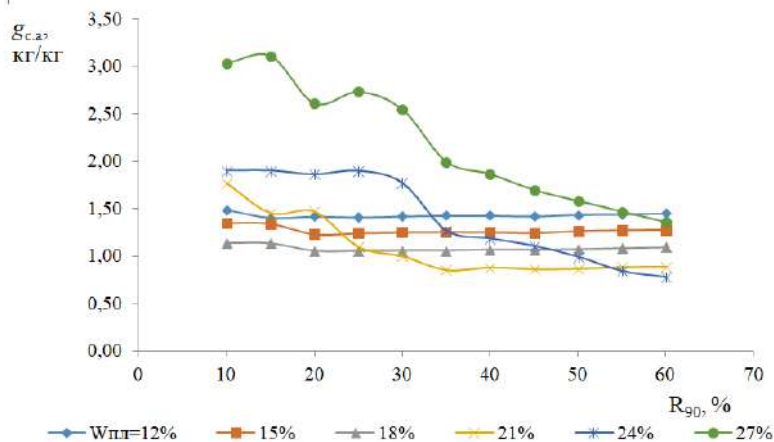


Рис. 7. Зависимости удельного расхода сушильного агента от крупности пыли  $R_{90}$  для Ирша-Бородинского бурого угля при различных значениях влажности готовой пыли

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

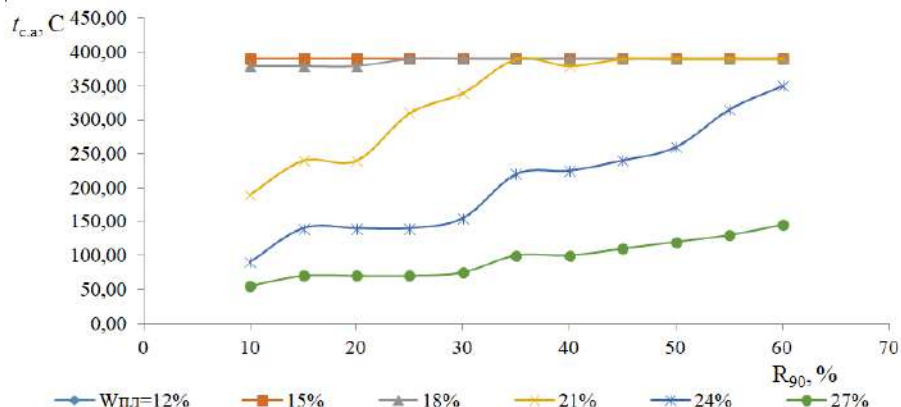


Рис. 8. Зависимости температуры сушильного агента от крупности пыли  $R_{90}$  для Ирша-Бородинского бурого угля при различных значениях влажности готовой пыли

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Высокая температура сушильного агента 390 °С соответствует влажности готовой пыли 12, 15 и 18%. Данные условия являются весьма напряженными для системы пылеприготовления из-за необходимости удаления большого количества влаги. Расход сушильного агента при этом будет увеличиваться в 1,5-2 раза по сравнению с номинальным.

### Выводы

Полученные при проведении расчетов значения режимных параметров работы пылеприготовительной установки для системы поточной газификации угля показали значительные их изменения по сравнению с номинальными значениями. При увеличении диаметра частиц, который определяется параметром  $R_{90}$ , наблюдается снижение удельных затрат энергии на размол примерно в 2 раза, как для Соколовского каменного угля, так и для бурого Ирша-Бородинского. При этом расход сушильного агента для сушки и измельчения Соколовского угля соответствует номинальному (табл.2) во всем диапазоне изменения параметров, а для Ирша-Бородинского при более низких значениях влажности готовой пыли превышает номинальное значения в 1,5-2 раза.

### Заключение

Системы пылеприготовления угля и других видов твердых топлив являются неотъемлемой частью газификационной установки, предназначенной для получения синтез-газа, который может служить в качестве сырья для химической промышленности или топлива, в том числе и для газотурбинных установок. Состав получаемого газа зависит от состава исходного топлива и режимных параметров процесса газификации – температуры, давления, состава окислителя. При расчете системы пылеприготовления угля для поточного газогенератора могут быть получены исходные данные для моделирования процесса газификации, такие как дисперсный состав и влажность пыли в достаточно широком диапазоне изменения данных параметров, влияющих на состав получаемого генераторного газа. Также получены значения удельных расходов энергии на размол, которые учитываются при определении затрат на собственные нужды газификационной установки.

#### Литература

1. Рыжков А.Ф., Гордеев С.И., Богатова Т.Ф. Выбор схемы подготовки рабочего тела газовой турбины для ПГУ с внутрицикловой газификацией // Теплоэнергетика. 2015, №11. С.32–37.
2. Kuznetsov A.V., Abaimov N.A., Osipov P.V., Ryzhkov A.F., Butakov E.B. Air-blown conversion of micronized coal: numerical simulation and experiment // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2021. Т. 57. № 1. С. 67-73.
3. Козлов А.Н. Обзор современных тенденций развития технологий газификации твердых топлив // Известия РАН. Энергетика. 2021. №1. С.130-148.
4. Рыжков А.Ф. Развитие поточных газификационных технологий в Азиатско-Тихоокеанском регионе (обзор) / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Цзэн Линянь, П.В. Осипов // Теплоэнергетика. 2016. №11. С.40-50.
5. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70-83.
6. Фатеев В.Н., Порембский В.И., С.А. Григорьев, Баранов И.Е., Островский С.А., Коробцев С.В., Денисенко В.П., Николаев И.И., Кириллов И.А., Демкин С.А. Разработки и исследования водородных энергетических систем в Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский институт» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С.128-148
7. Higman C. Gasification / C.Higman, M.Burgt. Houston (USA): Elsevier science, 2003. Vol. 391.
8. Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3-8.
9. Upadhyay D.S. et al. Air-Steam gasification of lignite in a fixed bed gasifier: Influence of steam to lignite ratio on performance of downdraft gasifier // Energy. 2020. P. 118–187.
10. Hotz C., Haas M., Wachter S., Fleck S., Kolb T. Two-phase free jet model of an atmospheric entrained flow gasifier // Fuel. 2021. V. 304. P.1-12.
11. Wu X., Guo Q., Gong Y., Liu J., Luo X., Wu T., Yu G. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier // Chemical Engineering Science. 2022. V. 247 (2022). P.1-13.
12. Втюрин Ю.Н., Кузнецов П.Я. Исследование и перспективы развития новых систем подготовки и подачи топлива на ТЭС // Теплоэнергетика. 1995, №7. С. 46–51.
13. Ковбасюк В.И. Об эффективности различных технологий подготовки и использования влажных топлив в энергетике // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, №4. С. 603–608.
14. Галькеева А.А., Мингалеева Г.Р. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 69-79.
15. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: Справочное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2005. 480 с.
16. Летин Л.А., Роддатис К.Ф. Среднеходные и тихоходные мельницы / Под общ. ред. К.Ф. Роддатиса. М.: Энергоиздат, 1981, 360 с.
17. Иванов С.Д. Определение оптимальной производительности шаровой барабанной мельницы при размоле бурых углей / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Теплоэнергетика. 2021. №2. С.61-67.

#### Авторы публикации

**Валиуллин Булат Рамилевич** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Мингалева Гузель Рашидовна** – д.т.н., заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Ryzhkov AF, Gordeev SI, Bogatova TF. Vybór skhemy podgotovki rabocheho tela gazovoi turbiny dlya PGU s vnutritsiklovoi gazifikatsiei. *Teploenergetika*. 2015;11:32–37.
2. Kuznetsov AV, Abaimov NA, Osipov PV, et al. *Air-blown conversion of micronized coal: numerical simulation and experiment*. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2021. T. 57. № 1. С. 67-73.
3. Kozlov AN. Obzor sovremennykh tendentsii razvitiya tekhnologii gazifikatsii tverdykh topliv. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2021;1:130-148.
4. Ryzhkov AF. Razvitie potochnykh gazifikatsionnykh tekhnologii v Aziatsko-Tikhookeanskom regione (obzor) / A.F. Ryzhkov, T.F. Bogatova, Tszen Linyan', P.V. Osipov. *Teploenergetika*. 2016;11:40-50.
5. Yarullin RS, Salikhov IZ, Cherezov DS, et al. Perspektivy vodorodnykh tekhnologii v energetike i v khimicheskoi promyshlennosti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(2):70-83.
6. Fateev VN, Porembskii VI, Grigor'ev SA, et al. Razrabotki i issledovaniya vodorodnykh energeticheskikh sistem v Natsional'nom Issledovatel'skom Tsentre Kurchatovskii institut. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(2):128-148.
7. Higman C. Gasification / C. Higman, M. Burgt. Houston (USA): *Elsevier science*, 2003. V. 391.
8. Abaimov NA, Ryzhkov AF. Razrabotka modeli potochnoi gazifikatsii uglya i otrabotka aerodinamicheskikh mekhanizmov vozdeistviya na rabotu gazogeneratorov. *Teploenergetika*. 2015;11:3-8.
9. Upadhyay D.S. et al. Air-Steam gasification of lignite in a fixed bed gasifier: Influence of steam to lignite ratio on performance of downdraft gasifier. *Energy*. 2020;118–187.
10. Hotz C, Haas M, Wachter S. Two-phase free jet model of an atmospheric entrained flow gasifier. *Fuel*. 2021;304:1-12.
11. Wu X, Guo Q, Gong Y, et al. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. *Chemical Engineering Science*. 2022;247 (2022):1-13.
12. Vtyurin YuN, Kuznetsov PYa. Issledovanie i perspektivy razvitiya novykh sistem podgotovki i podachi topliva na TES. *Teploenergetika*. 1995;7:46-51.
13. Kovbasyuk VI. Ob effektivnosti razlichnykh tekhnologii podgotovki i ispol'zovaniya vlazhnykh topliv v energetike. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2018;56(4):603–608.
14. Gal'keeva AA, Mingaleeva GR. Analiz primeneniya uglei razlichnykh marok dlya proizvodstva energii i khimicheskikh produktov. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2015;11-12:69-79.
15. Nazmeev YuG, Mingaleeva GR. Sistemy toplivopodachi i pyleprigotovleniya TES. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2005. 480 s.
16. Letin LA, Roddatis KF. *Srednekhodnye i tikhokhodnye mel'nitsy* / Pod obshch. red. K.F. Roddatisa. M.: Energoizdat. 1981. 360 s.
17. Ivanov SD. *Opreделение optimal'noi proizvoditel'nosti sharovoi barabannoi mel'nitsy pri razmole burykh uglei*. S.D. Ivanov, A.N. Kudryashov, V.V. Oshchepkov. *Teploenergetika*. 2021;2:61-67.

### Authors of the publication

**Bulat R. Valiullin** – the graduate student of Power engineering department, Federal State Budgetary Institution of Education Kazan State Power Engineering University.

**Guzel R. Mingaleeva** – PhD, Head of Power engineering department, Federal State Budgetary Institution of Education Kazan State Power Engineering University.

**Получено** 20.02.2023г

**Отредактировано** 27.02.2023г

**Принято** 06.03.2023г

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.023

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Петров<sup>1</sup> Т.И., Сафин<sup>1</sup> А.Р., R.K. Behera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Indian Institute of Technology (IIT), Patna

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Оптимизация конструкции электрических машин в ходе проектирования всегда является важной целью разработчика. Для решения этих задач можно использовать топологическую оптимизацию, однако у которой есть важные особенности при проектировании синхронных двигателей с постоянными магнитами. ЦЕЛЬ. Топологическая оптимизация становится одним из главных инструментов создания новых конструкций различного оборудования, в том числе и электрических машин. Данный метод отличается высоким значением сходимости, гибкой вариативностью, возможностью учета большого количества ограничений, что позволяет получать нестандартные, но эффективные топологии. Существует много работ в области топологической оптимизации, однако данный метод для электрических машин используется совсем недавно, и поэтому необходимо определить возможные проблемы при проектировании, и определить пути решения, которые позволят получить наиболее эффективные конструкции синхронных двигателей с постоянными магнитами. МЕТОДЫ. Рассмотрены используемые методы оптимизации конструкции, определены основные особенности проектирования электрических машин при помощи топологической оптимизации, предложены решение проблемы попадания алгоритмов в локальные экстремумы путем введения в генетический алгоритм этапа мутации, высоких вычислительных затрат – упрощением геометрической модели и сокращением числа внешних переменных в виде ограничений. РЕЗУЛЬТАТЫ. Использование дополнительных этапов в генетический алгоритм, для решения проблемы попадания алгоритма в локальные оптимумы, уже доказанный и эффективный способ. Упрощение геометрической формы модели двигателя позволяет снизить время расчета в 2,5 раза, а повышение количества внешних переменных приводит к незначительному эффекту, что говорит о нецелесообразности усложнения топологической оптимизации. ВЫВОДЫ. Топологическая оптимизация эффективный метод проектирования электрических машин, однако, и при использовании данной методики, очень важны умения и навыки проектировщика, так как есть большое количество условий и возможностей реализации инструментария. Для успешного проведения топологической оптимизации необходимо правильно выбрать алгоритм работы, учесть все особенности для синхронных двигателей с постоянными магнитами.

**Ключевые слова:** методы многоцелевой оптимизации; постоянные магниты; комплексная топологическая оптимизация; синхронные двигатели; проектирование электрических машин.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00134, <https://rscf.ru/project/22-79-00134/>.

**Для цитирования:** Петров Т.И., Сафин А.Р., R.K. Behera. Особенности проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи комплексной топологической оптимизации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 58-67.

## PECULIARITIES OF DESIGNING SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS USING INTEGRATED TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

TI. Petrov<sup>1</sup>, AR. Safin<sup>1</sup>, RK. Behera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Indian Institute of Technology (IIT), Patna

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru)

**Abstract:** *RELEVANCE.* Optimizing the design of electrical machines during the design process is always an important goal for the designer. To solve these problems, topological optimization can be used, however, which has important features when designing permanent magnet synchronous motors. *THE PURPOSE.* Topological optimization is becoming the main tool for creating new designs, including equipment and general machines. This method has an extremely high convergence value, flexible variability, and the ability to take into account a large number of restrictions, which makes it possible to obtain non-standard, but modeling topologies. There are many works in the field of topological estimation, however, this method has been used for electrical machines quite recently, and therefore it is necessary to identify possible design problems, determine the ways that are solved, and obtain the highest frequencies of synchronous motors with magnet frequencies. *METHODS.* The methods used to optimize the design are considered, the main features of the design of electrical machines using topological optimization are determined, a solution to the problem of getting algorithms into local extremes is proposed by introducing a mutation stage into the genetic algorithm, high computational costs - by simplifying the geometric model and reducing the number of external variables in the form of restrictions. *RESULTS.* The use of additional steps in the genetic algorithm to solve the problem of getting the algorithm into local optima is already a proven and effective way. Simplification of the geometric shape of the engine model allows to reduce the calculation time by 2.5 times, and an increase in the number of external variables leads to an insignificant effect, which indicates the inexpediency of complicating the topological optimization. *CONCLUSIONS.* Topological optimization is an effective method for designing electrical machines, however, when using this technique, the skills and abilities of the designer are very important, since there are a large number of conditions and possibilities for implementing the toolkit. For successful topological optimization, it is necessary to choose the correct operation algorithm, take into account all the features for synchronous motors with permanent magnets.

**Keywords:** multi objective optimization; permanent magnets; complex topological optimization; synchronous motors; electrical machine design.

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00134, <https://rscf.ru/en/project/22-79-00134/>.

**For citation:** Petrov TI, Safin AR, RK. Behera. Peculiarities of designing synchronous motors with permanent magnets using integrated topological optimization. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2023; 15; 1(57): 58-67.

### **Введение**

Топологическая оптимизация — это новый, концептуальный метод проектирования оборудования. По сравнению с традиционными подходами к проектированию он может создать новую конструкцию, которую нельзя было получить стандартными методами. Действительно, оптимизация, заключающаяся в поиске эффективных топологий, становится перспективным инструментом для проектировщиков.

Проектирование электрических машин затруднено из-за необходимости соблюдения множества ограничений и задач, включая: выходную мощность, стоимость, средний вращающий момент, скорость, эффективность, размер, инерцию, пульсации вращающего момента, ограничения напряжения и тока привода, повышение температуры, инерцию, акустические характеристики, шум и вибрацию, и другие требования. Сложность инструментов и методов анализа электрических машин варьируется от классических аналитических подходов до магнитных эквивалентных схем на основе шаблонов или программных инструментов на основе конечных элементов. Как правило, используется итеративный подход к проектированию. Проектировщик выбирает топологию машины,

комбинацию полюсных пазов, материалы и на основе опыта или с помощью алгоритма оптимизации изменяет геометрические параметры и токовые нагрузки. Анализируются электромагнитные характеристики, корректируются входные геометрические и токовые параметры нагрузки и, возможно, пробуются другая топология или комбинация пазов и полюсов [1].

Построение геометрического шаблона имеет решающее значение для успеха оптимизации и объема проектного пространства, которое можно исследовать. Геометрические параметры электрических машин, вообще говоря, не являются независимыми, диапазоны, в которых могут варьироваться входные параметры, ограничиваются, чтобы избежать нефизических геометрий с перекрывающимися областями [2]. Создание и программирование надежных, но гибких геометрических шаблонов часто занимает значительно больше времени, чем фактическая оптимизация.

Из-за времени, необходимого для создания и программирования шаблона, исследуется относительно небольшое количество конфигураций машин. Небольшие элементы, часто имеющие решающее значение для контроля пульсаций крутящего момента, часто не включаются в геометрический шаблон.

Альтернативой созданию геометрии на основе шаблонов являются методы топологической оптимизации, разработанные в областях машиностроения. Методы оптимизации топологии позволяют оптимально распределять материал или материалы в произвольной форме в проектной области [3, 4].

В литературе рассматривалось несколько подходов к изучению оптимизации электрических машин. Брамердорфер и др. рассмотрел различные методы оптимизации конструкций электрических машин [5] и определил характерные особенности популярных подходов к оптимизации электрических машин. В большинстве этих методов используется параметризованная геометрия, связанная с алгоритмами оптимизации на основе популяции, такими как генетические алгоритмы (ГА). Однако параметризованная геометрия ограничивает пространство для проектирования, поскольку компоненты могут принимать форму только в пределах заданного диапазона параметров [6, 7]. Более того, поскольку этот подход опирается на опыт проектировщика при разработке параметризации, он также зависит от субъективных параметров.

Топологическая оптимизация может преодолеть эти ограничения параметрической оптимизации, позволяя исследовать проектное пространство в свободной форме. Этот метод был впервые предложен для решения проблем прочности в проектировании конструкций, и существует большое количество литературы по методам оптимизации для решения задач строительной механики [8], однако, недавно методы оптимизации структурной топологии также были адаптированы для оптимизации электрических машин [9, 10].

Однако из-за сложных и затратных применяемых методов, и стратегий, топологическая оптимизация электрических машин все еще активно развивается. Для решения типичных проблем, возникающих в процессе проектирования при помощи топологической оптимизации, и анализа особенностей конструирования именно синхронных двигателей с постоянными магнитами, представляется данная статья.

Научная значимость заключается в решении проблемы попадания алгоритмов оптимизации в локальные оптимумы, на примере генетического алгоритма, и анализе возможностей снижения времени вычисления, за счет упрощения геометрической модели и снижения количества внешних переменных. А практическая значимость состоит в описании особенностей проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами, что позволит проектировщику оптимизировать процесс работы и выбрать наиболее эффективный способ конструирования.

#### *Материалы и методы. Метод топологической оптимизации*

В общем, методы оптимизации конструкции можно разделить на общие категории в зависимости от того, как обрабатывается распределение материала в области проектирования: методы, основанные на плотности, методы ON/OFF, методы изменения границ и т.д.

Оптимизацию конструкции можно разделить на три уровня в зависимости от типа переменных проекта [1]: оптимизация размера, оптимизация формы и топологическую оптимизацию. Топологическая оптимизация делает возможным достижение проектным объектом некоторых показателей производительности при определенных ограничениях путем поиска оптимальной топологической компоновки структуры. Следовательно, оптимизация топологии является высшим уровнем структурных проектов и относится к концептуальному проектированию [11].

При проектировании электромагнитного устройства начинают с определения исходной геометрии. Затем для оценки производительности устройства на основе этой геометрии разрабатывается модель, на основе которой выполняется параметрическая оптимизация для определения оптимальных размеров устройства. Основным недостатком этого подхода заключается в выборе исходной геометрии. Действительно, исходная геометрия исходит либо из литературы, либо из знаний проектировщика, который склонен полагаться на конструкции, уже доказавшие свою эффективность. Даже если этот подход в целом оправдан, он не поддерживает никакого креативного подхода. Проектировщик действительно может столкнуться с новой проблемой проектирования, о которой ранее не было известно, или с проблемой, когда новая конструкция, по своим характеристикам, может превзойти стандартные образцы. В этом случае топологическая оптимизация проявляет свои преимущества [12]. Фактически, топологическая оптимизация стала парадигмой преобладающих инженерных методов, обеспечивающих количественный метод проектирования. Практическая сфера оптимизации топологии охватывает многие области и дисциплины, включая комбинации структур, теплообмен, акустику, поток жидкости, аэроупругость, дизайн материалов и другие мультифизические проблемы.

Целью оптимизации топологии является нахождение оптимальной топологии для данной задачи проектирования, т. е. определение материала, который следует поместить в область, чтобы оптимизировать целевую функцию при соблюдении некоторых требований.

Целевой функцией для электрических машин являются значения электромагнитных сил.

Закон Ампера - уравнения Максвелла:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad [2, \text{Guo F., Salameh M., Krishnamurthy M., Brown I.P.}]$$

Для статических электромагнитных полей:

$$\vec{H} = \nabla \times \vec{j}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad [2, \text{Guo F., Salameh M., Krishnamurthy M., Brown I.P.}]$$

где  $\vec{B}$  - плотность магнитного потока (Тл);

$\vec{H}$  - напряженность магнитного поля (А/м);

$\vec{E}$  - напряженность электрического поля (В/м).

$\vec{j}$  - плотность тока (А/м<sup>2</sup>).

Для расчета ЭДС индукции используются следующие уравнения:

$$E_{rms} = N(d\phi / dt)$$

$$\phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad [2, \text{Guo F., Salameh M., Krishnamurthy M., Brown I.P.}]$$

В случае конечно-элементной дискретизации пространство проектирования может быть представлено в виде элементов, а цель оптимизации формулируется как нахождение оптимального распределения материалов внутри этих элементов.

Теоретическое описание оптимизации топологии берет свое начало в области механики, которая восходит к конструкции фермы Мичелла в 1904 году [4]. По мере развития методов численного анализа и методов оптимизации, особенно с введением универсального метода конечных элементов, за последние несколько десятилетий оптимизация топологии достигла больших успехов. В литературе сообщается о большом количестве работ в области топологического описания, средств анализа и методов оптимизации, среди которых описание топологических задач является основой анализа и оптимизации [3].

Методы оптимизации для решения задач топологической оптимизации можно условно разделить на две категории: методы, основанные на детерминированных алгоритмах, и методы, основанные на стохастических алгоритмах. К детерминированным методам относятся метод критериев оптимальности, метод математического программирования и метод движущихся асимптот. Эти методы используют информацию о градиенте целевой функции и имеют высокую скорость сходимости.

Такие методы подходят для задач оптимизации топологии с большим количеством проектных переменных. Однако их способность к глобальному поиску слаба, и они склонны попадать в локальные оптимальные решения. Кроме того, такие методы сложны в работе с многокритериальными проблемами оптимизации напрямую [13].



Стохастические методы — это методы оптимизации, использующие случайные механизмы. Внедренный принцип случайности может позволить методу выйти за пределы локального оптимума; поэтому эти методы, как правило, обладают более сильной способностью глобального поиска, чем детерминированные алгоритмы, они больше подходят для глобального оптимального решения невыпуклых задач математического программирования с довольно большим количеством локальных экстремумов. Однако основным недостатком такого рода методов является высокая вычислительная стоимость и низкая скорость сходимости [3].

В настоящее время методы глобальной оптимизации, обычно применяемые в электромагнитном поле, включают генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, алгоритм табу-поиска, алгоритм оптимизации роя частиц, алгоритм квантовой эволюции и так далее [14]. Основная идея этих алгоритмов состоит в том, чтобы устранить худшее решение и сохранить лучшее решение посредством итеративного процесса и, наконец, найти оптимальное решение проблемы, вводя идеи биологической эволюции (такие как теория выживания наиболее приспособленных Дарвина).

Хотя уже проведено много исследований и предложены различные методы, применение топологической оптимизации в электромагнитном поле сравнительно менее изучено и в настоящее время все еще сталкивается со многими проблемами. Основные проблемы, требующие решения, можно разделить на следующие три аспекта [2, 7, 8].

#### 1. Локальные оптимумы

В существующих методах довольно многие используют методы на основе градиента в качестве оптимизаторов, которые используют информацию о чувствительности для управления процедурой оптимизации, как типичные методы детерминированной оптимизации. Вообще говоря, такие методы имеют хорошую сходимость. Однако у градиентных методов есть недостаток – стагнация на локальных оптимумах. При столкновении со сложными невыпуклыми задачами (к таким задачам относится большинство практических задач оптимизации) градиентные методы могут сходиться к одному из оптимумов, а затем оставаться в этом локальном минимуме, оптимизация останавливается. Напротив, эвристические алгоритмы разработаны для использования в глобальных решениях задач оптимизации. К сожалению, их вычислительная нагрузка сравнительно больше, чем у методов, основанных на градиенте.

2. Высокие вычислительные затраты. Несмотря на то, что много разработано для прочностной топологической оптимизации несущих конструкций (балка, ферма и т.д.), которые являются относительно простыми, для более сложных электромагнитных задач, проблемой является чрезмерное время вычислений с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Ситуация сложнее, когда плотность сетки при дискретизации велика. Более того, информация о чувствительности, необходимая для градиентных методов, или большое количество итераций, требуемых для эвристических методов, требуют дополнительных вычислений. Все эти факторы влекут за собой высокие требования к вычислительным ресурсам, что делает оптимизацию топологии сложной вычислительной задачей независимо от того, какой оптимизатор (детерминистический или эвристический) используется.

#### 3. Обработка ограничений

Данная проблема также очень сильно влияет и на высокие затраты, так как большое количество внешних переменных в виде ограничений, увеличивает время расчета, при этом снижая возможность изготовления полученной топологии на практике. В существующих на данный момент методах способ обработки условий ограничений, как правило, заключается в объединении их с исходной целью для формирования новой цели оптимизации, которая фактически изменяет исходную задачу.

#### *Методы решения проблем локальных оптимумов и высоких вычислительных затрат*

Для решения проблем с попаданием в локальные оптимумы будет рассмотрен наиболее используемый метод многоцелевой оптимизации - генетический алгоритм (ГА).

Необходимо пояснить, почему выбран именно этот метод, на примере сравнения с другим методом – методом роя частиц (МРЧ).

ГА основан на теории естественного отбора и эволюции, которая, в свою очередь, зависит от выживания наиболее приспособленных. Со временем популяция адаптируется к окружающей среде, и наиболее подходящая популяция выживает, а остальные терпят неудачу.

МРЧ — это популяционный алгоритм, вдохновленный социальным поведением стай птиц. В МРЧ каждое решение называется частицей, а вся популяция — роем, данный метод популярен при оптимизации задач с вещественными числами.

Чтобы решить, какой алгоритм выбрать между ГА и МРЧ, сначала изучаются преимущества и недостатки обоих алгоритмов, затем тщательно рассматривается пригодность этих алгоритмов, особенно в случае оптимизации машин.

Скорость, по-видимому, является самым большим преимуществом МРЧ перед ГА. Хотя основное преимущество ГА перед МРЧ заключается в его способности получать достаточно точный конечный результат, даже если другие промежуточные решения неудовлетворительны.

Когда дело доходит до реализации многокритериальных алгоритмов, стандартный код для многокритериального ГА уже разработан и широко используется в наборе инструментов оптимизации, тогда как код для многокритериального МРЧ еще не до конца разработан, хотя, возможно, исследователи уже предложили общепринятые алгоритмы [4,12].

Поскольку первоначальная модель электрической машины была разработана, вероятность того, что первый набор проектных параметров будет близок к фактическому решению, является неопределенной. Поскольку в МРЧ сложно определить начальные параметры, а учитывая тот факт, что ГА имеет лучшие возможности для правильного предоставления конечного решения, ГА больше подходит в этом случае.

Учитывая все эти преимущества, ГА больше подходит для данного конкретного тезиса.

Для общего решения попадания ГА в локальные оптимумы достаточно добавить этап мутации в алгоритм.

Мутация в ГА встречается довольно редко, поэтому мы даем очень маленькую частоту мутаций  $P_m$ , которая часто находится в интервале  $[0, 0,1]$ . Каждому гену должна быть задана случайная вероятность мутации  $P_m$ . Если выпавшая вероятность меньше или равна  $P_m$ , то значение этого гена следует изменить на противоположное значение (в случае двоичного кода, с 0 на 1 или с 1 на 0), что означает, что происходит мутация.

Выполняем мутацию на хромосоме [0110].

Предположим, что  $P_m = 0,03$ , скорость мутации каждого гена: 0,24, 0,69, 0,015, и 0,47.

Мы видим, что скорость 1 и 3 гена составляет 0,24 и  $0,15 < P_m = 0,03$ , поэтому эти гены следует изменить. В результате после мутации эта хромосома становится [1100].

Данный механизм позволит максимально в рамках ГА уходить от проблемы попадания в локальные оптимумы.

Следующая проблема, которая следует из использования ГА, высокие вычислительные затраты, рассмотрим на примере двигателя VM1418 ZXF (рис. 1).

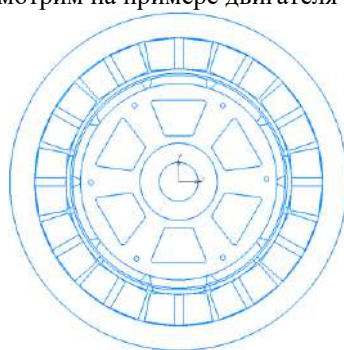


Рис. 1. Геометрическая модель СДПМ VM1418 Fig. 1. Geometric model PMSM VM1418 ZXF

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Время расчёта для одной модели составило 110 с, количество узлов сетки равно 928385 элементам. Время расчета полной итерации одного шага ГА составляет 150 с, время проведения полной топологической оптимизации при наименьшей популяции и многопоточном расчете составит 12 дней, что подтверждает вторую проблему топологической оптимизации. Решение проблемы может стать упрощение геометрической модели.

По методике [8] для упрощения необходимо рассматривать наименьший сектор для расчета. Упростив геометрию элементов, необходимо провести расчет при наименьшем значении сетки, при котором можно добиться адекватного значения параметров. После выполнения всех операций получен конечный сектор СДПМ для расчета (рис. 2), время расчёта для одной модели составило 50 с, количество узлов сетки равно 1500 элементов, время расчета полной итерации одного шага ГА составляет 80 с, время проведения полной

топологической оптимизации составит 4,5 дней, что уже является удовлетворительным результатом.

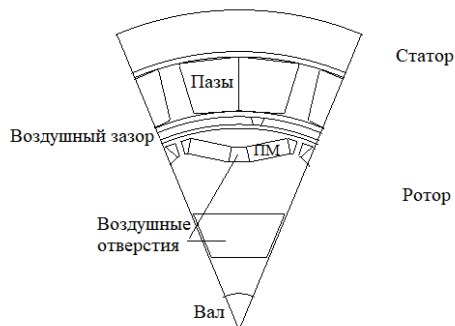


Рис. 2. Сектор ротора СДПМ

Fig. 2. Sector of the PMSM rotor

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для решения проблемы, связанной с обработкой ограничений, необходимо определиться насколько увеличение внешних переменных приведет к улучшению результата топологической оптимизации. Для этого проведём оптимизацию с включением внешних переменных с метамоделированием, по методике, описанной в статье Shun Maruyama [3].

Конструктивной областью оптимизации топологии является область ротора, исключая область постоянных магнитов (ПМ), а внешний край исключается, чтобы предотвратить отделение ярма от ПМ из-за центробежной силы. Допустимая область расположения РМ находится внутри области ротора. Позиция постоянных магнитов представлена  $R$  (м),  $\theta$  (град),  $\varphi$  (град), которые являются внешними переменными в этой задаче. То есть  $s = [R, \theta, \varphi]$ . Диапазоны  $[R, \theta, \varphi]$  нормированы в диапазоне от 0 до 1. Целевая функция  $F(s, \rho_s)$ , которую необходимо максимизировать, представляет собой средний крутящий момент за один период. Данная оптимизационная задача включает три ограничения: ограничение жесткости  $G_1(s, \rho_s)$  для предотвращения разделения ярма и ПМ, ограничение  $G_2(\rho_s)$  на верхнюю границу объема ярма, ограничение на расположение ПМ -  $G_3(s)$ , таким образом, чтобы область ПМ не пересекалась и не выступала за пределы расчетной области.

При оптимизации топологии ярма магнитное сопротивление  $\nu$  определяется следующей интерполяционной моделью:

$$\nu(\rho, B) = \nu_0(1 - \rho^p) + \nu_1(B)\rho^p \quad [3, \text{Maruyama, S., Yamasaki, S., Yaji, K. et al.}]$$

где  $\nu_0$ ,  $\nu_1(B)$ ,  $B$  — удельное магнитное сопротивление воздуха, материала и плотность магнитного потока соответственно.

#### Результаты использования предложенных методов оптимизации

Использование дополнительных этапов генетического алгоритма, уже доказанный эффективный способ решения проблемы попадания в локальные оптимумы, и представленный для примера этап мутации, позволяет разнообразить популяцию топологий, довольно простым способом.

А решением проблемы высоких вычислительных затрат может стать упрощение геометрической формы модели. В нашем случае, данная методика позволили снизить время расчета с 12 до 4,5 дней, что может говорить о повышении эффективности в 2,5 раза.

Перейдем к обсуждению оптимизации с включением внешних переменных с метамоделированием.

Оптимизация выполняется в соответствии со следующей процедурой. Сначала подготавливают 125 точек выборки  $s^{(k)}$  ( $k=1,2,\dots,125$ ) путем заполнения расчетного пространства при условии, что область ПМ не пересекается с расчетной областью и не выступает из нее.

Конструкции двигателя, полученная посредством включения внешних переменных с метамоделированием, представлена на рис.3в.

Мы сравниваем оптимизированную конструкцию двигателя с двумя конструкциями. Двигатель, показанный на рисунке 3 а, представляет собой исходную конструкцию, конструкция, показанная на рисунке 3 б, представляет собой конструкцию, в которой оптимизировано только распределение материала, а положение ПМ такое же, как в первом случае.

Значение вращающего момента для каждой из конструкций составляет 8,1, 9,36, 9,47 Н·м. Вариант *б* представляет собой улучшение на 15,55% по сравнению с вариантом *а*, улучшение которого достигается только оптимизацией топологии. Вариант *в* показывает улучшение на 16,91% по сравнению с конструкцией *а*, улучшение которого достигается за счет включения внешних переменных в оптимизацию топологии.

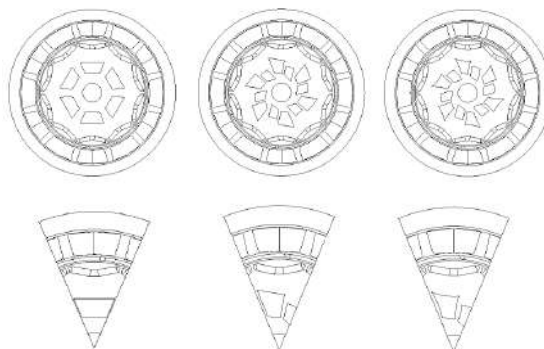


Рис. 3. Результаты топологической оптимизации *Fig. 3. Results of topological optimization a) original design with V-shaped magnets b) optimization without taking into account the location of objects (in this case, PM) c) optimization taking into account the location of objects (in this case, PM)*

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Исходя из этих результатов, разница при оптимизации с учетом расположения объектов и без этого учета, составляет 1,1%, что говорит о нецелесообразности усложнения топологической оптимизации, и повышения вычислительных затрат. И это без учета сложностей при практической реализации таких конструкций, так как геометрия частей двигателя становится нестандартной, и существенно отличается от готовых решений.

#### **Заключение**

На основании литературного обзора, сделан вывод, что топологическая оптимизация активно развивается, и уже считается эффективным методом проектирования, особенно в области механики [1-5]. В области оптимизации электрических машин еще не все вопросы проработаны [2,7,8], наиболее важными остаются проблема попадания решений в локальные оптимумы и высокие вычислительные затраты.

Включение этапа «мутация» в генетический алгоритм позволяет изменять решения, с целью выхода из локального минимума или максимума, что может решить проблемы, описанные в работах [4,6] а упрощение геометрической модели, приводит к снижению времени, что позволяет оптимизировать вычислительные затраты, описанные в труде Bendsoe М.Р. [6]. Проведена оптимизация по методике с включением внешних переменных с метамоделированием [3], и показано, что увеличение числа внешних переменных не ведет к качественному повышению результатов топологической оптимизации.

Таким образом, можно сказать, что хоть в топологической оптимизации и много этапов автоматизировано, важная роль остается у проектировщика, который должен сам выбирать среди множества вариантов реализации оптимизации.

#### **Литература**

1. Nishanth F., Wang B. Topology Optimization of Electric Machines: A Review, 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9948073.
2. Guo F., Salameh M., Krishnamurthy M., Brown I.P. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 4, pp. 3656-3667, July-Aug. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2989682.
3. Maruyama, S., Yamasaki, S., Yaji, K. et al. Topology optimization incorporating external variables with metamodeling. Struct Multidisc Optim 62, 2455–2466 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02616-1>
4. Eschenauer H.A. Olhoff N. Topology optimization of continuum structure: A review. Applied Mechanics Review, 54(4), 331-390.
5. Chundong J. Topology optimization of electromagnetic structure based on finite element method. (Doctoral dissertation, Hebei University of Technology). 2012.

6. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
7. Wang M.Y., Wang X., Guo D. A level set method for structural topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 192, no. 1-2, pp. 227–246, 2003.
8. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей / Т. И. Петров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 70-79.
9. Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, V. 141. no. 7, 2019.
10. Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5429–5438, 2020.
11. Сафин А.Р. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами / А. Р. Сафин, Т. И. Петров, А. М. Копылов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – № 2(46). – С. 45-53.
12. Guo F., Brown I.P. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 10, pp. 1–12, 2020.
13. Gracheva, E. I. Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises / E. I. Gracheva, O. V. Naumov, A. N. Gorlov // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10–12 ноября 2021 года. – Lipetsk, 2021. – P. 1212-1216. – DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632094.
14. M. Alshraideh, B. Mahafzah, S. Al-Sharaeh, A MultiplePopulation Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation, *Software Quality Control*. V. 19, n. 3, pp. 489-513, 2011
15. Petrov T.I., Safin A.R. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2022. – V. 190. – P. 151-156.

#### Авторы публикации

**Петров Тимур Игоревич** – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Сафин Альфред Робертович** – профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Ranjan Kumar Behera** – Ph.D., доцент кафедры Электротехники, Индийский технологический институт, Индия, Kanra Road, Bihta, г. Патна.

#### References

1. Nishanth F, B. Wang. *Topology Optimization of Electric Machines: A Review*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA. 2022; 1-8.
2. Guo F, Salameh M, Krishnamurthy M, Brown IP. *Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors*. in IEEE Transactions on Industry Applications. 2020;56;4;3656-3667.
3. Maruyama S, Yamasaki S, Yaji K. et al. Topology optimization incorporating external variables with metamodeling. *Struct Multidisc Optim*. 2020;62;2455–2466.
4. Eschenauer HA, Olhoff N. Topology optimization of continuum structure: A review. *Applied Mechanics Review*. 2001;54(4);331-390.
5. Chundong Jiang. *Topology optimization of electromagnetic structure based on finite element method*. (Doctoral dissertation, Hebei University of Technology). 2012.
6. Bendsoe MP, Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media. 2013.
7. Wang MY, Wang X, Guo D. A level set method for structural topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2003;192;1-2;227-246.
8. Petrov TI. Modification of the genetic algorithm for a complex topological alternative

to the rotor of synchronous motors. *Energy problems*. 2021;23(3):70-79.

9. Garibaldi M, Gerada C, Ashcroft I, Hague R. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2019;141;7.

10. Credo A, Fabri G, Villani M, Popescu M. *Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2020;56;5;5429-5438.

11. Safin AR, Petrov TI, Kopylov AM, et.al. Method for designing and topological optimization of rotors of synchronous motors with permanent magnets. *Vestnik KSPEU*. 2020;12;2(46);45-53.

12. Guo F, Brown IP. *Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors*. IEEE Transactions on Magnetics. 2020;56;10;1-12.

13. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN. *Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises*. Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. 2021; 1212-1216.

14. Alshraideh M, Mahafzah B, Al-Sharaeh S. MultiplePopulation Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation. *Software Quality Control*. 2011;19;3;489-513.

15. Petrov TI, Safin AR. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;190; 151-156.

#### **Authors of the publication**

**Timur I. Petrov** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Alfred R. Safin** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Ranjan Kumar Behera** – Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT), India, Kanpa Road, Bihta. 801103, Patna.

**Получено** **01.03.2023г**

**Отредактировано** **14.03.2023г**

**Принято** **16.03.2023г**

УДК 621.316.72

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СТАТКОМ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Балабанов<sup>1</sup> А.М., Митрофанов<sup>2</sup> С.В.

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, Россия

ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9656-3403>, [balabanov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:balabanov_a_m@mail.ru)

ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-4401-4730>, [Mitrofan\\_Serg@mail.ru](mailto:Mitrofan_Serg@mail.ru)

**Резюме:** *АКТУЛЬНОСТЬ.* Увеличение объема использования полупроводниковых элементов, в частности, частотных преобразователей, а также распространение систем возобновляемой энергетики требует более подробных оценок влияния нелинейных элементов на качество электрической энергии в электрических сетях промышленных предприятий. *ЦЕЛЬ* Оценка влияния систем повышения качества электроэнергии на эффективность режима работы основного силового оборудования горнодобывающего предприятия. *МЕТОДЫ.* В рамках решения поставленной задачи произведен сравнительный анализ различных систем динамической компенсации реактивной мощности и подавления высших гармонических составляющих, обусловленных наличием полупроводниковых преобразователей частоты в системе электроснабжения горнодобывающего предприятия. Рассмотрены варианты на основе конденсаторных батарей, статических компенсаторов реактивной мощности, а также СТК и СТАТКОМ. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе выполнен сравнительный анализ технических характеристик FACTS-устройств типа: конденсаторные батареи, СТК, синхронный компенсатор, СТАТКОМ. В результате сравнительного анализа для скиповой подъемной машины наиболее эффективным средством стабилизации уровня напряжения выбран СТАТКОМ. Разработана в среде Matlab Simulink, имитационная модель участка системы электроснабжения горнодобывающего предприятия со скиповой подъёмной машиной, а также установками СТАТКОМ мощностью 2,4 Мвар на основе технологии IGBT. В модели рассматривалось влияние различных режимов работы подъемной машины на уровень потребления реактивной мощности, уровень напряжения и коэффициенты гармонических составляющих в распределительной сети горнорудного предприятия. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Наибольший эффект компенсации высших гармонических составляющих происходит при использовании СТАТКОМ ( $K_i=3,66\%$ ); Использование режима компенсации высших гармонических составляющих у СТАТКОМ при работе ФКУ невозможно, т.к. возникает резонанс. Для исключения резонанса необходимо изготавливать СТАТКОМ и ФКУ одновременно, т.е. изготавливать реакторы ФКУ с учетом изменения частотного спектра; При использовании СТАТКОМ 2,4 Мвар напряжение в максимальном режиме работы подъемной машины составило 5782 В или 0,963Uном (без использования СТАТКОМ 5682 В или 0,947Uном).

**Ключевые слова:** *качество электрической энергии; компенсация реактивной мощности; стабилизация напряжения; высшие гармоники; СТАТКОМ; ФКУ; СТК; синхронный компенсатор.*

**Для цитирования:** Балабанов А.М., Митрофанов С.В. Анализ эффективности систем статком в задачах повышения качества электроэнергии горнодобывающего предприятия // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 68-79.

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF STATCOM SYSTEMS IN IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN A MINING ENTERPRISE

AM. Balabanov<sup>1</sup>, SV. Mitrofanov<sup>2</sup>

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9656-3403>, [balabanov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:balabanov_a_m@mail.ru)

ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-4401-4730>, [Mitrofan\\_Serg@mail.ru](mailto:Mitrofan_Serg@mail.ru)

**Abstract: RELEVANCE.** The increasing use of semiconductor elements, in particular frequency converters, as well as the spread of renewable energy systems requires more detailed assessments of the nonlinear elements impact on the quality of electrical energy in the electrical networks of industrial enterprises. **OBJECTIVE** Assessment of the impact of power quality improvement systems on the efficiency of the main power equipment of the mining enterprise. **METHODS.** In order to solve the problem a comparative analysis of different systems of dynamic compensation of reactive power and suppression of higher harmonic components due to the presence of semiconductor frequency converters in the power supply system of the mining enterprise has been made. Options based on capacitor banks, static reactive power compensators, as well as SVC and STATCOM are considered. **RESULTS.** A comparative analysis of technical characteristics of FACTS-devices such as: capacitor banks, SVC, synchronous compensator, STATCOM was performed in the work. As a result of the comparative analysis for the skip hoisting machine, the most effective voltage level stabilizer is chosen by STATCOM. A simulation model of the power supply system of a mining enterprise with a skip hoisting machine and 2.4 Mvar capacity STATCOM units based on IGBT technology has been developed in Matlab Simulink software. The model considered the influence of different operating modes of the hoisting machine on the level of reactive power consumption, voltage level and harmonic components coefficients in the distribution network of the mining enterprise. **CONCLUSIONS.** The greatest effect of compensation of higher harmonic components occurs when using STATCOM ( $K_u = 3,66\%$ ); Using the compensation mode of higher harmonic components in STATCOM during operation of the FCU is impossible, because the resonance occurs. To avoid resonance it is necessary to produce STATCOM and FCU at the same time, i.e. to produce FCU reactors taking into account the change of frequency spectrum; When using STATCOM 2,4 Mvar the voltage in the maximum operating mode of the hoisting machine was 5782 V or  $0,963U_{nom}$  (without using STATCOM 5682 V or  $0,947U_{nom}$ ).

**Keywords:** skip hoist; electrical power quality; reactive power compensation; voltage stabilization; higher harmonics; STATCOM; filter compensator; static thyristor compensator; synchronous compensator.

**For citation:** Petrov TI, Safin AR, RK. Behera. Peculiarities of designing synchronous motors with permanent magnets using integrated topological optimization. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57): 68-79.

### **Введение (Introduction)**

#### *Актуальность*

Необходимым условием нормального электроснабжения потребителя является надежное обеспечение его электроприемников электрической энергией в необходимом количестве и определенном качестве.

В России параметры качества электрической энергии нормируются в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Установлено 11 основных показателей качества, однако в данной работе основное внимание уделяется не всем, а следующим параметрам:

- медленные изменения напряжения;
- колебания напряжения;
- гармонические составляющие напряжения.

Несоответствие качества электроэнергии стандарту влечет за собой финансовые убытки вследствие:

- увеличения потерь в линиях из-за отрицательных отклонений напряжения;
- неправильного срабатывания релейной защиты, в связи с влиянием гармонических искажений тока, что ведет к остановке производственного оборудования;
- сокращения срока службы электрооборудования [1].

На рисунке 1 приведена статистика причин нарушения работы технологического оборудования, большую часть составляет именно отклонения напряжения [2].



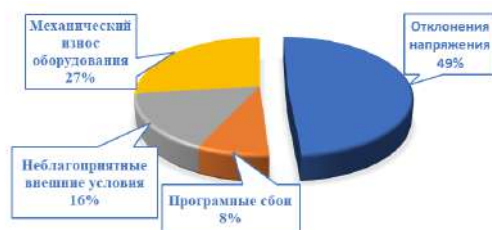


Рис. 1. Статистика причин нарушений работы технологического оборудования Fig. 1. Statistics of the causes of process equipment malfunctions

Источник: [2]. Source: [2].

На сегодняшний день наблюдается увеличение объема использования полупроводниковых элементов в промышленности, в частности, частотных преобразователей, а также распространяются системы возобновляемой энергетики [3]. В данной ситуации возникает проблема качества электроэнергии (значительные отклонения напряжения от номинального значения, наличие гармонического ряда, фликера и низкого коэффициента мощности) [4].

#### Литературный обзор

Влиянию частотных преобразователей и устройств плавного пуска на качество электрической энергии уделено значительное внимание как со стороны отечественных, так и зарубежных исследователей. В частности, в работе [5] отмечаются как положительные эффекты от внедрения систем частотного регулирования в горнодобывающей промышленности, так и негативное влияние на уровень высших гармоник в сети на примере шахт предприятия АО «СУЭК Кузбасс». В работе [6] китайскими исследователями *Xiucan Guo, Pengfei Xu, Xiaoping Shao* представлен весьма подробный анализ влияния различного оборудования угольных шахт на качество электрической энергии и разработана методика оценки вклада каждой группы электроприёмников в общие показатели качества электроэнергии на горнодобывающем предприятии. Анализ влияния потребителей электрической энергии шахт на уровень высших гармоник и коэффициент синусоидальности на основе имитационного моделирования приведён в работе [7]. В работе [8] рассмотрена проблема повышения уровня потерь в линиях электропередачи системы электроснабжения шахт вследствие плохого качества электрической энергии. Особо опасным фактором является провал напряжения, так как он может привести к нарушению устойчивости и отключению электродвигателя при снижении уровня напряжения менее  $0,7 U_{ном}$ .

На основании статистических данных отклонений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий от нормальных значений наибольшие материальные потери и недополучение выгоды происходит вследствие низкого коэффициента мощности, так как именно данный параметр вызывает целый ряд негативных последствий [2]. Проблема высокого уровня колебаний реактивной мощности в системах электроснабжения угольных шахт была подробно рассмотрена в работах [9, 10].

В составе скиповой подъемной машины, большинства горнодобывающих предприятий России, используется фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ). В ходе торможения подъемной машины происходит рост напряжения, а при разгоне – падение. ФКУ не справляется с отклонениями напряжения, фликером и отклонениями по высшим гармоническим составляющим.

Одним из направлений в решении задач по созданию систем автоматического управления напряжением и реактивной мощностью является внедрение в схемы предприятий FACTS-устройств (*Flexible Alternative Current Transmission Systems* — гибкие системы передачи переменного тока) [3]. Анализ эффективности применения различных устройств данного типа для систем электроснабжения горнодобывающих предприятий подробно представлен в работах [11 - 13]. В частности, в работе [12] произведён подробный многокритериальный сравнительный анализ эффективности различных видов статических преобразователей и оценка степени их влияния эксплуатационные режимы системы электроснабжения угольных шахт. Особое внимание уделяется системам *D-STATCOM*. Значительную эффективность данных систем также отмечают авторы в работе [5].

Эффективным инструментом для оценки эффективности FACTS-устройств на режим электроэнергетических систем является имитационное моделирование. В работе [14] приведено описание основных преимуществ применения программного комплекса *Matlab Simulink* для симуляции режимов системы электроснабжения участка угольной шахты. В

работе [15] представлена имитационная модель выемочного участка угольной шахты, а в работе [16] разработана и описана имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения горнодобывающего предприятия. Всё это говорит об актуальности применения имитационного моделирования для анализа режимов систем электроснабжения основного силового оборудования угольных шахт.

*Научное и практическое значение исследования.*

Разработка имитационной модели участка системы электроснабжения горнодобывающего предприятия со скиповой подъемной машиной в качестве основного потребителя и системой динамической компенсации реактивной мощности позволит получить количественные и качественные оценки степени влияния устройств данного типа на уровень высших гармоник и глубину провалов напряжения.

Наибольший интерес для исследования представляют переходные процессы в момент запуска и остановки скиповой подъемной машины, так как статистические данные измерений токов и напряжений фиксируют значительные провалы напряжения в данном узле, что приводит к аварийным отключениям и нарушению технологического процесса предприятия. Результаты моделирования могут послужить основой для формирования рекомендаций по применению систем динамической компенсации в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

В данной работе рассматриваются вопросы отклонения напряжения, колебания напряжения и несинусоидальности напряжения, а также поддержание баланса реактивной мощности вблизи в узле с наиболее высоким уровнем потребления. Коэффициент реактивной мощности регламентируются приказом Минэнерго №380 от 23 июня 2015 [17].

Различные типы устройств управления уровнем напряжения и реактивной мощности имеют свои достоинства и недостатки. Сравнительный анализ данных систем на основе качественных оценок по наиболее важным для рассматриваемой задачи критериям, приведён в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Технические решения  
Technical solutions

FACTS-устройства	Скорость отклика	Регулирование режима работы	Контроль индуктивности	Операционные расходы
Коммутируемые конденсаторы (реакторы)	Медленно (>70мс)	Дискретно	Нет	Низкие
Конденсаторы с тиристорным включением	Быстро	Дискретно	Нет	Средние
SVC (СТК)	Быстро (20-30 мс)	Непрерывно	Да	Высокие
Синхронный компенсатор	Быстро (<10 мс)	Непрерывно	Да	Высокие
STATCOM	Быстро (<10 мс)	Непрерывно	Да	Высокие

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Конденсаторные батареи требуют малых капитальных затрат, но при этом дискретность подключения конденсаторной батареи создает сложности в достижении нормативных показателей качества электроэнергии [18]. Синхронный компенсатор представляет из себя двигатель, работающий на холостом ходу в виду чего создает сложности в монтаже и эксплуатации из-за большой массы и вращающихся частей [19]. Статический тиристорный компенсатор имеет меньшее быстродействие, чем СТАТКОМ, и сам является источником гармонических возмущений. Поэтому оптимальным решением является СТАТКОМ, как устройство, обладающее максимальным быстродействием и способное компенсировать любые возмущения в режиме онлайн.

### Имитационная модель

Объектом исследования является система электроснабжения с электроприемниками, имеющими высокую долю потребления реактивной мощности и нелинейные вольтамперные характеристики.

На рисунке 2 представлен участок схемы распределительной сети, включающий подъемную машину с устройством плавного пуска и существующую систему фильтрации гармоник типа ФКУ.

В распределительной сети на уровне напряжения 6 кВ установлен 12-ти пульсный циклоконвертор для шахтной подъемной машины расчетной мощностью 4,2 МВт. Приводом подъемной машины является синхронный двигатель.

Штатное фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ) включено в схему с целью снижения уровня гармонических искажений, вызванных работой шахтной подъемной машины и повышения коэффициента мощности. ФКУ подключено к силовым шинам подъемной машины на напряжение 6 кВ. Это устройство не обладает возможностями компенсации динамических изменений напряжения во всем диапазоне циклического процесса, не имеет схемы регулирования реактивной мощности и относится к неуправляемым (пассивным) типам ФКУ. Кроме этого, при остановке машины для загрузки/разгрузки возникают емкостные нагрузки. Для обеспечения допустимых норм изменения напряжения во всем диапазоне работы подъемной машины с полными эксплуатационными характеристиками необходимо использовать подходящую систему динамической компенсации.

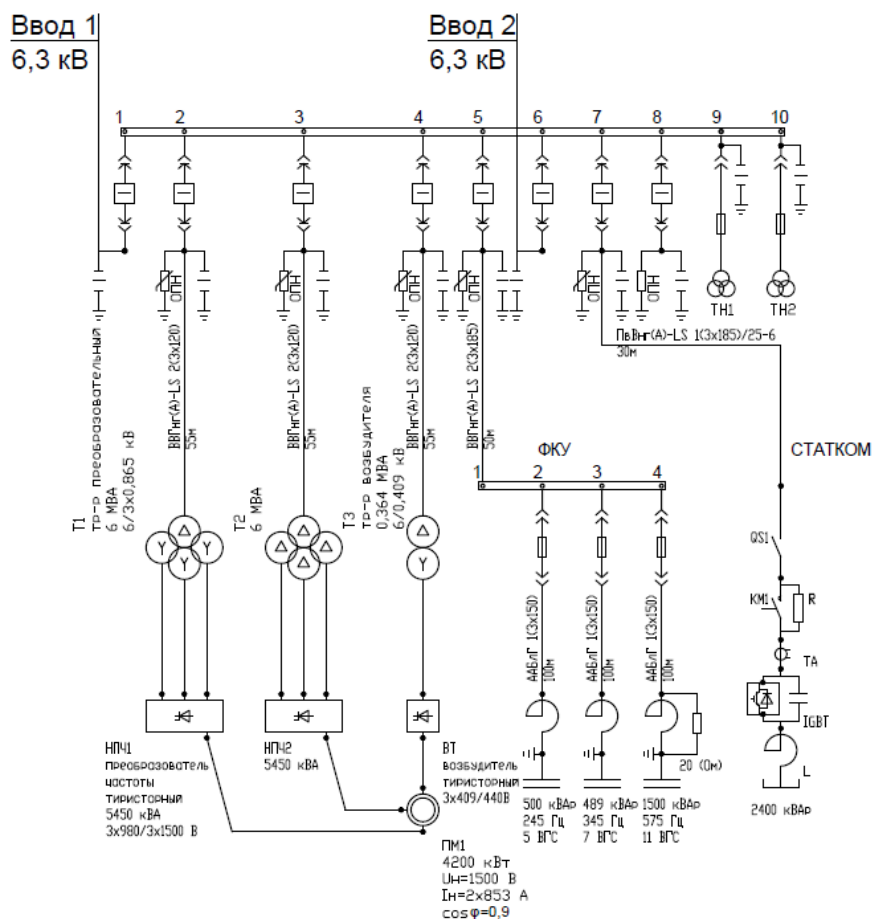


Рис. 2. Схема распределительной сети

Fig. 2. Diagram of the distribution network

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

В соответствии с поставленной задачей рассматривается использование системы СТАТКОМ 2,4 Мвар для фильтрации гармоник и стабилизации напряжения за счёт динамической компенсации реактивной мощности. Использование данной системы должно исключить провалы напряжения в циклах работы скиповой подъемной машины сверх допустимых пределов, обеспечить работу подъемной установки с проектной максимальной нагрузкой. При этом, непосредственно сама проектируемая система СТАТКОМ не должна вызывать негативных резонансных явлений в электрической сети.

В таблице 2 представлены имеющиеся характеристики синхронного двигателя.

Таблица 2  
Table 2

Характеристики синхронного двигателя  
*Synchronous engine characteristics*

Номинальное напряжение	1500 В
Номинальная активная мощность	4200 кВт
Номинальный ток	2853 А
Cosφ	0,9
Количество оборотов в минуту	47,59 об/мин

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Характеристики фильтро-компенсирующего устройства представлены в таблице 3.

Таблица 3  
Table 3

Характеристики фильтро-компенсирующего устройства  
*Characteristics of the filter-compensating device*

Фильтр гармоник	Мощность, квар	Частота, Гц
5	500	245
7	489	345
11	1500	575

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Устройство плавного пуска (УПП) является основной причиной появления высших гармонических составляющих в схеме. Предметом исследования является влияние изменчивости режима работы подъемной машины на напряжение и потребление реактивной мощности в системе электроснабжения горнодобывающего предприятия.

Профиль напряжения во время работы шахтной машины демонстрирует значительные флуктуации, пропорциональные режиму работы машины. Во время остановок машины (например, для загрузки) были зафиксированы максимальные значения напряжения вплоть до 6,5 кВ. В фазе разгона машины напряжение падает до 5,7 кВ (на 12-13% от максимального значения напряжения). Оба значения главным образом зависят от напряжения без нагрузки и полного сопротивления сети (значения мощности короткого замыкания). Основные рабочие точки цикла подъемной машины, полученные в ходе измерений, представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Table 4

Рабочие точки цикла скиповой подъемной машины  
*Skip Lifting Machine Cycle Work Points*

Рабочие точки	P, кВт	Q, квар	S, кВА	cos φ	Время t, с	U, В без СТАТКОМ
0	0	8898	8898	0,00	0,00	5886
1	386	8881	8898	0,043	3,3	5869
2	342	7875	7882	0,043	3,3	5910
3	342	7873	7880	0,043	3,7	5910
4	488	11227	11238	0,043	3,7	5773
5	7254	7865	10568	0,686	18,5	5682
6	4949	5244	7211	0,686	18,5	5792
7	1105	1171	1610	0,686	84,3	6133
8	-1199	1271	1747	0,686	84,3	6188
9	1271	2418	2419	0,022	99,6	6142
10	-53	938	939	0,022	99,6	6200
11	20	914	914	0,022	108,8	6200
12	20	93	93	0,022	108,8	6233
13	-2	96	96	0,00	110,4	6233

14	0	0	0	0,00	110,4	6239
15	0	0	0	0,00	119,4	6239

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Для анализа уровня напряжения на шинах распределительного устройства, питающего подъемную машину, а также уровня гармонических составляющих была разработана в среде Matlab Simulink имитационная модель системы электроснабжения предприятия, фильтро-компенсирующего устройства, подъемной машины и СТАТКОМ. Данная модель представлена на рисунке 3.

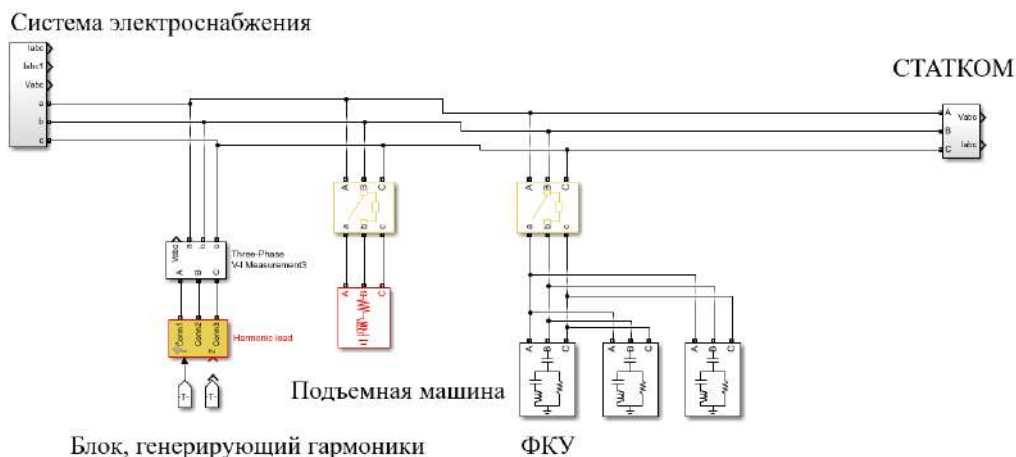


Рис. 3. Имитационная модель системы электроснабжения, подъемной машины и компенсирующих устройств

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Данная модель позволяет изучать влияние режимов работы подъемной машины (рассматриваются различные варианты потребляемой активной и реактивной мощности) на уровень напряжения на шинах распределительного устройства. Оценка допустимости режима работы происходит по отклонению напряжения от номинального значения (допустимым является отклонение не более 4% от номинального). Также данные режимы моделируются при разном напряжении источника, так как необходимо учитывать отклонения напряжения в узле питания. Следовательно имитационная модель позволяет рассмотреть наиболее критические режимы и сравнить уровень напряжения без использования СТАТКОМ и с использованием СТАТКОМ.

Другой функцией имитационной модели является оценка уровня высших гармонических составляющих. Для этого производится включение и отключения ФКУ и СТАТКОМ, а также регулирование в сети коэффициентов гармонических составляющих ( $n = 3, 5, 7, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25$ ).

**Результаты (Results)**

На рисунках 4 и 5 представлен смоделированный цикл работы скиповой подъемной машины, который соответствует результатам измерений. На основе предоставленных данных смоделировано то же поведение привода, что и во время контрольных замеров на объекте.

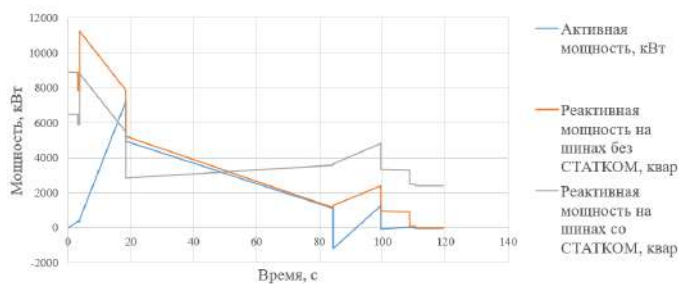


Рис. 4. График активной и реактивной мощности

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Кривые значений  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  отражают типичное поведение циклов работы шахтной подъемной машины.

Значения коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей при отсутствии фильтро-компенсирующих устройств, при работе ФКУ и при работе СТАТКОМ представлено в таблице 5.

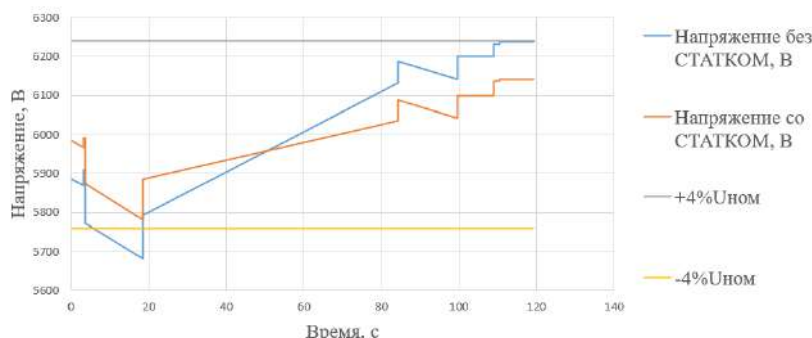


Рис. 5. График напряжения на шинах распределительного устройства *Fig. 5. Graph of voltage at the switchgear busbars*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 5  
Table 5

Коэффициенты  $n$ -ой гармонической составляющей  
*Coefficients of the  $n$  harmonic component*

Номер гармоники	без ФКУ (%)	с ФКУ (%)	со СТАТКОМ (%)
3	1,98	2,24	2,89
5	9,4	5,97	0,15
7	8,34	3,01	0,19
11	5,23	0,28	0,18
13	4,39	0,81	0,18
15	3,77	0,97	0,17
17	1,32	0,39	1,87
19	0,58	0,19	0,82
21	0,52	0,18	0,73
23	0,23	0,08	0,33
25	0,21	0,08	0,29
$K_u$	15,01	7,19	3,66

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Основные гармонические составляющие – это 5, 7, 11 и 13 гармоники. Наилучший результат снижения гармоник наблюдается при использовании СТАТКОМ. Сравнение представлено на рисунке 6.

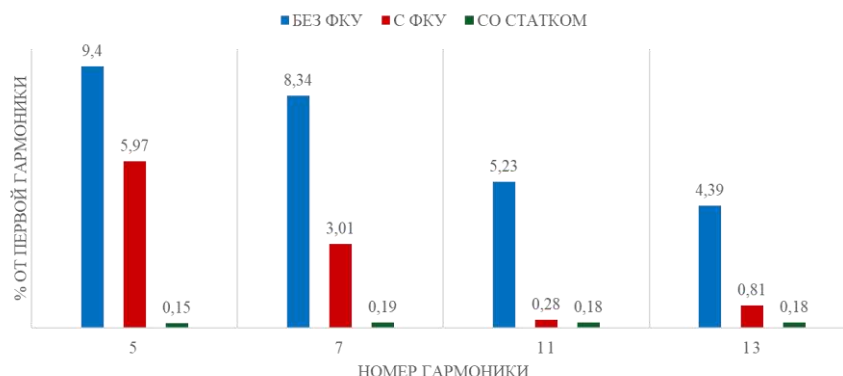


Рис. 6. Основные гармонические составляющие *Fig. 6. Main harmonic components*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

В качестве системы динамической компенсации в описанных моделях использовалась система СТАТКОМ 2,4 Мвар на основе технологии IGBT. Данная

технология обеспечивает сверхбыстрый контроль, а также позволяет, как потреблять, так и генерировать реактивную мощность. Такая схема обязательна для компенсации роста напряжения при остановках машины, а также падения напряжения, в частности на этапе ускорения.

Система фильтрации гармоник была включена в течение всего периода измерений. Поэтому поток реактивной мощности на уровне  $2,5 M_{\text{вар}}$  был зафиксирован во время остановок машины. В начале этапа ускорения зафиксированы максимальные значения реактивной мощности, в то время как активная мощность с увеличением скорости машины возрастает незначительно. На следующем этапе наблюдалось незначительное снижение активной и реактивной мощности машины. На этапе торможения зафиксирована отрицательная активная мощность и увеличенная реактивная мощность.

Во время остановок машины, в соответствии с результатами измерений и моделирования наблюдается поток емкостной мощности  $2,5 M_{\text{вар}}$  системы фильтрации гармоник. Таким образом, сетевое напряжение увеличивается с 6000 до 6239 В. Рост напряжения главным образом определяется мощностью короткого замыкания питающей сети. В случае, когда при помощи РПН сетевого трансформатора начальное значение напряжения установлено на достаточно высоком уровне, максимальная граница диапазона напряжения может быть превышена.

В фазе разгона машины напряжение на шинах без использования СТАТКОМ падает до 5682 В (на 5,3 % меньше номинального значения напряжения). При использовании СТАТКОМ напряжение на шинах при максимальной нагрузке падает до 5782 В (на 3,7 % меньше номинального значения напряжения), что достаточно для соблюдения требований ГОСТ 32144-2013.

Также в ходе моделирования был проведен гармонический анализ, полученный на основе быстрого преобразования Фурье для режима работы без ФКУ, с ФКУ, со СТАТКОМ и их совместной работы. Результаты показали, что наиболее эффективным устройством в вопросе компенсации высших гармонических составляющих является СТАТКОМ, но совместная работа СТАТКОМ и ФКУ невозможна, так как возникает резонанс.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

В ходе анализа технических средств повышения качества электрической энергии были выявлены наиболее эффективные решения применительно к объектам систем электроснабжения горнодобывающего предприятия. Наиболее эффективным вариантом по быстрдействию и гибкости регулирования выходных параметров оказалась система СТАТКОМ на IGBT транзисторах.

Разработана имитационная модель участка системы электроснабжения горнодобывающего предприятия с подъемной машиной, а также установками СТАТКОМ и ФКУ в программном пакете *Matlab simulink*.

На основе статистических данных режима работы подъемной машины проведено имитационное моделирование режима работы системы электроснабжения. Результаты моделирования показали, что:

- Наибольший эффект компенсации высших гармонических составляющих происходит при использовании СТАТКОМ ( $K_{\text{и}}=3,66\%$ );
- Использование режима компенсации высших гармонических составляющих у СТАТКОМ при работе ФКУ невозможно, т.к. возникает резонанс. Для исключения резонанса необходимо изготавливать СТАТКОМ и ФКУ одновременно, т.е. изготавливать реакторы ФКУ с учетом изменения частотного спектра;
- При использовании СТАТКОМ  $2,4 M_{\text{вар}}$  напряжение в максимальном режиме работы подъемной машины составило 5782 В или  $0,963 U_{\text{ном}}$  (без использования СТАТКОМ 5682 В или  $0,947 U_{\text{ном}}$ ).

Полученные результаты говорят об эффективности применения систем СТАТКОМ для повышения качества электроэнергии и гибкого управления уровнем реактивной мощности в системе электроснабжения горнодобывающих предприятий.

#### **Литература**

1. Титаренко, О.Н. Использование активных фильтров для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения / О.Н. Титаренко, Д.Р. Поляков // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 121-125. – EDN WHUXJV.
2. Андреев, А. В. Автоматизация компенсации реактивной мощности как средство повышения качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий

/ А.В. Андреев, А.Ю. Щербаков, АН. Попов // Современные проблемы электроэнергетики. Алтай-2014 : сборник статей II Международной научно-технической конференции, Барнаул, 27 ноября 2014 года / Редакционная коллегия: С.О. Хомутов, И.А. Гутов, В.И. Сташко. – Барнаул: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), 2014. – С. 5-9. – EDN UYGSKL.

3. Ненахов А.И. Разработка методик подавления колебаний напряжения и коррекции формы токов резкопеременных промышленных нагрузок с помощью быстродействующих управляемых устройств. Москва: 2017. – 20 с.

4. Волошин М.В. Повышение качества электроэнергии и снижение электропотребления территориально рассредоточенных электроустановок предприятий по добыче и переработке полезных ископаемых. Санкт-Петербург: 2006. – 22 с.

5. Воронин В.А. Перспективы использования d-STATCOM в угольных шахтах / В.А. Воронин, Ф.С. Непша // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 30 апреля 2020 года. – Прокопьевск: Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске, 2020. – С. 67-72.

6. Xiukai Guo, Pengfei Xu, Xiaoping Shao, Comprehensive evaluation of power quality of coal mine power grid based on equilibrium empowerment and improved grey relational projection method, Energy Reports, Volume 8, Supplement 4, 2022, Pages 1680-1688, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.287>.

7. Л.А. Плацанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт. Горные науки и технологии. 2022; 7(1): 66–77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>

8. Анциферов Н.С. Пути снижения потерь электроэнергии в питающих горные предприятия линиях. Горные науки и технологии. 2019; 4(2): 150 - 156. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-2-150-156>

9. Varenik, E.A., Korinev B.L., Kats A.B., et al. (2004). Electric drives and power supplies for coal mines. 75. pp. 59-63.

10. Nepsha Fedor, Voronin Vyacheslav. (2020). The problem of the optimum placement of explosive protected devices for compensation of reactive capacity on coal mines. Сборник тезисов «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» 23-24 апреля 2020 г. - с. 573-577

11. Fedor Nepsha, Vyacheslav Voronin, Roman Belyaevsky, et al. Application of FACTS Devices in Power Supply Systems of Coal Mines E3S Web Conf., 174 (2020) 03026. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403026>

12. Research and Application of SATCOM Key Technology for Underground Winch Load [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gb.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=1019603808.nh&dbcode=CMF&D&dbname=CMFDREF>. (Дата обращения: 13.04.2020).

13. Explosion-proof STATCOM reactive compensation device [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN201666163U/en>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 13.04.2020).

14. Fedor Nepsha, Vyacheslav Voronin, Aleksei Khoreshok and Aleksandr Ermakov Simulation of the power supply system of the coal mine section E3S Web Conf., 315 (2021) 03026, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503026>.

15. Копылов К.Н. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. No 12. С. 40 – 50.

16. Воронин В.А. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения/ Воронин В.А., Непша Ф.С. // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 633-639. doi:10.31897/PMI.2020.6.5.

17. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380. О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии.

18. Солонина Н.Н. Новые технологии компенсации реактивной мощности /Солонина Н.Н, Суслов К.В., Солонина З.В. // Вестник Иркутского государственного



технического университета. – 2016. – № 5(112). – С. 135-143. – doi 10.21285/1814-3520-2016-5-135-143. – EDN VXPECT.

19. Кирилина О.И., Козлов П.М., Массов А.А. Управление реактивной мощностью промышленного узла нагрузки // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 9. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-reaktivnoy-moschnostyu-promyshlennogo-uzla-nagruzki> (дата обращения: 30.05.2022).

#### Авторы публикации

**Артём Михайлович Балабанов** – студент, Новосибирского государственного технического университета.

**Сергей Владимирович Митрофанов** – канд.техн.наук., доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Новосибирский государственный технический университет.

#### References

1. Titarenko ON. The use of active filters to improve the quality of electricity in power supply systems / Titarenko ON, Polyakov DR. *Power Plants and Technologies*. – 2019;5(4):121-125. EDN WHUXJV.

2. Andreev AV. *Automation of reactive power compensation as a means to improve the quality of electricity in electrical networks of industrial enterprises*. Altai-2014: collection of articles of the II International Scientific and Technical Conference, Barnaul, November 27, 2014 / Editorial Board: S.O. Khomutov, I.A. Gutov, V.I. Stashko. Barnaul: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. (Altai State Technical University), 2014. - pp. 5-9. - EDN UYGSKL.

3. Nenakhov AI. *Development of methods for suppressing voltage fluctuations and correcting the shape of currents of sharply variable industrial loads by means of fast-acting controlled devices* : autoref... Ph.D. in Technical Sciences. - Moscow: 2017. - 20 p.

4. Voloshin MV. Improvement of power quality and reduction of power consumption of territorially dispersed electrical installations of mining and processing enterprises : autoref... Ph. D. in. - Saint-Petersburg: 2006. - 22 p.

5. Voronin VA. Prospects of using d-STATCOM in coal mines / Voronin VA., Nepsha FS. *Prospects of innovative development of coal regions of Russia*: Proceedings of the VII International Scientific-Practical Conference, Prokopyevsk, April 30, 2020. - Prokopyevsk: Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev» in Prokopyevsk, 2020. pp. 67-72.

6. Xiucui Guo, Pengfei Xu, Xiaoping Shao. Comprehensive evaluation of power quality of coal mine power grid based on equilibrium empowerment and improved grey relational projection method. *Energy Reports*. Volume 8, Supplement. 2022,8(4):1680-1688. ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.287>.

7. Plashchansky LA, Reshetnyak SN, Reshetnyak MY. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>.

8. Antsiferov NS. Ways to Reduce Power Losses in Mining Power Supply Lines. *Gornye nauki i tekhnologii. Mining Science and Technology (Russia)*. 2019;4(2):150-156. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-2-150-156>.

9. Varenik EA, Korinev BL, Kats A.B, et al. (2004). *Electric drives and power supplies for coal mines*. 75. pp. 59-63.

Nepsha Fedor, Voronin, Vyacheslav (2020). *The problem of the optimum placement of explosive protected devices for compensation of reactive capacity on coal mines*. Collection of Abstracts. Innovations and Prospects of Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2020. April 23-24, 2020. pp. 573-577

Fedor Nepsha, Vyacheslav Voronin, Roman Belyaevsky, et al. Application of FACTS Devices in Power Supply Systems of Coal Mines. E3S Web Conf. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403026>

12. *Research and Application of SATCOM Key Technology for Underground Winch Loads* [Electronic resource]. Access mode: <http://gb.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=1019603808.nh&dbcode=CMFD&dbname=CMFDREF>. Screen title. (Date of access: April 13, 2020).

13. *Explosion-proof STATCOM reactive compensation device* [Electronic resource]. Access mode: <https://patents.google.com/patent/CN201666163U/en>. Screen title. (Date of access: 13.04.2020).

14. Fedor Nepsha, Vyacheslav Voronin, Aleksei Khoreshok, et al. *Simulation of the power supply system of the coal mine section*. E3S Web Conf., 315 (2021) 03026, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503026>.

15. Kopylov KN, Reshetnyak N, Kubrin SS. Simulation modeling of power supply system of coal mine section. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2016;12:40-50.

16. Voronin VA. *Simulation modeling of electric drive of a shearer to assess the energy efficiency of power supply system* / Voronin VA, Nepsha FS. Notes of the Mining Institute. 2020;246:633-639. doi:10.31897/PMI.2020.6.5.

17. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of June 23, 2015 N 380 *On the procedure for calculating the ratio of active and reactive power consumption for individual power receiving devices (groups of power receiving devices) of consumers of electricity*.

18. Solonina NN. New technologies of reactive power compensation / NN. Solonina, KV. Suslov, ZV. Solonina. *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2016;5(112):135-143. doi 10.21285/1814-3520-2016-5-135-143. EDN VXPECT.

19. Kirilina OI, Kozlov PM, Massov A.A. Managing reactive power of industrial load node. *Technical Sciences - from theory to practice*. 2012;9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-reaktivnoy-moschnostyu-promyshlennogo-uzla-nagruzki> (date of reference: 30.05.2022).

#### **Authors of the publication**

**Artem M. Balabanov** - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

**Sergey V. Mitrofanov** –Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

**Получено** **08.02.2023г**

**Отредактировано** **20.02.2023г**

**Принято** **27.02.2023г**

УДК 621.3.051

## ТЕСТИРОВАНИЕ ФИДЕРОВ ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРЫ 6 – 10 кВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОЗЗ

Федотов А.И., Андреев Н.К., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф.

Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности функционирования воздушных линий распределительных электрических сетей. ЦЕЛЬ. Исследовать проблему определения места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) на фидерах древовидной структуры в воздушных распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 6 – 10 кВ, работающих в режиме изолированной нейтрали. Обоснование эффективности тестирования отключенного фидера сигналами постоянного тока по двум фазам воздушных линий (ВЛ), используя выборочное подключение к фидеру трансформаторных подстанций. Разработать алгоритм формирования тестовых схем и получить условия, характеризующие присутствие или отсутствие ОЗЗ на выделенных участках схемы. МЕТОДЫ. Для достижения поставленной цели предложено на обесточенном фидере дистанционно отключать все присоединенные подстанции, подавать на вход напряжение постоянного тока на две фазы, включая аварийную фазу. Избирательно включать одну удаленную конечную подстанцию, обеспечивая шунтирование через трансформатор двух фаз, находящихся под напряжением. Тем самым можно организовать питание места ОЗЗ с двух сторон. Для расчета величины сопротивления питающих электрических цепей разработан алгоритм, не требующий решения уравнений режима работы фидера на постоянном токе по двум фазам. РЕЗУЛЬТАТЫ. На примерах показана методология формирования тестовых схем. Разработаны условия предварительной оценки присутствия или отсутствия ОЗЗ в тестовой схеме. Приведена формула для расчета расстояния до места ОЗЗ с учетом наличия переходного сопротивления. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Методика тестирования отключенного фидера ориентирована на распознавание места устойчивого ОЗЗ и позволяет его рассчитать при значениях переходных сопротивлений на уровне нескольких сотен кОм. Гибкая РЭС, оснащенная дистанционно управляемыми высоковольтными коммутационными аппаратами, позволяет выполнить все процедуры в пределах 0,4 часа.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю; распределительная электрическая сеть; алгоритм; зондирующий сигнал; тестовая схема; источник постоянного тока.

**Для цитирования:** Федотов А.И., Андреев Н.К., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф. Тестирование фидеров древовидной структуры 6 – 10 кВ для определения места ОЗЗ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 80-92.

## TESTING OF 6 – 10 kV TREE STRUCTURE FEEDERS TO DETERMINE THE LOCATION OF THE A SINGLE-PHASE EARTH FAULT

AI. Fedotov, NK. Andreev, GV. Vagapov, AF. Abdullazyanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** RELEVANCE of the study is primarily related to the evaluation of the effectiveness of national networks of airlines. THE PURPOSE. To research the problem of determining the location of a single-phase ground fault (SPGF) on tree-structured feeders in overhead power distribution grids (PDG) of a voltage of 6–10 kV with isolated neutral mode. Substantiation of the effectiveness of testing a disconnected feeder with DC signals on two phases of overhead power lines (OPL), using selective connection of transformer substations to the feeder. Develop an algorithm for the formation of test circuits and obtain conditions characterizing the presence or absence of SPGF in selected sections of the circuit. METHODS. To achieve this goal, it is proposed to remotely turn off all connected substations on a power off feeder, apply DC voltage to

the input for two phases, including the phase with fault. Selectively turn on one remote terminal substation, providing shunting through the transformer of two phases with voltage. Thus, it is possible to organize the power supply of the SPGF place from two sides. For calculate the resistance value of the supply electrical circuits, an algorithm has been developed that does not require solving the equations of the feeder operation mode at direct current in two phases. RESULTS. The examples show the methodology for generating test circuits. Conditions for a preliminary assessment of the presence or absence of an SPGF in a test scheme have been developed. A formula is given for calculating the distance to the place of SPGF, taking into account the presence of contact resistance. CONCLUSION. The method of testing a disconnected feeder is focused on recognizing the place of a stable SPGF and allows you to calculate it with transient resistance values at the level of several hundred kOhm. Flexible PDG, equipped with remotely controlled high-voltage switching devices, allows you to perform all procedures within 0.4 hours

**Keywords:** single-phase earth fault; distribution electrical network; algorithm; probing signal; test circuit; DC power source.

**For citation:** AI. Fedotov, NK. Andreev, GV. Vagapov, AF. Abdullazyanov. Testing of 6 – 10 kV tree structure feeders to determine the location of the a single-phase earth fault. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57): 80-92.

### Введение

В распределительных электрических сетях 6 – 10 кВ серьезной проблемой является идентификация мест ОЗЗ на ВЛ, что отмечается в [1-6]. Односторонние измерения параметров режима со стороны шин центра питания (ЦП) в принципе не способны дать однозначный ответ, на какой ВЛ фидера древовидной структуры произошло ОЗЗ. Изложенный в работах [7-9] метод многосторонних измерений параметров режима на высших гармониках требует организации каналов связи между ЦП и потребительскими подстанциями 10/0,4 кВ большой пропускной способности для передачи цифровых копий сигналов с разрешением не менее 256 точек на период промышленной частоты, либо использования интеллектуальных приборов учета с функциями гармонического анализа сигналов тока и напряжения, таких как, например, приборы учета ARIS EM компании «Прософт-Системы» [10]. В то же время современные РЭС дополняются возможностями резервирования за счет распределенной генерации, установки реклоузеров, что в определенной мере позволяет поддерживать электроснабжение потребителей при отключениях фидеров со стороны ЦП. Кратковременные перерывы электроснабжения практически неизбежны при выполнении ремонтных работ на ВЛ по устранению причин ОЗЗ. В связи с этим спланированное кратковременное отключение фидера в пределах 5 – 10 минут для выполнения процедур его тестирования не представляется невыполнимым, в то же время в последующем резко сокращается поиск места повреждения и существенно снижается вероятность перехода ОЗЗ в короткие замыкания, которые неизбежно отключаются по результатам действия релейной защиты, что приводит к уже длительным перерывам электроснабжения.

Источниками тестовых сигналов могут служить как самостоятельные приборы, так и системы накопления электроэнергии (СНЭЭ), которые получают все большее распространение в связи с использованием ВИЭ. Зарубежный опыт показывает, что уже практически рассматриваются РЭС, где сочетается одновременное использование систем постоянного и переменного тока, ВИЭ и СНЭЭ, (рис. 1).

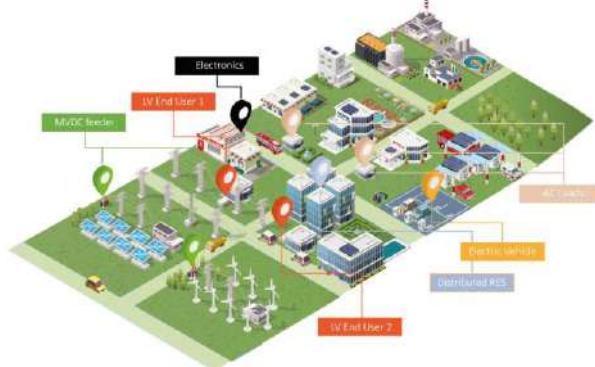


Рис. 1. Планируемая к реализации гибридная РЭС [10] *Fig. 1. Hybrid electric distribution network planned for implementation [10]*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таким образом, в состав РЭС как один из элементов, обеспечивающих их гибкое функционирование, входят источники постоянного тока. Наличие в системы накопления электроэнергии позволяет организовать тестирование фидера специально сформированными сигналами, которые, с учетом взаимосвязи между различными параметрами ВЛ и параметрами сигнала, позволят однозначно установить поврежденную ВЛ путем односторонних измерений. Принимая во внимание, что подключение зондирующих сигналов осуществляется к уже отключенному фидеру, источниками сигналов могут являться и отдельные низковольтные устройства, обладающие достаточной мощностью. Очевидно, тестирование отключенных ВЛ предполагает наличие устойчивого ОЗЗ, в противном случае оно не эффективно. Такие замыкания в эксплуатации воздушных РЭС встречаются большей частью в виде обрыва вязки проводов, рисунке 2, разрушения изоляторов или их перекрытия по поверхности, (рис. 3).



Рис. 2. ОЗ ВЛ - 10 кВ через стойку при обрыве вязки фазного провода *Fig. 2. OZ VL - 10 kV through the strut when the knitting phase wire is broken*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

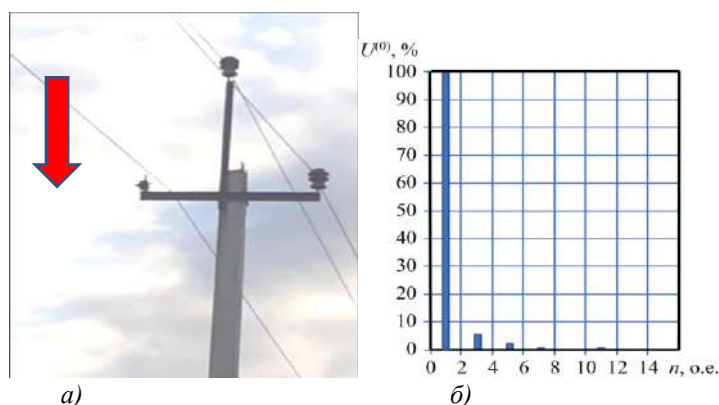


Рис. 3. ОЗ ВЛ - 10 кВ через траверзу *a* – разрушенный изолятор и контакт провода с траверсой; *б* – гармонический состав напряжения нулевой последовательности на шинах ЦП *Rice. 3. OZ overhead - 10 kV through the traverse a - destroyed insulator and wire contact with the traverse; b - harmonic composition of zero-sequence voltage on CPU tyres*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Если подключить источник постоянного напряжения к одной или нескольким фазам, то через обмотки трансформаторов сигналы подаются и на другие фазы, что приводит к появлению дополнительных цепей, связывающих источник и место ОЗЗ. Это обстоятельство также можно использовать для идентификации места ОЗЗ, но расчеты существенно усложняются. Гибкая электрическая сеть подразумевает наличие

дистанционно управляемых коммутационных аппаратов. Это позволяет на интервале времени отключения фидера от сети формировать такие тестовые схемы, которые позволяют быстро распознать поврежденный участок электропередачи по величине тестовых сигналов. Такой подход требует разработки новых принципов тестирования, не смотря на имеющиеся аналогичные публикации [12-15].

*Принцип тестирования схемы на постоянном токе*

Рассмотрим принцип тестирования на простом примере, (рис. 4), где узел 1 является местом глухого присоединения трех ВЛ, в узлах 2 – 4 подключаются потребительские подстанции с дистанционно управляемыми высоковольтными коммутационными аппаратами Q2 – Q4. Пусть ОЗЗ произошло на линии ВЛ2.

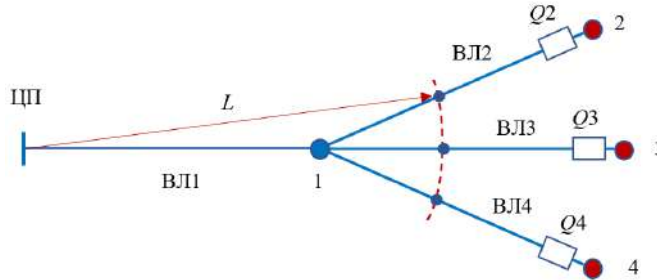


Рис. 4. Структурная схема фидера

Fig. 4. Feeder diagram

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Идея метода двустороннего тестирования состоит в том, что на постоянном токе можно организовать через обмотку высокого напряжения трансформатора дополнительный путь тестового тока к месту ОЗЗ с другой стороны ВЛ. При этом на стороне ЦП должны быть одновременно подключены источники постоянного напряжения к двум фазам. Сама поврежденная фаза устанавливается предварительно поочередной подачей сигнала в каждую фазу, максимальный ток будет соответствовать искомой фазе. Допустим сначала, что конкретная ВЛ с ОЗЗ известна и ею является ВЛ2, рисунке 4. Далее будет показано, как выполняется тестирование в общем случае, когда аварийная отпайка неизвестна. Схема тестирования на рисунке 5а,б образована путем отключения от сети трансформаторов в узлах 3 и 4 коммутационными аппаратами Q3 и Q4.

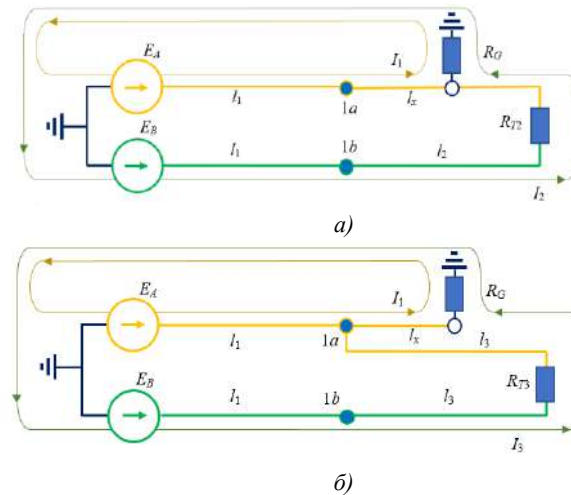


Рис. 5. Схемы тестирования фидера а – подключен трансформатор к ВЛ2, б – подключен трансформатор к ВЛ3

Fig. 5. Feeder Test Circuit A - Transformer Connected to VL2, B - Transformer Connected to VL3

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Положим для простоты, что все провода имеют одно сечение, как это часто бывает на практике. Тогда для схемы рисунка 5 а можем записать следующие два уравнения

$$\left. \begin{aligned} E_A &= r_0 I_1 (l_1 + l_x) + R_G (I_1 + I_2), \\ E_B &= r_0 I_2 (l_1 + 2l_2 - l_x) + R_G (I_1 + I_2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Схема на рисунке 5 б получена путем отключения коммутационного аппарата  $Q_2$  и включения коммутационного аппарата  $Q_3$ . Тогда для полученной схемы справедливы следующие уравнения

$$\left. \begin{aligned} E_A &= r_0 I_1 l_1 + (r_0 l_x + R_G)(I_1 + I_3), \\ E_B &= r_0 I_2 (l_1 + 2l_3) + (r_0 l_x + R_G)(I_1 + I_3). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Отсюда получаем очевидное соотношение между токами двух параллельных ветвей

$$I_1 / I_2 = (R_1 + 2R_3) / R_1. \quad (3)$$

Простая формула (3) играет важную роль в распознавании, где именно произошло ОЗЗ: если авария на отпайке (применительно к сформированной магистрали «ЦП – включенный трансформатор»), то об этом будет свидетельствовать выполнение соотношения между токами (3). Данная формула является первичной проверкой, есть ли необходимость в дальнейших перекоммутациях трансформаторов. Если соотношение токов отлично от (3), то используется система (3) для расчета расстояния до места ОЗЗ. При выполнении формулы (3) производится перекоммутация трансформаторов: отключается исходный трансформатор и включается трансформатор на следующей отпайке. Отсюда следует, что необходимо последовательно подключать каждую очередную отпайку в режиме тестирования, пока соотношение между токами (3) не будет нарушено.

Непосредственно по величинам токов  $I_2$  и  $I_3$  судить нельзя, например, ВЛЗ может быть короткая и ток  $I_3$  будет превышать ток  $I_2$ , что создаст впечатление о повреждении именно на ВЛЗ.

Обобщим описанный выше метод на фидер древовидной структуры. Алгоритм определения места ОЗЗ по тестовым сигналам постоянного тока следующий:

1. Отключаются от сети все трансформаторы потребительских подстанций.
2. Тестируется каждая фаза фидера для выявления аварийной фазы. Критерием служит максимальная величина
3. Выбирается наиболее удаленная от ЦП подстанция, где трансформатор подключается к ВЛ.
4. Подаются тестовые сигналы по двум фазам, одна из которых аварийная, и измеряются в них токи.
5. Проверяется соотношение между токами (3) для каждой отпайки от магистрали. Если оно не выполняется, то из системы уравнений (2) находятся расстояние до места ОЗЗ и переходное сопротивление.
6. Если выражение (3) выполняется на одной из отпайек, то на ней подключается к сети самый удаленный трансформатор после отключения предыдущего трансформатора.
7. Повторяются пункты 4 – 6 до тех пор, пока не будет нарушено равенство (3).
8. Совпадение расчетных результатов по каждой паре токов дает искомое положение места ОЗЗ.

Покажем на примере схемы рис. 6 технологию применения данного алгоритма. Положим, что все ВЛ длиной 16 км, за исключением ВЛ6, которая длиной 32 км. Все провода выполнены одним сечением провода АС-120,  $r_0=023$  Ом/км. ОЗЗ произошло в узле 4 через переходное сопротивление 100 Ом.

Изначально место ОЗЗ неизвестно, поэтому произвольно включаем трансформатор в одном из «висящих» узлов. Принимаем, что к сети подключен трансформатор на подстанции 3, все остальные трансформаторы отключены, в результате чего образуется магистраль ВЛ1 - ВЛ2 – ВЛ3 из двух фазных проводов, замыкающихся между собой через обмотку ВН трансформатора узла 3.

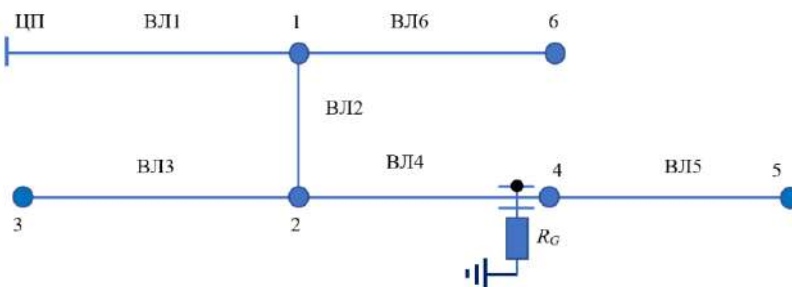


Рис. 6. Принципиальная схема фидера *Fig. 6. Tree structure feeder diagram* древовидной структуры

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

В результате формируется тестовая схема, (рис. 7), и соответствующая схема замещения, (рис. 8).

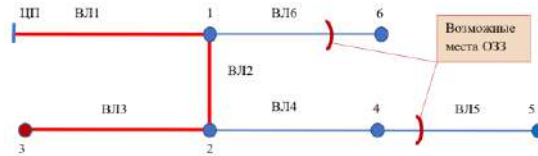


Рис. 7 – Выделение тестовой магистрали «ЦП – ВЛ1 – ВЛ2 – ВЛ3» на фидере Fig. 7 - Selection of the test line «CPU - VL1 - VL2 - VL3» on the feeder

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

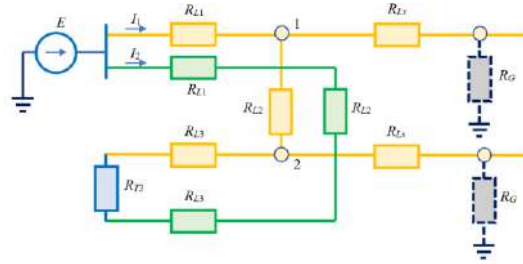


Рис. 8. Схема замещения для режима тестирования через узел 3 Fig. 8. Substitution scheme for Node 3 test mode

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Первоначально проверяется гипотеза, что ОЗЗ находится на отпайке от ула 1 сформированной магистрали. При подаче напряжения постоянного тока в две фазы на входе ВЛ1 напряжением 400 В на входе ВЛ1 измерены токи

$$I_1 = I_A \approx 2,46 \text{ A}; I_2 = I_B \approx 1,22 \text{ A}; I_1 / I_2 \approx 2,01. \quad (4)$$

Выполним расчет отношения сопротивлений параллельных ветвей

$$(R_{L1} + 2R_{L2} + 2R_{L3}) / R_{L1} = 5. \quad (5)$$

Таким образом, условие (3) не выполняется и это означает, что возможное место ОЗЗ находится либо в пределах магистрали, либо на отпайке от узла 2. Проверяем этот вариант:

$$R_{\Sigma 2} / R_{\Sigma 1} = (R_{L1} + R_{L2} + 2R_{L3}) / (R_{L1} + R_{L2}) = 2. \quad (6)$$

Поскольку выполняется условие

$$| I_1 / I_2 - R_{\Sigma 2} / R_{\Sigma 1} | < \varepsilon, \quad \varepsilon = 0,05, \quad (7)$$

то установлено: ОЗЗ на выбранной отпайке. Далее отключаем выключатель в узле 3 и включаем выключатель на крайней подстанции 5, (рис. 6). В результате образуется схема, представленная на рисунке 9, соответствующая схема замещения приведена на рисунке 10.

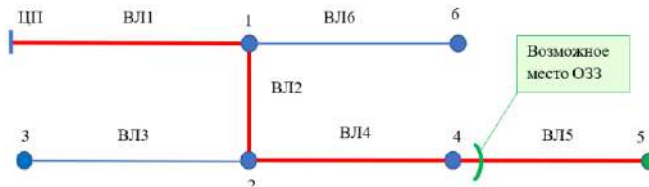


Рис. 9. Выделение тестовой магистрали «ЦП – ВЛ1 – ВЛ2 – ВЛ4 – ВЛ5» на фидере Fig. 9. Selection of the test line «CPU - VL1 - VL2 - VL4 - VL5» on the feeder

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.



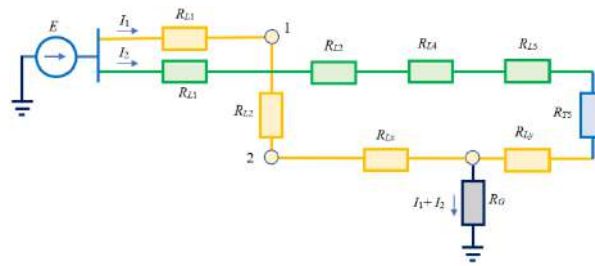


Рис. 10. Схема замещения для режима тестирования через узел 5

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Если бы и в этом случае условие (7) не выполнилось, тогда ОЗЗ имело бы место на магистрали «ЦП – ВЛ1 – ВЛ2 – ВЛ3». Заметим, что если бы в схеме имелись и другие узлы с отпайками, то пришлось бы делать физические коммутации и с другими трансформаторами.

Далее производятся физические измерения тестовых токов в реальной схеме и записываются уравнения для схемы замещения, (рис. 9). Измеренные токи на входе фидера равны  $I_1=2,34$  А и  $I_2=1,40$  А. Расчет неизвестных параметров выполняется по уравнениям

$$\left. \begin{aligned} 400 &= 0,23 * 2,34(16 + 16 + l_x) + R_G(2,34 + 1,40), \\ 400 &= 0,23 * 1,40[16 + 16 + 2(16 + 16) - l_x] + R_G(2,34 + 1,40). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Отсюда получаем, что расстояние от узла 2 до места ОЗЗ равно 15,9 км и переходное сопротивление равно 100,1 Ом. Достоинством рассматриваемого метода является повышение порогового значения переходного сопротивления до нескольких сотен кОм при сохранении приемлемой точности расчетов. Так, при  $R_G= 1$  кОм имеем:  $I_1=0,25$  А и  $I_2=0,15$  А, что дает тот же результат, как и выше.

#### Алгоритм расчета сопротивлений в тестовых схемах

Выше был приведен иллюстративный наглядный пример, как выполняется тестирование фидера. Однако необходима формализация метода, чтобы все расчеты выполнялись автоматически без участия оперативного персонала центра питания. Тогда перерыв электроснабжения потребителей можно ограничить пределами 10 – 20 минут. При этом достигается и иной результат: в случае оценки недопустимо малой величины переходного сопротивления, опасной для длительных перенапряжений в сети, фидер остается в отключенном состоянии до устранения повреждения.

Обширные математические методы, разработанные применительно к теории электрических цепей, не ориентированы на описание схемы, где одновременно проводят две фазы из трех и место поперечной несимметрии неизвестно. Причем обе фазы могут быть электрически связаны между собой в разных местах. Теория симметричных составляющих в данном случае не применима, т.к. она предназначена для описания трехфазных электрических цепей на переменном токе. Также возникает задача расчета суммарного активного сопротивления каждой ветви, связывающих источники питания с общим узлом, при смещении этого узла в процессе перебора вариантов расположения места ОЗЗ. Рассмотрим решение обозначенной проблемы.

Ставится задача расчета суммарного сопротивления между двумя узлами, что необходимо для использования формул расчета места ОЗЗ или же оценки, где оно расположено. Наиболее приемлемым её решением представляется использование апробированного метода узловых уравнений, адаптированного к особенностям тестовых схем. Она заключается во-первых, в расширении матрицы соединений вследствие учета второго фазного провода и, во-вторых, в чередовании узлов, в которых трансформаторы включены, где фазные провода электрически связываются между собой. Условно считаем, что ОЗЗ происходит на фазе «А» и дополнительно используются ВЛ на фазе «В». В конечном счете, задача определения места ОЗЗ сводится к использованию двух выражений:

- проверка расположения места ОЗЗ за пределами контура «ЦП, фаза А – трансформатор – ЦП, фаза В» по формуле

$$|I_A/I_B - R_B/R_A| < \varepsilon; \quad (9)$$

- расчета места ОЗЗ внутри контура «ЦП, фаза А – ОЗЗ – трансформатор – фаза В, ЦП», рис. 9, по формуле (с используемыми в формуле (9)  $R_A$  и  $R_B$  не совпадают)

$$I_{Nx} = 2R_B - (1 + \mu)R_A / r_0(1 + \mu), \quad (10)$$

где  $\mu = I_A / I_B$ ,  $R_B$  рассчитывается от ЦП до узла с включенным трансформатором,  $R_A$  рассчитывается от ЦП до узла, от которого определяется удаленность ОЗЗ.

Как видно из формул (9) и (10), помимо измеренных токов необходимо знать сопротивление цепей по фазам *A* и *B*. Это возможно сделать по узловым уравнениям. Особенностью их записи является учет двух проводящих фаз. В качестве базисного и балансирующего узла принимается «земля» и  $U_0=0$ . Первый номер присваивается узлу, совмещенному с шинами ЦП, 2-й – следующему за ним узлу, остальная нумерация узлов произвольная. Очевидно, что она будет изменяться в зависимости от того, в каком узле будет включен трансформатор. Также закрепляется номер 1 за ветвью, соответствующей воздушной линии фидера, подключенной к шинам ЦП.

При выборе конкретного узла с подключенным трансформатором соответствующая строка удаляется из матрицы, а на её место помещается последняя строка в исходной матрице. Тогда не приходится перенумеровывать все остальные узлы. Исходной является матрица узловых проводимостей *Y*, содержащая все узлы. После её редуцирования (удаления строки и столбца выбранного за базисный узла) и замены на проводимости последнего узла получаем узловое уравнение следующего вида

$$\mathbf{YU} = \mathbf{J} \quad \leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где только один задающий ток отличен от нуля –  $J_1$ .

В уравнении (11) известно напряжение  $U_1$ , т.к. оно равно напряжению источником питания, задающие токи узловые токи обнулены, за исключением тока  $J_1$ , который неизвестен. Учитывая принятую нумерацию ветвей, можем записать, что

$$y_{11} = y_1, \quad y_{12} = y_{21} = -y_1, \quad \text{и т.д.} \quad (12)$$

Не рассматривая первую строку системы (11), формируем новую систему уравнений

$$\begin{bmatrix} -y_{21}U_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{22} & Y_{2n} \\ Y_{n2} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_n \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Отсюда получаем значение напряжения  $U_2$ . Поскольку все задающие токи в узлах приравнены к нулю (кроме первого), образуется только одна токопроводящая цепь между узлом 1 (подключение тестового источника питания) и выбранным базисным узлом подключения трансформатора, где напряжение принято равным нулю. После чего находится ток  $I_1$ , поступающий от узла 1 в электрическую цепь фазы «*B*», по которому рассчитывается сопротивление ветви  $R_B$

$$I_1 = y_1(U_1 - U_2), \quad R_B = U_1/I_1. \quad (14)$$

Изложенная методика может быть реализована в интерактивном режиме, когда оператор на компьютере выбирает узел с последующей проверкой условия (9), для чего выбирается одна из отходящих от него ветвей, в самом конце которой задается глухое замыкание на «землю». Она может быть интегрирована в уже установленные программы расчета режима распределительной сети, где реализованы алгоритмы решения узлового уравнения вида (13). Для полной автоматизации процесса необходимо дополнить методику алгоритмом выбора узлов, где подключаются трансформаторы, перебора узлов на сформированной магистрали, и перебора ветвей, отходящих от каждого «внутреннего» узла. Покажем ниже, что реализация этого алгоритма позволяет попутно простым способом рассчитывать суммарные сопротивления формируемых цепей и соответственно не требует использования уравнения (11).

Рассматриваемый способ основан на использовании ленточных матриц, с их помощью выполняется перебор сочетаний узлов и ветвей, чтобы выделить участок электропередачи, связывающий ЦП (узел 1) с узлом, где подключен трансформатор. Покажем на конкретном примере, (рис. 11), где первоначально в тестовом режиме трансформатор подключен к сети в узле 9, а ОЗЗ на ВЛ5 (заранее неизвестно).

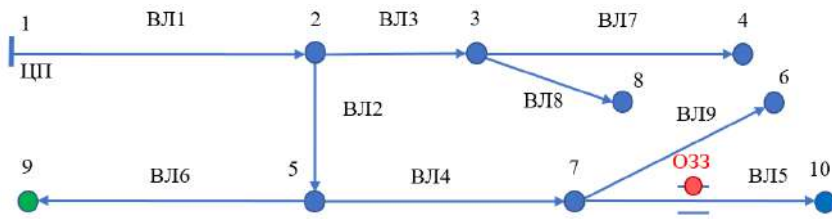


Рис. 11. Схема фидера древовидной структуры Fig. 11. Tree structure feeder diagram

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Запишем для схемы, (рис. 11), ленточную матрицу связи ветвей с узлами

**Ветви:**                    1    2    3    4    5    6    7    8    9

**Узлы:**

+	1	2	2	5	7	5	3	3	7
-	2	5	3	7	10	9	4	8	6

(15)

Применительно к матрице (15) запускается процедура исключения «висящих» узлов и связанных с ними ветвей, за исключением узла 1 и выделенного узла 9, где подключен трансформатор. «Висящими» считаются те узлы, которые только один раз записаны в матрице (15). Эта процедура известная, легко алгоритмизируемая, и здесь не описывается. После первой проверки «висящих» узлов (по рис. 11 – это узлы 4, 6, 8, 10) удаляются связанные с ними ветви 5, 7, 8, 9 (признак удаляемой ветви – знак «-» при удаляемом узле) и образуется следующая матрица:

**Ветви:**                    1    2    3    4    5    6    7    8    9

**Узлы:**

+	1	2	2	5	7	5	3	3	7
-	2	5	3	7	10	9	4	8	6

(16)

На следующем этапе находятся «висящие» узлы 3 и 7 и окончательно формируется матрица, отражающая связь между узлами 1 и 6:

**Ветви:**                    1    2    3    4    5    6    7    8    9

**Узлы:**

+	1	2	2	5	7	5	3	3	7
-	2	5	3	7	10	9	4	8	6

(17)

Теперь необходимо использовать проверку условия (9) для уточнения, в какой части схемы находится ОЗЗ, для чего из матрицы (17) выбирается любой узел, не совпадающий с выделенными узлами 1 и 9, и матрица (17) разбивается на две части по отношению к выделенному «внутреннему» узлу. Пусть это узел с наименьшим номером – узел 2:

**Ветви:**                    1            2    3    4    5    6    7    8    9

**Узлы:**

+	1	2	2	5	7	5	3	3	7
-	2	5	3	7	10	9	4	8	6

(18)

По матрицам (18) выполняется суммирование сопротивлений ветвей по формулам

$$R_A = \sum_{n=1}^N R_n, \quad R_S = \sum_{n=N+1}^M R_n, \quad R_B = R_A + 2R_S. \quad (19)$$

В формулах (19) суммируются только те ветви, которые входят в соответствующие матрицы. Для конкретного примера  $N = 1$ ,  $M = 6$  и

$$R_A = R_1, R_S = R_2 + R_6, R_B = R_A + 2R_5. \quad (20)$$

Далее проверяется условие (9) на предмет, может ли быть ОЗЗ на ВЛ3, ВЛ7 и ВЛ8, связанных с узлом 2. Поскольку заранее принято, что ОЗЗ там нет, то условие (9) не будет выполнено. После чего осуществляется переход к следующему по номеру «внутреннему» узлу в матрице (17), каковым будет узел 5, опять матрица (17) делится на две части и т.д. Поскольку теперь условие (9) будет выполнено, то формируется новая физическая схема путем отключения трансформатора в узле 9 и включения трансформатора в узле с наименьшим номером 6. Измеряются значения токов  $I_A$  и  $I_B$  на входе фидера, формируются соответствующие матрицы, и все дальнейшие процедуры повторяются в описанной выше последовательности. Поскольку будет получено, что ОЗЗ не на ВЛ9, отходящей от узла 7, то будет выбрана ВЛ5, отключен трансформатор в узле 6, включен в узле 10, измерены токи  $I_A$  и  $I_B$ . Используя рассчитанное относительно узла 7 сопротивление  $R_A$ , по формуле (10) определяется расстояние до места ОЗЗ. В рассматриваемом примере формула (10) будет выглядеть следующим образом

$$l_{7x} = \frac{2(R_1 + R_2 + R_4 + R_5) - (1 + \mu)(R_1 + R_2 + R_4)}{r_0(1 + \mu)}. \quad (21)$$

Таким образом, путем последовательного перебора отпаяк и соответствующей коммутацией трансформаторов можно установить не только аварийное ответвление на фидере древовидной структуры, но и конкретное место повреждения.

Рассмотрим вариант использования предложенного метода в сочетании с методом «резонансных» частот на конкретном примере, (рис. 12), где приведены значения высших «резонансных» гармоник при ОЗЗ в данном узле. Как видно из рисунка 12, однозначно нельзя установить, имеется ОЗЗ на участках фидера 1-6 или 2-3, при этом собственно место повреждения по «резонансным» частотам оценивается с точностью до нескольких километров.

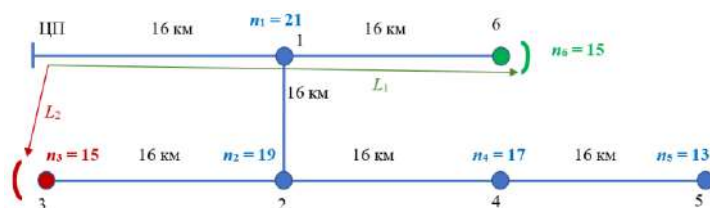


Рис. 12. Схема фидера и значения «резонансных» гармоник Fig. 12. Feeder scheme and values of «resonant» harmonics

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Пусть металлическое ОЗЗ на ВЛ вблизи узла 6. Подключение трансформатора к сети в узле 3 в тестовом режиме при напряжении питания 400 В дает значения токов  $I_A = 49,3$  А и  $I_B = 9,8$  А, тогда  $\mu = 5,03$ . Отношение сопротивлений  $R_B/R_A = 18,4/3,68 = 5$ . Таким образом, по условию (9) ОЗЗ находится на одной из отпаяк от магистрали «ЦП – 1 – 2 – 3». По значениям «резонансных» частот таковой может быть единственная отпайка: от узла 1 к узлу 6. Повторный режим тестирования уже при включенном трансформаторе в узле 6 дает расстояние 16 км до места ОЗЗ от узла 1. Аналогичные расчеты позволяют распознать ОЗЗ вблизи узла 3, т.е. однозначно идентифицировать поврежденную ВЛ и конкретное место ОЗЗ на ней.

#### Результаты исследования

Метод тестирования фидера на постоянном токе по двум фазам предполагает проведение физических измерений значений токов на его входе и расчет суммарных сопротивлений электрических цепей по отношению к выбранному узлу. Использование для таких расчетов известных уравнений, записанных относительно узловых проводимостей, на первый взгляд представляется более простым приемом, чем описанный в статье алгоритм на основе ленточных матриц. Однако узловое уравнение, во-первых, требует математического описания не привычной топологии трехфазной схемы, а её топологии по двум фазам, которая взаимно отличается за счет шунтирования фаз по постоянному току через трансформатор. Также неизбежное изменение схемы тестирования приводит к изменению матрицы соединений, причем далее процедуры опять не типовые, т.к.

необходимо использовать известные значения двух токов и учитывать как неизвестное переходное сопротивление. Метод узловых уравнений целесообразно модифицирован применительно к задаче расчета места ОЗЗ, если уже имеются соответствующие стандартные программы с базой данных по конкретным фидерам.

Предложенный в статье метод перебора узлов на выделенной тестовой схеме в виде магистрали основан на элементарных логических действиях, легко программируется. Его достоинством является низкая чувствительность к величине переходного сопротивления, которое может быть выше суммарного сопротивления проводов на порядок и более. Обязательное условие охвата зондированием поврежденной фазы постулирует, что она ранее обнаружена, например, по осциллограммам фазных токов в режиме ОЗЗ под рабочим напряжением. Если таковые измерения отсутствуют, то потребуются предварительное пофазное зондирование фидера на постоянном токе, и наличие тока определит искомую фазу.

Эффективно использование тестирования фидера в сочетании с методом «резонансных» частот. Последний предполагает наличие набора таких частот для каждого узла фидера при вариации значения переходного сопротивления. Это обуславливает необходимость наличия имитационной модели фидера. Однако в условиях эксплуатации эти расчеты резко сокращают процедуру тестирования: если нет совпадений частот, то тестирование предполагает коммутацию только одного трансформатора. Если таких частот несколько, то уже по первому расчету, зная соотношение между токами, можно практически безошибочно выбрать для коммутации трансформатор на аварийном присоединении. Ограничением такого взаимодействия двух методов служит величина переходного сопротивления, т.к. при его значениях порядка 100 кОм и выше «резонансные» гармоники уже не проявляются в измеряемых сигналах.

#### **Выводы**

Для фидеров 6-10 кВ воздушных распределительных электрических сетей характерна древовидная структура. Топографический поиск места ОЗЗ зачастую связан со значительными временными затратами и особенно затруднен в зимнее время. Эволюция электротехнических комплексов в направлении повышения их управляемости, адаптации к текущим режимам, подключения распределенной генерации, в том числе и возобновляемых источников энергии, открывает перспективы применения новых технологий по расчетной однозначной локализации мест ОЗЗ на основе односторонних измерений параметров специальных тестовых режимов. Эти тестовые режимы организуются на отключенном фидере путем его зондирования по двум фазам сигналами постоянного тока. Опыты на имитационных моделях показали однозначную зависимость соотношений значений тестовых токов от места ОЗЗ на фидере древовидной структуры. Положительной стороной описанного метода является высокая чувствительность в диапазоне значений переходного сопротивления от единиц Ом до сотен Ом.

Источниками тестовых сигналов могут служить электрохимические СНЭЭ. Постоянный ток поступает в фидер непосредственно от аккумуляторных батарей, а переменный ток – с выхода преобразователя напряжения. С выхода штатных фильтров СНЭЭ подавать в схему тестовые сигналы имеет смысл только в том случае, если изначально согласующий трансформатор СНЭЭ выполняется с выведенной нейтралью обмотки высшего напряжения, которая при тестировании замыкается на землю. В противном случае в следствие того, что на выходе преобразователя формируется сигнал в виде пакета импульсов широтно-импульсной модуляции, необходима установка фильтров, выделяющих тестовые частоты (достаточно две частоты). Технически подключение источника сигнала к обесточенному фидеру осуществляется через гибкие изолированные шлейфы от распределительного щита, либо от стационарной низковольтной шины, к которым подключен источник сигналов.

#### **Литература**

1. Качесов В.Е., Финашин Р.А. Импульсно-резистивный способ заземления нейтрали трехфазной электрической сети и физическая модель, его реализующая // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С 90-95.
2. Украинцев А.В., Нагай В.И. Способ выявления поврежденного элемента при замыканиях на землю в радиальных распределительных сетях напряжением 6-35 кВ // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. 2011. №5 С. 25-27.
3. Шуин В.А. Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – М.: НТФ Энергопресс, 2001.

4. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // *Новости ЭлектроТехники*. – 2005. – № 3 (33).
5. Рыжкова Е.Н., Младзиевский Е.П. О возможности применения управляемого резистивного заземления нейтрали для отыскания места повреждения в кабельной сети // *Промышленная энергетика*. 2019. № 5. С. 34-42.
6. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Петров А.А., Фальков А.А. Перспективная система релейной защиты для цифровых распределительных сетей // *Электрические станции*. 2022. № 5 (1090). С. 48-53.
7. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., и др. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 1. С. 146-155.
8. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., и др. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 1. С. 58-68.
9. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6-35 кВ на "резонансных" частотах при ОЗЗ // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 5-6. С. 69-78.
10. <https://all-pribors.ru/opisanie/66308-16-aris-em-75063> (дата обращения 15.02.2023)
11. <https://tigon-project.eu/> (дата обращения 16.02.2023)
12. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Петров А.А., Фальков А.А., Желтов Н.А. Метод автоматического расчёта параметров срабатывания токовой релейной защиты распределительных сетей // *Электрические станции*. 2022. № 11 (1096). С. 52-57.
13. Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Бездушный Д.И., Лоскутов А.А. Применение метода наложения для решения задачи определения места повреждения в сетях среднего напряжения // *Электричество*. 2021. № 9. С. 38-44.
14. Пелевин П.С., Лоскутов А.А. Разработка имитационных моделей лэп для исследований алгоритмов волнового ОМП / В сборнике: *Электроэнергетика глазами молодежи. Материалы XII Международной научно-технической конференции*. Нижний Новгород, 2022. С. 249-252.
15. Pyushin P.V., Suslov K.V., Kulikov A.L. An approach to arranging primary and secondary control of the operating parameters in microgrids featuring inverter-connected generator sets // В сборнике: *Journal of Physics: Conference Series. AeroSpace school, IT Lab*. 2022. С. 012070.

#### Авторы публикации

**Федотов Александр Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова», Казанский государственный энергетический университет. (КГЭУ).

**Андреев Николай Кузьмич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ), Казанский государственный энергетический университет.

**Вагапов Георгий Валериянович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

**Абдуллазянов Айнура Фоатович** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Kachesov VE, Finashin RA. Impul'sno-rezistivnyi sposob zazemleniya neutrali trekhfaznoi elektricheskoi seti i fizicheskaya model', ego realizuyushchaya. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2020;1 (58): 90-95.
2. Ukraintsev AV, Nagai VI. Sposob vyyavleniya povrezhdenogo elementa pri zamykaniyakh na zemlyu v radial'nykh raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 6-35 kV. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-kavkazskii region*. 2011;5:25-27.
3. Shuin VA, Gusenkov AV. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-10 kV*. – М.: NTF Energopress, 2001.
4. Shalin AI. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit. *Novosti ElektroTehniki*. 2005;№ 3 (33).

5. Ryzhkova EN, Mladzievskii EP. O vozmozhnosti primeneniya upravlyаемого rezistivnogo zazemleniya neutrali dlya otyskaniya mesta povrezhdeniya v kabel'noi set. *Promyshlennaya energetika*. 2019;5:34-42.

6. Sharygin MV, Kulikov AL, Petrov AA, Fal'kov A.A. Perspektivnaya sistema releinoi zashchity dlya tsifrovyykh raspredelitel'nykh setei. *Elektricheskie stantsii*. 2022;5 (1090):48-53.

7. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, et al. Tsifrovaya sistema monitoringa povrezhdenii na liniyakh elektroperedachi. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(1):146-15.

8. Fedotov AI, Akhmetvaleeva LV, Basyrov RSh, et al. Normirovanie amplitudy vysshikh garmonik pri opredelenii fidera s odnofaznym замыканием на zemlyu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(1):58-68.

9. Fedotov AI, Vagapov GV, Chernova NV. Raspredelenie tokov i napryazhenii vdol' vozdukhnykh liniy elektroperedachi 6-35 kV na "rezonansnykh" chastotakh pri OZZ. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2017;19(5-6):69-78..

10. Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/66308-16-aris-em-75063> (data obrashcheniya 15.02.2023)

11. Available at:<https://tigon-project.eu/> (data obrashcheniya 16.02.2023)

12. Sharygin MV, Kulikov AL, Petrov AA, et al. Metod avtomaticheskogo rascheta parametrov srabatyvaniya tokovoi releinoi zashchity raspredelitel'nykh setei. *Elektricheskie stantsii*. 2022;11 (1096):52-57.

13. Kulikov AL, Osokin VYu, Bezdushnyi DI, Loskutov AA. Primenenie metoda nalozheniya dlya resheniya zadachi opredeleniya mesta povrezhdeniya v setyakh srednego napryazheniya. *Elektrichestvo*. 2021;9:38-44.

14. Pelevin PS, Loskutov AA. Razrabotka imitatsionnykh modelei lep dlya issledovaniy algoritmov volnovogo OMP. V sbornike: Elektroenergetika glazami molodezhi. Materialy KhII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Nizhnii Novgorod, 2022. p. 249-252.

15. Ilyushin PV, Suslov KV, Kulikov AL. An approach to arranging primary and secondary control of the operating parameters in microgrids featuring inverter-connected generator sets. V sbornike: *Journal of Physics: Conference Series*. AeroSpace school, IT Lab. 2022. C. 012070.

#### **Authors of the publication**

**Alexander I. Fedotov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Nikolai K. Andreev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Georgii V. Vagapov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Ainur F. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено** 27.02.2023г

**Отредактировано** 10.03.2023г

**Принято** 17.03.2023г

УДК 621.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ВНУТРИЦЕХОВЫХ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Петрова<sup>1</sup> Р.М., Абдуллазянов<sup>1</sup> Э.Ю., Грачева<sup>1</sup> Е.И., Valtchev<sup>2</sup> S., Yousef Ibragim<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Universidade NOVA of Lisbon, Portugal

<sup>3</sup>Federation University Australia

<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>, 1998renata@mai.ru<sup>1</sup>

**Резюме:** Актуальностью данного исследования является совершенствование методов определения параметров надежности низковольтного электрооборудования систем электроснабжения по статистическим эксплуатационным данным. Электротехнические комплексы промышленных объектов в настоящее время, как правило, имеют в своем составе технологические циклы различной степени сложности и соответствующее электрооборудование систем внутрицехового электроснабжения, к надежности эксплуатации которого, требования в современных условиях существенно возрастают. **ЦЕЛЬ.** Определить законы изменения вероятностных характеристик надежности низковольтного электрооборудования – силовых трансформаторов, автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов на основании статистических данных эксплуатации. **МЕТОДЫ.** Для определения законов изменения параметров надежности электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения проведено исследование теоретических и статистических функций вероятности безотказной работы и вероятности появления отказа каждого вида исследуемого электрооборудования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Произведена проверка на соответствие вероятностных характеристик электрооборудования нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова. Определены виды функций изменения основных параметров надежности электрооборудования и. представлены соответствующие графические зависимости. Проведено сравнение полученных результатов значений вероятности безотказной работы с требованиями ГОСТ. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате проведенных исследований определены эмпирические и теоретические законы изменения значений вероятностей безотказной работы и появления отказа в различные периоды наблюдения на основании статистических данных для электрооборудования низковольтных систем внутризаводского электроснабжения. Определены основные параметры надежности.

**Ключевые слова:** система внутрицехового электроснабжения; параметры надежности; силовой трансформатор; автоматический выключатель; магнитный пускатель; контактор; вероятностные характеристики.

**Для цитирования:** Петрова Р.М., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 93-105.

**STUDY OF PROBABILITY CHARACTERISTICS OF RELIABILITY OF ELECTRICAL  
EQUIPMENT IN INTERNAL POWER SUPPLY SYSTEMS**

**RM. Petrova<sup>1</sup>, EYu. Abdullazyanov<sup>1</sup>, EI. Grachieva<sup>1</sup>, Valtchev S<sup>2</sup>, Yousef Ibragim<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Universidade NOVA of Lisbon, Portugal

<sup>3</sup>Federation University Australia

<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>, 1998renata@mai.ru<sup>1</sup>



**Abstract: RELEVANCE.** Improvement of methods for determining reliability parameters of low-voltage electrical equipment of power supply systems based on statistical operational data. Industrial facilities, as you know, have in their composition technological cycles of varying degrees of complexity and the corresponding electrical equipment systems of internal workshop power supply, to the reliability of the operation of which, requirements in modern conditions are increasing significantly. **OBJECT.** To determine the laws of changing probabilistic reliability characteristics of low-voltage electrical equipment - power transformers, circuit breakers, magnetic starters and contactors on the basis of statistical operation data. **METHODS.** To determine the laws of changes in reliability parameters of electrical equipment of internal electrical supply systems, the study of theoretical and statistical functions of the probability of no-failure operation and probability of failure of each type of the investigated electrical equipment was carried out. **RESULTS.** Conformity of electrical equipment probability characteristics to the normal law of distribution with the use of Kolmogorov criterion was checked. Types of functions of changes in the main parameters of electrical equipment reliability were determined and corresponding graphic dependences were presented. The obtained results of the probability of no-failure operation were compared with the requirements of GOST. **CONCLUSIONS.** As a result of the performed investigations empirical and theoretical laws of change in the values of probabilities of no-failure operation and occurrence of failures in different periods of observation on the basis of statistical data for electrical equipment of low-voltage systems of in-plant power supply were determined. The main reliability parameters were determined.

**Keywords:** power supply system, reliability parameters, power transformer, automatic switch, magnetic starter, contactor, probabilistic characteristics.

**For citation:** Petrova RM, Abdullazyanov EYu, Grachieva EI, Valtchev S, Yousef Ibragim. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):93-105.

### **Введение**

В современных условиях развития энергетики России особое внимание уделяется повышению надежности систем внутрицехового электроснабжения. Ниже представлен анализ некоторых научных работ ученых, проводящих исследования в данной области.

В своих проведенных исследованиях Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова, Т.В. Табачникова, Р.Р. Гибадуллин [1] разработали алгоритм оценки эффективности эксплуатации низковольтных аппаратов, позволяющий уточнять величину потерь в низковольтных цеховых сетях. Приведены рекомендации для повышения достоверности расчета потерь электроэнергии.

Абрамкин Р.В. [2] разработал модель, позволяющую оценить надежность функционирования узла в условиях отказов элементов системы электроснабжения.

Атаевым З.А. [3] исследованы проблемы надежности электроснабжения некоторых объектов Крыма. П.В. Афанасьевым, А.Г. Ивахненко [4] предлагается алгоритм верификации методов испытаний в лаборатории, позволяющей проводить экспериментальные исследования характеристик низковольтного оборудования. Проведенные испытания позволяют адаптировать рекомендации по внедрению процедуры верификации для лабораторий с аналогичными методами испытаний.

В своей работе Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. [5] разработали методику расчета прогнозных значений показателей бесперебойности электроснабжения, применяемую в распределительных сетях 0,4-10 кВ. Данная методика позволяет сопоставить эффективность внедрения различных мероприятий с учетом изменения структурной и функциональной надежности распределительной сети.

Авторами Виноградовым А.В., Большевым В.Е., Виноградовой А.В., Бородиным М.В., Букреевым А.В. [6] предложен алгоритм внедрения средств мониторинга надежности электрооборудования систем электроснабжения, позволяющий стимулировать повышение эффективности эксплуатации систем электроснабжения в целом.

В своей работе Грачева Е. И., Гиззатуллина Е. Е. [7] использовали теорию планирования эксперимента для формирования моделей, позволяющих вычислять показатели надежности цеховых сетей с учетом условий эксплуатации.

Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. [8] исследовали основные характеристики топологии схем внутрицехового электроснабжения и технического состояния низковольтного оборудования в условиях их работы. Авторами проведен сравнительный анализ технических характеристик автоматических выключателей.

Авторами Грачевой Е.И., Наумовом О.В., Садыковым Р.Р., Серпионовой Т.А. [9] предлагается разработка моделей основных функциональных параметров систем внутризаводского электроснабжения, где исследуются различные виды конфигурации цеховой сети и выявляется закон распределения вероятностных характеристик электрооборудования.

В своей работе Ившин И.В., Галяутдинова А.Р. и др. [10] предложили интеллектуальную систему оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, с помощью которой в режиме реального времени возможен мониторинг состояния параметров надежности и оценка технического состояния оборудования. В работе Котеленко С.В. [11] представлена программа интеллектуализации низковольтного оборудования распределительных сетей.

Ученые Луковенко А.С., Зеньков И.В. [12] описали показатели надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети. Для предлагаемой разработки использовались алгоритм расчета показателей надежности систем электроснабжения, метод интенсивности отказов системы электроснабжения и модель прогнозирования.

Макашёва С.И., Пинчуков П.С. в своей работе [13] рассмотрели вопросы повышения надежности цифровых подстанций Российской Федерации. Произведена численная оценка вероятности безотказной работы основного оборудования с учетом основных положений теории надежности. Выявлены узлы цифровой подстанции с низкими показателями надежности, а также даны рекомендации по поддержанию требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей.

Семенов Д.А. [14] в своем исследовании предлагает различные способы повышения надежности трансформаторов в распределительных сетях, а также автором проанализированы причины снижения их срока службы.

В работе Тошходжаевой М.И. [15] произведена оценка надежности линий электропередач различных классов напряжений и установлены основные факторы, влияющие на надежность системы электроснабжения.

В статье Федотова А.И., Грачевой Е.И., Наумова О.В. [16] представлены основные методы исследования надежности низковольтных электрических аппаратов и приведены результаты анализа характеристик, определяющих их работоспособность.

М. Fotuhi-Firuzabad, S. Afshar, D. Farrokhzad и J. Choi в своей работе [17] применили программное обеспечение, ориентированное на надежность системы электроснабжения, позволяющее определять способы снижения интенсивности отказов низковольтного электрооборудования и повысить надежность системы. Предложенный подход применен к тестовой системе электроснабжения.

Авторами R. Gono, S. Rusek, M. Kratky и Z. Leonowicz [18] исследуется оценка параметров надежности элементов распределительных систем, а также возможности оптимизации технического обслуживания систем электроснабжения. S. Xiaoyan и X. Hangtian [19] определили основные факторы, обеспечивающие эффективную основу для моделирования надежности электрической системы.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, в настоящее время требуются новые подходы к оценке надежности элементов электрооборудования и систем внутрицехового электроснабжения. В современных условиях развития электротехнических комплексов при выходе оборудования из строя крупным производственным предприятиям проще заменить оборудование на новое, а не выводить его в капитальный ремонт и заниматься продлением срока службы. С другой стороны, существует возможность повышения точности прогнозных оценок технического состояния оборудования и внедрения необходимых мероприятий для обеспечения необходимой эффективности функционирования систем электроснабжения.

**Научной и практической значимостью** предлагаемой статьи является совершенствование методов определения параметров надежности низковольтного электрооборудования по статистическим эксплуатационным данным и соотношение результатов проведенных исследований с паспортными данными, а также выявление законов распределения вероятностных характеристик элементов систем внутрицехового электроснабжения.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключаются в исследовании вероятностных параметров низковольтного электрооборудования с учетом режимов работы по данным эксплуатации предприятий г. Казани.

**Материалы и методы**

Для прогнозирования надежности электрооборудования низковольтных сетей предлагается использовать сравнение статистических и теоретических значений функции распределения вероятностей безотказной работы и появления отказа.

Рассмотрим статистические данные отказов электрооборудования, установленного в системах внутрицехового электроснабжения промышленных объектов ряда предприятий г. Казани:

- автоматического выключателя ВА51-35 (завод-изготовитель КЭАЗ, г. Курск);
- магнитного пускателя ПМЛ-1100 (КЭАЗ);
- контактора КТ-6000 (КЭАЗ);
- трансформатора ТМ-1600/10/0,4 (ЭЛТЕХКОМ, г. Нижний Новгород или RU-TRANSFORMATOR, г. Екатеринбург).

Предположим, что вероятностные характеристики исследуемого оборудования подчиняются нормальному закону распределения, тогда вероятности безотказной работы и появления отказа рассчитываются по формулам:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{сред}} - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{сред}}}{\sigma}\right)} \tag{1}$$

$$Q(t) = \frac{\int_0^t e^{-\frac{(t-T_{\text{сред}})^2}{2\sigma^2}} dt}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \tag{2}$$

где  $t$  – время наблюдения, год;  
 $T_{\text{сред}}$  – средняя наработка на отказ, год;  
 $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, год;  
 $F$  – функция Лапласа.

Эмпирическая функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P^*(t_i) = \frac{N_0 - n_i(t)}{N_0} \tag{3}$$

где  $n_i(t)$  – суммарное число отказавших элементов, шт.;  
 $N_0$  – количество рассматриваемых элементов, шт.

Эмпирическая функция вероятности появления отказа записывается в виде:

$$Q^*(t_i) = \frac{n_i(t)}{N_0} \tag{4}$$

$$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i) \tag{5}$$

Для автоматического выключателя ВА51-35 время наблюдения принято равным,  $t=15$  лет, количество отказавших элементов за данный интервал – 217, количество рассматриваемых элементов – 283. Эмпирическое значение функции распределения вероятности безотказной работы и появления отказа во времени:

$P^*(t = 1 \div 4) = \frac{283 - 0}{283} = 1,000$	$Q^*(t = 1 \div 4) = \frac{0}{283} = 0,000$
$P^*(t = 5 \div 6) = \frac{283 - 1}{283} = 0,996$	$Q^*(t = 5 \div 6) = \frac{1}{283} = 0,004$
$P^*(t = 7) = \frac{283 - 2}{283} = 0,993$	$Q^*(t = 7) = \frac{2}{283} = 0,007$
$P^*(t = 8) = \frac{283 - 5}{283} = 0,982$	$Q^*(t = 8) = \frac{5}{283} = 0,018$
$P^*(t = 9) = \frac{283 - 10}{283} = 0,965$	$Q^*(t = 9) = \frac{10}{283} = 0,035$

Результаты расчета показаны в таблице 1.

Таблица 1.

Table 1

Статистические данные функции распределения вероятностей безотказной работы и появления отказа для автоматического выключателя ВА51-35 по годам  
*Statistical Data Function Distribution of Faultless Operation Probabilities and Occurrence of Failure for BA51-35 Circuit Breaker By Years*

Время наблюдения, $t_i$ , год	Количество элементов			Эмпирическое значение функции распределения вероятностей	
	отказавших за год, $n_i$	суммарное число отказавших, $n_i(t)$	исправных, $I_i$	безотказной работы во времени $P(t)$	появления отказа $Q(t)$
				$P^*(t_i) = \frac{N_0 - n_i(t)}{N_0}$	$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i)$
1	0	0	283	1,000	0,000
2	0	0	283	1,000	0,000
3	0	0	283	1,000	0,000
4	0	0	283	1,000	0,000
5	1	1	282	0,996	0,004
6	0	1	282	0,996	0,004
7	1	2	281	0,993	0,007
8	3	5	278	0,982	0,018
9	5	10	273	0,965	0,035
10	13	23	260	0,919	0,081
11	24	47	236	0,834	0,166
12	40	87	196	0,693	0,307
13	49	136	147	0,519	0,481
14	43	179	104	0,367	0,633
15	38	217	66	0,233	0,767

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

По статической информации об отказавших элементах определим среднюю наработку на отказ:

$$\bar{T}_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0} \quad (6)$$

где  $N_0$  – количество рассматриваемых элементов, шт.

Имея информацию о числе вышедших из строя автоматических выключателей  $n_i$  на каждом  $i$ -ом отрезке времени  $\bar{T}_{\text{сред}}$  до первого отказа определяется:

$$\bar{T}_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} n_i \cdot t_{\text{сред}i}}{N_0} \quad (7)$$

$$t_{\text{сред}i} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} \quad (8)$$

где  $t_{i-1}$  – момент времени начала  $i$ -ого интервала времени;

$t_i$  – момент времени конца  $i$ -ого интервала времени.

Исключив первые шесть лет испытаний, где количество отказавших элементов за год близко к 0, определим значение среднеквадратического отклонения времени безотказной работы:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(t_i - T_{\text{сред}})^2}}{t} \quad (9)$$

Для автоматического выключателя ВА51-35:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{сред}} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_0} n_i \cdot t_{\text{сред}i}}{N_0} = \\ &= \frac{7 \cdot 1 + 8 \cdot 3 + 9 \cdot 5 + 10 \cdot 13 + 11 \cdot 24 + 12 \cdot 40 + 13 \cdot 49 + 14 \cdot 43 + 15 \cdot 38}{217} = \\ &= \frac{2759}{217} = 12,7 \\ \sigma &= \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(t_i - T_{\text{сред}})^2}}{t} = \\ &= \frac{\sqrt{(7-12,7)^2}}{7} + \frac{\sqrt{(8-12,7)^2}}{8} + \frac{\sqrt{(9-12,7)^2}}{9} + \\ &+ \frac{\sqrt{(10-12,7)^2}}{10} + \frac{\sqrt{(11-12,7)^2}}{11} + \frac{\sqrt{(12-12,7)^2}}{12} + \\ &+ \frac{\sqrt{(13-12,7)^2}}{13} + \frac{\sqrt{(14-12,7)^2}}{14} + \frac{\sqrt{(15-12,7)^2}}{15} = 2,5 \end{aligned}$$

Т.о. получено  $\sigma = 2,5$  года;  $T_{\text{сред}} = 13$  лет.

Теоретическая функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{сред}} - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{сред}}}{\sigma}\right)} \quad Q(t) = 1 - P(t) \quad (10)$$

Для автоматического выключателя ВА51-35:

$$\begin{aligned} P^*(t=1) &= \frac{F(4,8)}{F(5,2)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000 & Q^*(t=1) &= 0,000 \\ P^*(t=5) &= \frac{F(3,2)}{F(5,2)} = \frac{0,999}{1,000} = 0,999 & Q^*(t=5) &= 1 - 0,999 = 0,001 \\ P^*(t=7) &= \frac{283 - 2}{283} = 0,993 & Q^*(t=7) &= \frac{2}{283} = 0,007 \\ P^*(t=8) &= \frac{283 - 5}{283} = 0,982 & Q^*(t=8) &= \frac{5}{283} = 0,018 \\ P^*(t=9) &= \frac{283 - 10}{283} = 0,965 & Q^*(t=9) &= \frac{10}{283} = 0,035 \end{aligned}$$

Результаты расчета представлены в табл. 2.

На рисунке 1 показаны графики изменения статистических и теоретических функций вероятности безотказной работы и появления отказа за время наблюдения, равное 15 годам, для автоматических выключателей ВА51-35.



Таблица 3.  
Table3Значения параметров надежности низковольтного электрооборудования  
*Reliability values of low-voltage electrical equipment*

Наименование электрооборудования	Количество отказавших элементов n, шт	Количество рассматриваемых элементов $N_0$ , шт.	Время наблюдения t, год	Средняя наработка на отказ $T_{\text{сред}}^*$ год	Среднеквадратическое отклонение наработки на отказ $\sigma$ , год
Автоматический выключатель ВА51-35	217	283	15	13	2,5
Магнитный пускатель ПМЛ-1100	135	178	8	6	2,4
Контактор КТ-6000	123	180	7	6	1,7
Трансформатор ТМ-1600/10/0,4	87	129	25	22	1,5

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Далее (рис. 2-4) представлены графики вероятностей безотказной работы и появления отказа для следующего вида электрооборудования:

- магнитных пускателей ПМЛ-1100;
- контакторов КТ-6000;
- трансформаторов ТМ-1600/10/0,4.

Для магнитных пускателей ПМЛ-1100 время наблюдения составляет  $t=8$  лет, при этом количество отказавших элементов – 135, количество наблюдаемых – 178.

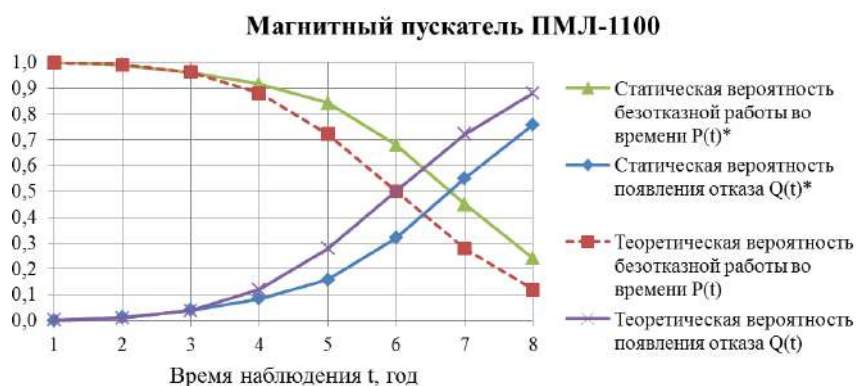


Рис. 2. Статистическая и теоретическая вероятности безотказной работы P и появления отказа Q во времени t для магнитных пускателей ПМЛ-1100 по годам

Fig. 2. Statistical and theoretical probabilities of non-failure operation P and occurrence of failure Q in time t for magnetic starter PPML-1100 by years

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты исследований статистических данных по отказам магнитных пускателей показывают, что требуемое в соответствии с ГОСТ 2491-82 значение вероятности безотказной работы аппарата - не ниже 0,85 наблюдается в течение первых 5 лет эксплуатации, а для контакторов – в течение 4,5 лет (рисунок 3), затем данная величина резко снижается. При этом паспортный срок службы исследуемых аппаратов равен 15 годам. Проведенные исследования показывают, что при наблюдаемых фактических режимах эксплуатации необходим контроль технического состояния магнитных пускателей, контакторов и своевременная замена аппаратов до появления отказов.

Для контакторов КТ-6000 время наблюдения равно  $t=7$  годам, количество отказавших аппаратов – 123, количество наблюдаемых аппаратов – 180.

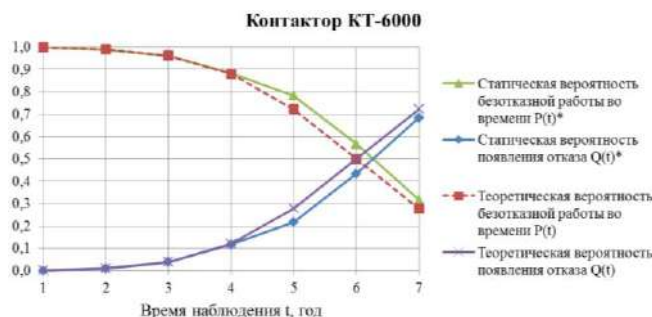


Рис. 3. Статистическая и теоретическая вероятности безотказной работы P и появления отказа Q во времени t для контакторов КТ-6000 по годам

Fig. 3. Statistical and theoretical probabilities of non-failure operation P and occurrence of failure Q in time t for contactor KT-6000 by years

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для трансформаторов ТМ-1600/10/0,4 кВ время наблюдения составило t=25 лет, количество отказавших – 87, количество исследуемых трансформаторов – 129.

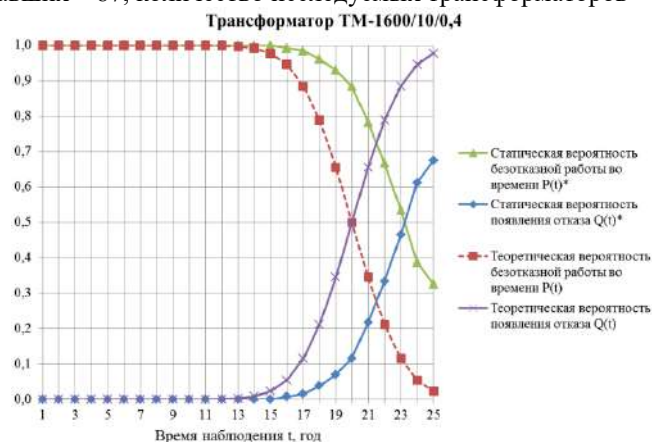


Рис. 4. Статистическая и теоретическая вероятности безотказной работы P и появления отказа Q во времени t для трансформатора ТМ-1600/10/0,4 кВ по годам

Fig. 4. Statistical and theoretical probabilities of non-failure operation P and appearance of failure Q in time t for transformer TM-1600/10/0,4 kV by years

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для трансформаторов, по результатам исследований, требуемое в соответствии с ГОСТ 11677-85 и ГОСТ 11920-73 значение вероятности безотказной работы, равное не ниже 0,96, наблюдается в течение первых 18 лет, а значение данного параметра не ниже 0,8, сохраняется в течение 21 года работы при паспортном сроке службы, равном 25 годам. При этом для данного вида электрооборудования, которое относится к одним из высоконадежных электроустановок, характерно, как правило, строгое соблюдение всех условий регламентов технического обслуживания и эксплуатации.

#### Проверка на соответствие закона распределения

Проверку на соответствие выбранного закона распределения проведем с помощью критерия Колмогорова.

Мера расхождения между теоретическими и экспериментальными величинами  $D_n$  вычисляется как максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения  $F^*(x)$  и выбранной теоретической функции распределения  $F(x)$ :

$$D_n = \max |F^*(x) - F(x)| \quad (11)$$

Значение случайной величины рассчитывается по формуле:

$$y_n = D_n \sqrt{n} \quad (12)$$

где n – количество отказавших элементов.

В таблице 4 приведены значения показателей критерия Колмогорова  $P(y_n)$ . Определим вероятность согласия  $P(y_n)$  теоретического и эмпирического распределений по табличным данным для вычисленного  $y_n$ . По значениям случайной величины  $y_n$  определим функцию  $P(y_n)$ , используя линейную интерполяцию. Если  $P(y_n) > 0,05$ , то условие согласия является удовлетворительным.



Таблица 4.  
Table 4

Значения показателей критерия Колмогорова  
*Kolmogorov criteria indicator values*

$y_n$	$P(y_n)$	$y_n$	$P(y_n)$	$y_n$	$P(y_n)$	$y_n$	$P(y_n)$
0,0	1,00000	0,8	0,5441	1,6	0,0120	2,4	0,000020
0,05	1,00000	0,85	0,4653	1,65	0,0086	2,45	0,000012
0,1	1,00000	0,9	0,3927	1,7	0,0062	2,5	0,0000075
0,15	1,00000	0,95	0,3275	1,75	0,0044	2,55	0,0000044
0,2	1,00000	1,0	0,2700	1,8	0,0031	2,6	0,0000026
0,25	1,00000	1,05	0,2202	1,85	0,0021	2,65	0,0000016
0,3	0,99999	1,1	0,1777	1,9	0,0015	2,7	0,0000010
0,35	0,9997	1,15	0,1420	1,95	0,0010	2,75	0,0000006
0,4	0,9972	1,2	0,1122	2,0	0,0007	2,8	0,0000003
0,45	0,9874	1,25	0,0879	2,05	0,0004	2,85	0,00000018
0,5	0,9639	1,3	0,0681	2,1	0,0003	2,9	0,00000010
0,55	0,9228	1,35	0,0522	2,15	0,0002	2,95	0,00000006
0,6	0,8643	1,4	0,0397	2,2	0,0001	3,0	0,00000003
0,65	0,7920	1,45	0,0298	2,25	0,0001		
0,7	0,7112	1,5	0,0222	2,3	0,0001		
0,75	0,6272	1,55	0,0164	2,35	0,000032		

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Рассчитаем расхождение результатов и случайную величину  $y$  для автоматических выключателей ВА51-35:

$$D_{1,2,3,4} = \max |0,000 - 0,000| = 0,000 \quad y_{1,2,3} = 0,000 \cdot \sqrt{217} = 0,000$$

$$D_5 = \max |0,004 - 0,001| = 0,003 \quad y_5 = 0,003 \cdot \sqrt{217} = 0,042$$

$$D_6 = \max |0,004 - 0,003| = 0,001 \quad y_6 = 0,001 \cdot \sqrt{217} = 0,014$$

В таблице 5 приведены результаты проверки параметров надежности для автоматических выключателей ВА51-35 по критерию Колмогорова.

Таблица 5  
Table 5

Результаты проверки параметров надежности для автоматических выключателей ВА51-35 по критерию Колмогорова

*Reliability test results for BA51-35 circuit breakers according to Kolmogorov criterion*

Время наблюд-я, $t$ , год	Экспериментальные результаты расчета	Теоретические результаты расчета	Расхождение $D_n = \max  F^*(x) - F(x) $	Случайная величина $y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $P(y_n)$
1	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
4	0,000	0,000	0,000	0,002	1,000
5	0,004	0,001	0,003	0,042	1,000
6	0,004	0,003	0,001	0,014	1,000
7	0,007	0,008	0,001	0,017	1,000
8	0,018	0,023	0,005	0,075	1,000
9	0,035	0,055	0,019	0,287	1,000
10	0,081	0,115	0,034	0,498	0,965
11	0,166	0,212	0,046	0,674	0,754
12	0,307	0,345	0,037	0,547	0,926
13	0,481	0,500	0,019	0,286	1,000
14	0,633	0,655	0,023	0,338	0,999
15	0,767	0,788	0,021	0,315	0,999

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Данные таблицы 4 показывают, что наименьшее значение функции  $P(y_n) = P(0,674) = 0,754$ . Остальные значения  $P(y_n) > 0,926$ , что является удовлетворительным условием ( $> 0,8$ ) для сравнения экспериментальных и теоретических результатов. Результаты вычислений подтверждают корректность выявления нормального закона распределения вероятностных характеристик исследуемого электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения.

Критерий Пирсона (или критерий  $\chi^2$ ) применяется для проверки гипотезы о соответствии теоретического и эмпирического распределения при большом объеме выборки ( $n \geq 100$ ). Данный метод не применим для проверки, так как используется при многопараметрических распределениях.

#### **Заключение**

В результате проведенных исследований на основании статистических данных эксплуатации параметров надежности электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения ряда предприятий г. Казани:

1. Определены эмпирические и теоретические зависимости изменения значений вероятности безотказной работы и появления отказа для низковольтного электрооборудования – силовых трансформаторов, автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов, проведено сравнение исследуемых показателей с данными ГОСТ.

2. Произведена проверка на соответствие закона распределения с использованием критерия Колмогорова.

#### **Литература**

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Шумихина О.А., Гибадуллин Р.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2021. №6.

2. Абрамкин Р.В. МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗЛА СВЯЗИ ПРИ ОТКАЗАХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12.

3. Атаев З.А. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КРЫМА // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. №1.

4. Афанасьев П.А., Ивахненко А.Г. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12.

5. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. ФАКТОР НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №6.

6. Виноградов А.В., Большев В.Е., Виноградова А.В., Бородин М.В., Букреев А.В. Техничко-экономические способы повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей // Вестник аграрной науки Дона. 2019. №47.

7. Грачева Е.И., Гиззатуллина Е.Е. Анализ надежности цеховых сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. №5-6.

8. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ, УСТАНОВЛЕННЫХ В ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ // Вестник МГТУ. 2020. №4.

9. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р., Серпионова Т.А. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей // Технические науки – от теории к практике. 2015. №12 (48).

10. Ившин И.В., Галаютдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф., Карпов Е.Н., Мельник Э.П. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 35/6(10) КВ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. №2.

11. Котеленко С.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12.

12. Луковенко А.С., Зеньков И.В. МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ // Вестник ИргТУ. 2021. №1 (156).

13. Макашова С.И., Пинчуков П.С. Расчет показателей надежности цифровой подстанции // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2019. №4.

14. Семенов Д.А. Повышение эксплуатационной надежности распределительных трансформаторов // Вестник НГИЭИ. 2011. №3 (4).

15. Тошходжаева М.И. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ (на примере г. Худжанда РТ) // Вестник ТГУПБП. 2015. №3.

16. Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследования показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №9-10.

17. M. Fotuhi-Firuzabad, S. Afshar, D. Farrokhzad and J. Choi, "Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks," 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South), 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922.

18. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, "Reliability analysis of electric distribution system," 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

19. S. Xiaoayan and X. Hangtian, "Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks," 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China, 2016, pp. 49-52, doi: 10.1109/ICEICT.2016.7879650.

#### **Авторы публикации**

**Петрова Рената Маратовна** – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

**Абдуллазянов Эдвард Юнусович** – ректор Казанского государственного энергетического университета.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

**Valtchev S** – профессор Университета NOVA в Лиссабоне, Португалия.

**Yousef Ibragim** – профессор Университета Федерации Австралии.

#### **References**

1. Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Tabachnikova T.V., Shumikhina O.A., Gibadullin R.R. STUDYing the Quality of Functioning of Low-Voltage Electric Apparatuses in the Structure of Electrical and Mechanical Complexes // Proceedings of Higher Education Institutions. Problems of Power Engineering. 2021. №6.

2. Abramkin R.V. Model of Functioning of Telecommunication Node during Failures of Electric Power Supply System Elements // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2021. №12.

3. Ataev Z.A. Reliability of Electricity Supply to Consumers in Crimea // Geopolitics and Eco-Geodynamics of Regions. 2022. №1.

4. Afanasyev P.A., Ivakhnenko A.G. VERIFICATION OF TESTING METHODS OF LOW-Voltage EQUIPMENT // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2021. №12.

5. V., Myshkina L.S. Reliability Factor in Distribution Grid Design // Izvestia Vuzov. Problems of power engineering. 2020. №6.

6. Vinogradov AV, Bolshev VE, Vinogradova AV, Borodin MV, Boukreev AV Technical and economic ways to improve the efficiency of power supply systems of rural consumers // Bulletin of Agricultural Science of the Don. 2019. №47.

7. Gracheva E. I., Gizzatullina E. E. Analysis of the reliability of shop-floor networks // Izvestia vuzov. Problems of power engineering. 2003. №5-6.

8. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. ALGORITHMS AND MODELS OF POWER LOSS IN AUTOMATIC OFF-STOPS SETTLED IN INDUSTRIAL NETWORKS // Vestnik MSTU. 2020. №4.

9. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R., Serpionova T.A. Modeling parameters of functional characteristics of workshop networks // Technical Sciences - from theory to practice. 2015. №12 (48).

10. Ivshin I.V., Galyautdinova A.R., Vladimirov O.V., Nizamiev M.F., Karpov E.N., Melnik E.P. INTELLECTUAL SYSTEM ASSESSMENT OF TECHNICAL STATUS OF TRANSMISSION SUBSTATION 35/6(10) KV // Proceedings of universities. Problems of Power Engineering. 2022. №2.

11. Kotelenko S.V. INTELLECTUAL SOLUTIONS OF LOW-WATER EQUIPMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2021. №12.

12. Lukovenko A.S., Zenkov I.V. RELIABILITY Calculation Methods of Electric Power Supply System // Bulletin of ISTU. 2021. №1 (156).

13. Makasheva, S.I., Pinchukov, P.S. Calculation of the reliability indices of the digital substation // Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering. 2019. №4.

14. Semenov, D.A. Increasing the operational reliability of distribution transformers // Bulletin of NRUEEI. 2011. №3 (4).

15. Toshkhojaeva M.I. Improvement of Reliability of Electric Power Supply System as a Factor of Sustainable Supply of Electric Power to National Economy (by Example of Khujand, RT) // Bulletin of TSUPBP. 2015. №3.

16. Fedotov A.I., Gracheva E.I., Naumov O.V. Investigation of failure-free indicators of low-voltage switching devices of electric networks // Izvestiya vuzov. Problems of Power Engineering. 2013. №9-10.

17. M. Fotuhi-Firuzabad, S. Afshar, D. Farrokhzad and J. Choi, "Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks," 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South), 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922.

18. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, "Reliability analysis of electric distribution system," 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

19. S. Xiaoyan and X. Hangtian, "Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks," 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China, 2016, pp. 49-52, doi: 10.1109/ICEICT.2016.7879650.

#### **Authors of the publication**

**Renata M. Petrova** – postgraduate student of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University.

**Edvard Yu. Abdullazyanov** – rector of Kazan State Power Engineering University.

**Elena I. Grachieva** – doctor of Technical Sciences, Professor of the University of Electric Power Industry, Kazan State Power Engineering University.

**Valtchev S** – professor, Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

**Yousef Ibragim** – professor, Federation University Australia.

**Получено** 22.02.2023г

**Отредактировано** 02.03.2023г

**Получено** 09.03.2023г

УДК 621.33

## О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РАСЧЕТАХ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Ившин И.В., Аухадеев А.Э., Ле К.Т.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*auhadeev.ae@kgeu.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В настоящей работе рассмотрены важные аспекты развития беспилотного городского общественного электрического транспорта. **ЦЕЛЬ.** Исследовать особенности применения нейронных сетей в расчетах рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта. **МЕТОДЫ.** В работе использованы результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования эксплуатационных режимов трамвайного транспорта, анализ которых позволил идентифицировать уровень и направленность стохастических связей эксплуатационных и энергетических параметров процесса движения и режимов работы тягового электрооборудования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Полученные корреляционные модели позволяют обосновать состав параметров входного и выходного слоя нейронных сетей, а также сформировать набор данных (dataset) для их обучения. Предложен алгоритм определения параметров рациональных режимов работы тягового электрооборудования при движении транспортного средства на заданном перегоне, реализованный с применением нейросетевых моделей на основе многослойного перцептрона. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные исследования показали, что применение в расчетах рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электротранспорта комплекса «простых» нейронных сетей позволяет обеспечить высокую скорость и точность вычислений.

**Ключевые слова:** городской электрический транспорт; беспилотный трамвай; тяговое электрооборудование; расчет рациональных режимов работы; нейронная сеть прямого распространения; многослойный перцептрон.

**Для цитирования:** Ившин И.В., Аухадеев А.Э., Ле К.Т. О применении нейронных сетей в расчетах рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С.106-116.

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN RATIONAL MODES CALCULATIONS OF TRACTION ELECTRIC EQUIPMENT OPERATION OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

IV. Ivshin, AE. Auhadeev, KT. Le

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*auhadeev.ae@kgeu.ru*

**Abstract:** *RELEVANCE.* This paper considers important aspects of the development of unmanned urban public electric transport. **THE PURPOSE.** Explore the peculiarities of neural networks application in the rational modes calculation of ground municipal electric transport. **METHODS** In this work are used results of computer modeling and experimental research of operational modes of tram transport are presented which analysis allowed to identify the level and direction of stochastic relationships of operational and energy parameters of the movement process and modes of traction electric equipment operation. **RESULTS.** The obtained correlation models make it possible to justify the composition of input and output parameters of neural networks as well as to form the dataset for their training. The algorithm of determination of traction electrical equipment rational operation modes parameters at the vehicle movement on a given distance, which is implemented using neural network models based on multilayer

*perceptron is presented. CONCLUSION. The conducted research has shown that the use of «simple» neural networks in calculations of rational modes in urban electric transport traction equipment allows for high speed and accuracy of calculations.*

**Key words:** *urban electric transport; unmanned tram; traction electric equipment; calculation of rational operation modes; forward distribution neural network; multilayer perceptron.*

**For citation:** Ivshin IV, Auhadeev AE, Le KT. *Application of neural networks in rational modes calculations of traction electric equipment operation of urban electric transport.* KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):106-116.

### **Введение**

В настоящее время Правительство РФ проводит активную политику, направленную на развитие городского электрического транспорта (ГЭТ). Разработана государственная программа «Развитие транспортной системы», утверждена «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», реализуются федеральные пилотные проекты и законодательные инициативы, направленные на развитие ГЭТ. В ряде городов России при государственном софинансировании региональных бюджетов началось обновление парка транспортных средств (ТС) предприятий ГЭТ [1, 2].

На отраслевых выставках отечественные производители (ПК «Транспортные системы», Усть-Катавский вагоностроительный завод (УКВЗ), ЗАО «Тролза», ОАО «Уралтрансмаш» и др.) представляют перспективные модели контактного ГЭТ с новым тяговым электрооборудованием (ТЭО), разработанные с учетом требований к повышению комфортности (плавный пуск и высокие динамические характеристики, повышенная автономность хода, низкопольность ТС и др.) и энергетической эффективности перевозок (снижение массы ТС, применение асинхронного электропривода, внедрение энергосберегающих систем управления тяговым приводом, систем рекуперации и др.).

Российские компании ПАО «ГАЗ», ОАО «ЛиАЗ», ПАО «КАМАЗ», Холдинг «БМГ» и др. активно налаживают производство автономного ГЭТ. Электробусы еще не массово, но уже участвуют в перевозке пассажиров в Новосибирске, Санкт-Петербурге, Владивостоке, Тюмени, Липецке, Сочи, Казани. В Москве в 2022 году эксплуатировалось уже свыше 1000 единиц электробусов КамАЗ-6282, ЛиАЗ-6274 и e-CITYMAX 18 более чем на 80 городских маршрутах [3].

Активная государственная поддержка развития ГЭТ направлена на предотвращение отставания технологического уровня производства от зарубежных аналогов, обеспечение снижения импорта готовых технических решений и поддержку отечественного производителя, что актуально, в том числе, и в связи с действием санкций со стороны ряда западных стран и реализуемых правительством РФ мер импортозамещающей политики [4]. В связи с этим отрасль ГЭТ остро нуждается в прорывных научных исследованиях фундаментального и прикладного характера по направлениям, связанным с разработкой перспективных видов электрической тяги, новых типов ТС и ТЭО, интеллектуальных систем управления и др.

Особое внимание уделяется развитию наукоемких технологий в области частично и полностью беспилотных транспортных средств, долю отечественных производителей в котором планируется вывести на уровень 60% к 2035 г. [5]. Активно ведутся разработки, связанные с беспилотным общественным электротранспортом [6]. Результаты разработок беспилотных электробусов уже демонстрировали ПАО «КАМАЗ» (КАМАЗ-1221 «ШАТЛ») и ООО «Волгабас Робо Лаб» (платформа «MatrEshka»). На 2022-2023 годы анонсированы запуски беспилотных трамваев в городах Москва, Санкт-Петербург, Казань. УКВЗ, входящий в состав госкорпорации «Роскосмос», объявил о начале сборки первого полностью беспилотного отечественного трамвая в конце 2022 года.

Системы беспилотного управления трамвайным транспортом на основе технологий искусственного интеллекта появились как следующий этап развития систем автоведения рельсового электроподвижного состава. Совершенствование технологий технического зрения, передачи данных и интеллектуального анализа информации на основе нейронных сетей позволяет полностью отказаться от водителя/машиниста, но требует существенного

повышения скорости сбора и обработки потоков данных о параметрах движения и точности расчетов режимов ведения ГЭТ.

Основными задачами систем беспилотного управления общественным транспортом является повышения качества пассажироперевозок при кардинальной минимизации ДТП и экономии энергоресурсов. Внедрение интеллектуального управления и контроля параметров движения позволяет реализовывать рациональные режимы работы ТЭО, определяющие эффективные режимы ведения ТС, что приводит к улучшению эксплуатационных показателей ГЭТ, а также существенной экономии электроэнергии, расходуемой на тягу [7, 8].

Расчеты энергоэффективных режимов работы ТЭО с применением нейронных сетей в настоящее время начали активно использоваться в тяговых расчетах железнодорожного транспорта, что позволило существенно повысить их точность и адекватность реальным условиям эксплуатации [9, 10 и др]. При этом применение полученных нейросетевых моделей для определения эффективных режимов ведения наземного рельсового ГЭТ предполагает возникновение ряда проблем, предопределяющих их невысокую эффективность. Это связано с принципиальным отличием режимов работы ТЭО, определяемых условиями эксплуатации ГЭТ, для которых характерны: короткие перегоны, а, следовательно, частые режимы тяги и торможения ТС; отсутствие движения ТС с установившейся скоростью; остановки на неконтролируемых перекрестках; большое количество участков с ограничением скорости и др.

Все вышесказанное определяет актуальность разработки и обучения нейросетевых моделей для определения рациональных режимов работы ТЭО, учитывающих специфику технологического и производственного процессов ГЭТ. При этом для определения эффективной архитектуры нейронной сети основными задачами являются подготовка набора данных (*dataset*), определяющих режимы работы ТЭО в условиях реальной эксплуатации ГЭТ, а также выбор и обоснование состава параметров входного и выходного слоев. Решению этих задач, посвящено исследование авторов в рамках выполняемой научной работы по развитию теории и методов расчета рациональных режимов работы ТЭО городского электрического транспорта.

#### **Материалы и методы**

В настоящее время выделяют<sup>1</sup> следующие режимы работы ТЭО, соответствующие режимам движения ТС (рис. 1): тяговый режим (с различным возбуждением тягового электродвигателя (ТЭД)) и режим торможения (электрический, рекуперативный, реостатный). Этим режимам соответствуют характерные режимы работы ТЭД, являющихся основным элементом ТЭО (рис. 1, а).

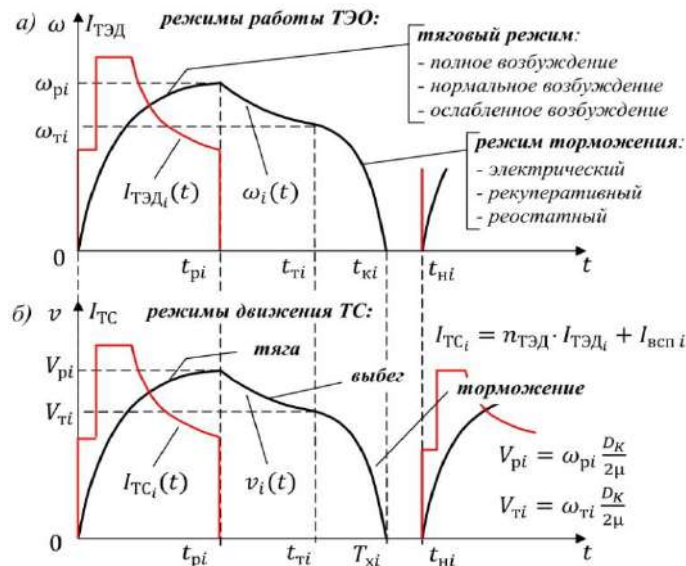
Также для ТЭД определяют<sup>2</sup> режимы работы: продолжительный ( $S_1$ ), кратковременный ( $S_2$ ) и повторно-кратковременный ( $S_3$ ). Особенностью эксплуатации ТС ГЭТ являются короткие перегоны и частые пуски ТЭД, а, следовательно, преобладание режимов  $S_2$  и  $S_3$ . Основными параметрами этих режимов является соотношение продолжительности режимов под нагрузкой (тяга или торможение) и без нагрузки (выбег или остановка) (рис. 1).

Таким образом, в качестве основных параметров, однозначно определяющих эксплуатационные характеристики режимов работы ТЭО целесообразно выбрать  $t_{pi}$ ,  $t_{ti}$ ,  $T_{xi}$ ,  $V_{pi}$ ,  $V_{ti}$  (рис. 1, а, б).

Для оценки энергетических показателей работы ТЭО в ходе исследования была выбрана величина удельного расхода электроэнергии (УРЭ)  $A_{уд}$ , кВт·ч/т·км, затрачиваемой на тягу ТС. Реализуемые при движении ТС на  $i$ -м перегоне заданной длины режимы работы ТЭО принимаются рациональными если УРЭ  $A_{уд\text{рац}}$  по значению меньше УРЭ, задаваемого в качестве нормы  $A_{удн}$  для данного участка пути.

<sup>1</sup> ГОСТ 19350–74. Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1975. - 26 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 2013. - 29 с.



$t_{pi}$ ,  $t_{Ti}$  – продолжительность тягового режима (разгона) и время начала торможения на  $i$ -м перегоне;  $V_{pi}$ ,  $V_{Ti}$  – максимальная скорость разгона и скорость начала торможения ТС на  $i$ -м перегоне;  $T_{xi}$  – время хода на  $i$ -м перегоне;  $v_i(t)$ ,  $I_{ТС_i}(t)$  – кривые скорости и потребляемого тока ТС;  $I_{ТЭД_i}(t)$  – ток потребляемый ТЭД;  $n_{ТЭД}$  - число ТЭД в составе ТЭО ТС;  $D_K$  – диаметр колеса ТС,  $\mu$  – коэффициент передачи редуктора

Рис. 1 Характерные для ГЭТ режимы работы ТЭО (а) и режимы движения ТС (б) во взаимосвязи *Fig. 1 - Typical for urban electric transport modes of traction electrical equipment (a) and modes of vehicle traffic (b) in relationship*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для определения эксплуатационных факторов, влияющих на режимы работы ТЭО, авторами предложена модель управляемого движения ТС, являющегося в общем случае результатом преобразования, передачи и использования электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ. При этом управляемое движение ТС рассматривается как реализация механической работы последовательности режимов ТЭО, заданных водителем в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ.

Данная модель основывается на концепции «уровней построения движения», используемой академиком Д.Е. Охочимским в динамике космического полета, робототехнике и мехатронике [11]. Сама же теория и понятие «построение движения» были предложены выдающимся биомехаником Н.А. Бернштейном при изучении организации работы мозга человека при его движении [12]. Такой подход соответствует общепринятым аналогиям, так, например, прототипом искусственной нейронной сети, являются биологические нейронные сети человеческого мозга. Теоретическое обоснование предложенной модели, а также ее математическая интерпретация представлена в серии работ [7, 13, 14].

### Результаты

На основании предложенной модели было проведено компьютерное моделирование режимов работы ТЭО с использованием детерминированных и стохастических моделей, характеризующих априорные данные о различных эксплуатационных факторах, таких, как: напряжение контактной сети  $U_{КС}$ , интервал следования ТС  $J$ , количество включения ТЭО на перегоне  $n_{вкл}$ , длина перегона  $L$ , масса ТС  $m_{ТС}$  и др. Это позволило идентифицировать с доверительной вероятностью 95% уровень и направленность стохастических связей эксплуатационных и энергетических параметров процесса управляемого движения ТС и режимов работы ТЭО. В ходе анализа результатов моделирования использовались методы корреляционно-регрессионного анализа, реализованных в прикладной компьютерной программе STATISTICA [15]. Для наглядности результаты представлены в виде графической корреляционной модели (плеяды) (рис. 2, а).



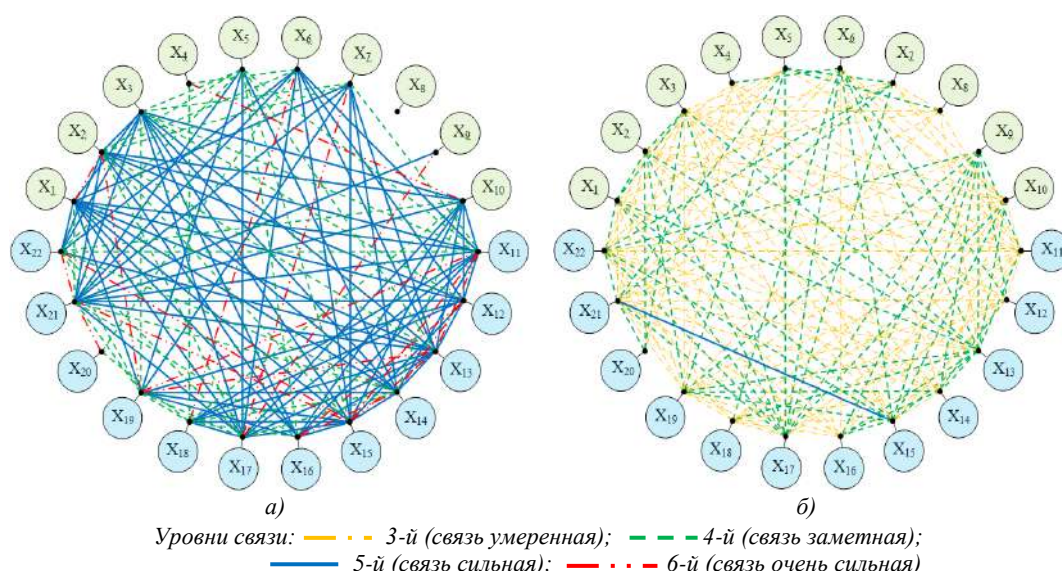


Рис. 2 Корреляционная модель уровней связи факторов, влияющих на формирование управляемого движения, полученная на основании предложенного алгоритма расчета (а) и в результате экспериментального исследования (б)

Fig. 2 - Correlation model of connection levels of factors affecting the formation of controlled motion, obtained on the basis of the proposed calculation algorithm (a) and as a result of the experimental study (b)

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Наименование факторов, характеризующих условия эксплуатации ТС и факторов, характеризующих режимы движения ТС и работы ТЭО представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Факторы, характеризующие процесс построения управляемого движения ТС  
Factors that characterize the process of building a controlled movement of the vehicle

факторы, характеризующие условия эксплуатации ТС		факторы, характеризующие процесс реализации управляемого движения	
X <sub>1</sub>	L - длина перегона	X <sub>11</sub>	a - ускорение разгона ТС
X <sub>2</sub>	T <sub>х</sub> - время хода на перегоне	X <sub>12</sub>	b - тормозное замедление ТС
X <sub>3</sub>	V <sub>с</sub> - скорость сообщения на перегоне	X <sub>13</sub>	V <sub>р</sub> - максимальная скорость разгона ТС
X <sub>4</sub>	J - интервал следования ТС	X <sub>14</sub>	V <sub>т</sub> - скорость начала торможения ТС
X <sub>5</sub>	k <sub>огр</sub> - коэффициент, учитывающий ограничения скорости на перегоне	X <sub>15</sub>	t <sub>р</sub> - время разгона* (тяговый режим) ТС
		X <sub>16</sub>	t <sub>т</sub> - время торможения* (тормозной режим) ТС
X <sub>6</sub>	ε <sub>ТС</sub> - коэффициент составности ТС	X <sub>17</sub>	n <sub>вкл</sub> - кол-во включений ТЭО на перегоне
X <sub>7</sub>	k <sub>с</sub> - коэффициент сложности перегона	X <sub>18</sub>	m <sub>ТС</sub> - масса ТС с пассажирами
X <sub>8</sub>	k <sub>ТС</sub> - коэффициент технического состояния транспортного средства	X <sub>19</sub>	η <sub>в</sub> = t <sub>в</sub> /T <sub>х</sub> - коэффициент выбега ТС, где t <sub>в</sub> - продолжительность выбега*
X <sub>9</sub>	k <sub>в</sub> - коэффициент, учитывающий качество вождения ТС	X <sub>20</sub>	t <sub>оп</sub> - продолжительность остановки ТС для посадки и/или высадки пассажиров
X <sub>10</sub>	k <sub>л</sub> - коэффициент, учитывающий отклонение напряжения в контактной сети от номинального значения	X <sub>21</sub>	τ <sub>уст</sub> - установившийся перегрев ТЭД
		X <sub>22</sub>	t <sub>пн</sub> - продолжительность режима постоянной нагрузки ТЭО ТС*

\*При многократных включениях ТЭО учитывается суммарная продолжительность работы в соответствующих режимах

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования были проведены экспериментальные исследования эксплуатационных режимов ТС в различных городах России (8 городов с типовыми схемами маршрутных систем: Москва, Казань, Самара,

Волгоград, Новочеркасск, Уфа, Пермь, Набережные Челны), что позволило получить репрезентативную статистическую выборку для параметров режимов работы ТЭО ТС, соответствующих технологическому процессу на действующих маршрутах в реальных производственных условиях ГЭТ [16, 17]. Дальнейший статистический анализ результатов экспериментального исследования позволил подтвердить наличие корреляционных связей между основными факторами, определяющими режимы эксплуатации ТС ГЭТ и параметрами режимов работы ТЭО. Результаты представлены в виде корреляционной плеяды (рис. 2, б).

Анализ корреляционных плеяд (рис. 2, а, б) показал, что некоторые статистические связи, определяющие влияние эксплуатационных факторов на параметры режимов работы ТЭО ГЭТ, выявленные на основе компьютерного моделирования в реальных эксплуатационных условиях проявляются слабее. Также по результатам эксперимента были выявлены связи, не выразившихся при компьютерном моделировании, которые оказывают влияние на режимы работы ТЭО. Все это позволило скорректировать предложенную математическую модель управляемого движения ТС, сформировать набор данных (*dataset*) для обучения искусственной нейронной сети, определяющей параметры рациональных режимов работы ТЭО, а также обосновать состав параметров входного и выходного слоя.

Проведенные исследования показали, что большие нейросетевые модели для определения параметров режимов работы ТЭО, учитывающие широкий комплекс эксплуатационных факторов, характеризуются сложной архитектурой и значительным количеством скрытых слоев и нейронов. Обладая широкими возможностями обработки информации, такие нейронные сети либо склонны к переобучению, либо требуют существенных временных и аппаратно-программных ресурсов. В связи с этим целесообразно использовать комплекс небольших нейросетевых моделей для решения частных (локальных) задач с ограниченным количеством факторов с возможностью их включения в общий (глобальный) алгоритм определения параметров рациональных режимов работы ТЭО.

Рассмотрим алгоритм определения рациональных режимов работы ТЭО для трамвайного вагона 71-619К при движении на перегоне заданной длины  $L$ . Для существенного упрощения алгоритма перекрестки и участки ограничения скорости на перегоне отсутствуют, план и профиль пути учитываются величиной эквивалентного уклона  $i_3, ‰$ , влияние таких факторов как отклонение напряжения в контактной сети, квалификация водителя, техническое состояние ТС и др. не учитывается.

Согласно действующим нормативным документам<sup>3</sup> при строительстве трамвайных линий расстояние между остановочными пунктами следует принимать: для обычных линий от 400 м до 600 м, для скоростных линий – от 800 м до 1200 м. Исследование реальных условий эксплуатации выявило, что наиболее вероятными для маршрутных систем ГЭТ являются длины перегонов в диапазоне от 300 м до 700 м (рис. 3). При этом число включений ТЭО на перегоне распределено в следующем соотношении:  $n_{\text{вкл}} = 1 - 32\%$ ;  $n_{\text{вкл}} = 2 - 46\%$ ;  $n_{\text{вкл}} = 3 - 17\%$ ;  $n_{\text{вкл}} \geq 4 - 5\%$ . Количество включений ТЭО на перегоне  $n_{\text{вкл}} \geq 4$  как правило связано с прохождением неконтролируемых перекрестков или участков с ограничением скорости и может не учитываться.

Таким образом, разработанный алгоритм реализуется на основании трех нейронных сетей для частных задач определения рациональных режимов работы ТЭО при числе включения  $n_{\text{вкл}}$  от 1 до 3 на перегоне заданной длины.

Выбор эффективной архитектуры нейронных сетей осуществляется с применением модуля *Automated Neural Networks* программы *STATISTICA* [15]. В качестве входных параметров для нейросетевой модели при  $n_{\text{вкл}} = 1$  были выбраны следующие эксплуатационные факторы: длина перегона  $L, м$ , время хода на перегоне  $T_x, с$ , масса ТС  $m_{\text{ТС}}, т$ , значение эквивалентного уклона перегона  $i_3, ‰$ . Выходом сети являются основные параметры режимов работы ТЭО при реализации одного включения на перегоне ( $n_{\text{вкл}} = 1$ ): продолжительность разгона (тяговый режим)  $t_{p1}, с$  при первом включении ТЭО; максимальная скорость разгона  $V_{p1}, км/ч$  при первом включении ТЭО; продолжительность торможения (режим торможения)  $t_t, с$ ; скорость начала торможения  $V_t, км/ч$ ; величина УРЭ  $A_{\text{уд}}, кВт \cdot ч / Т \cdot км$ . Обучающая выборка составляет 70 % значений, контрольная – 15%, тестовая – 15 % значений. В ходе исследования осуществляется эмпирический подбор и сравнение по критерию среднеквадратической ошибки.

<sup>3</sup> СНиП 2.05.09-90 Трамвайные и троллейбусные линии / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. - 40 с.

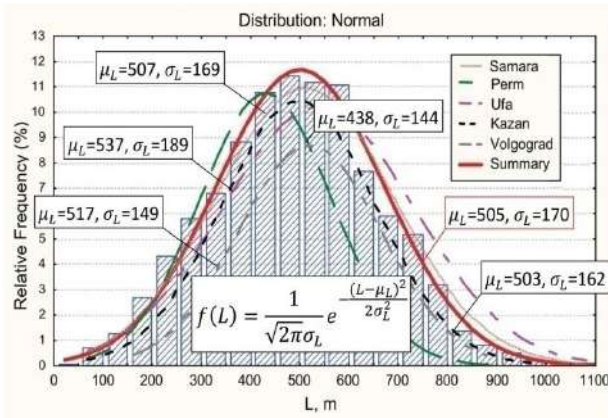


Рис. 3 Распределение значений длин перегонов *Fig. 3 - Distribution of lengths of runs L, m, typical for urban electric transport*

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.*

В результате исследования было установлено, что наиболее эффективной архитектурой обладает сеть MLP 4-11-5. Данная нейросетевая модель представляет собой многослойный персептрон, имеющий 4 нейрона на входном слое, 5 нейронов на выходном слое и 11 нейронов на одном скрытом слое. Активационная функция входного слоя – гиперболическая, выходного слоя – экспонента. Сеть имеет обучающую и контрольную производительность более 0,85, тестовую – более 0,82 (рис. 4, а).

Число и перечень входных параметров для нейросетевой модели для  $n_{\text{вкл}} = 2$  аналогичны предыдущей модели. Выходом сети кроме 5 параметров, используемых для модели при  $n_{\text{вкл}} = 1$ , являются: скорость начала второго включения ТЭО  $V_{\text{н2}}$ , продолжительность разгона  $t_{\text{р2}}$ ,  $c$  и максимальная скорость разгона  $V_{\text{р2}}$ , км/ч при втором включении ТЭО. Наиболее эффективной архитектурой в этом случае обладает сеть MLP 4-6-9-8, которая представляет собой многослойный персептрон, имеющий 4 нейрона на входном слое, 8 нейронов на выходном слое, 6 и 9 нейронов на первом и втором скрытых слоях соответственно. Модель имеет обучающую и контрольную производительность более 0,82, тестовую – более 0,80 (рис. 4, б).

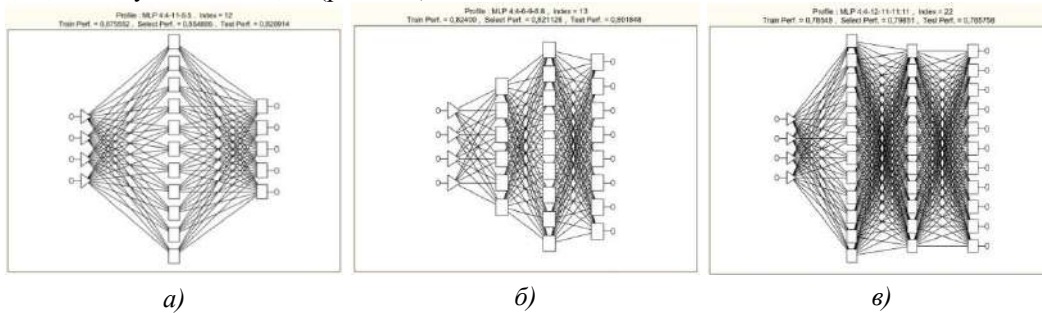


Рис. 4 Нейронные сети MLP 4-11-5 (а), MLP 4-6-9-8 (б), MLP 4-12-11-11 (в) *Fig. 2 - Neural networks MLP 4-11-5 (а), MLP 4-6-9-8 (б), MLP 4-12-11-11 (в)*

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.*

Аналогичным образом формируется число и перечень входных и выходных параметров для нейросетевой модели для  $n_{\text{вкл}} = 3$ . Выходом сети кроме 8 параметров, используемых для модели при  $n_{\text{вкл}} = 2$  являются:  $V_{\text{н3}}$ ,  $t_{\text{р3}}$ ,  $V_{\text{р3}}$ . Эффективной архитектурой в этом случае обладает сеть MLP 4-12-11-11, имеющей обучающую и контрольную производительность более 0,78, тестовую – более 0,76 (рис. 4, в).

Алгоритм определения рациональных режимов работы ТЭО для трамвайного вагона 71-619К при движении на перегоне заданной длины, реализованный с применением нейросетевых моделей на основе многослойного персептрона представлен на рисунке 5.

Предложенный алгоритм позволяет обеспечить высокую скорость и точность расчета, за счет использования комплекса «простых» нейронных сетей, учитывающих небольшое количество параметров. При этом согласно разработанному алгоритму (рис. 5.) чем выше сложность модели, тем меньше вероятность ее применения при расчете рациональных режимов работы ТЭО.

В общем случае количество нейросетевых моделей должно быть увеличено для учета большего числа эксплуатационных факторов, что сделает алгоритм расчета более сложным. Это потребует дополнительных вычислительных ресурсов, но при этом точность расчетов будет выше, чем в случае использовании больших нейронных сетей, имеющих сложную архитектуру и значительное количество скрытых слоев и нейронов, необходимых для учета широкого комплекса технологических и производственных параметров.

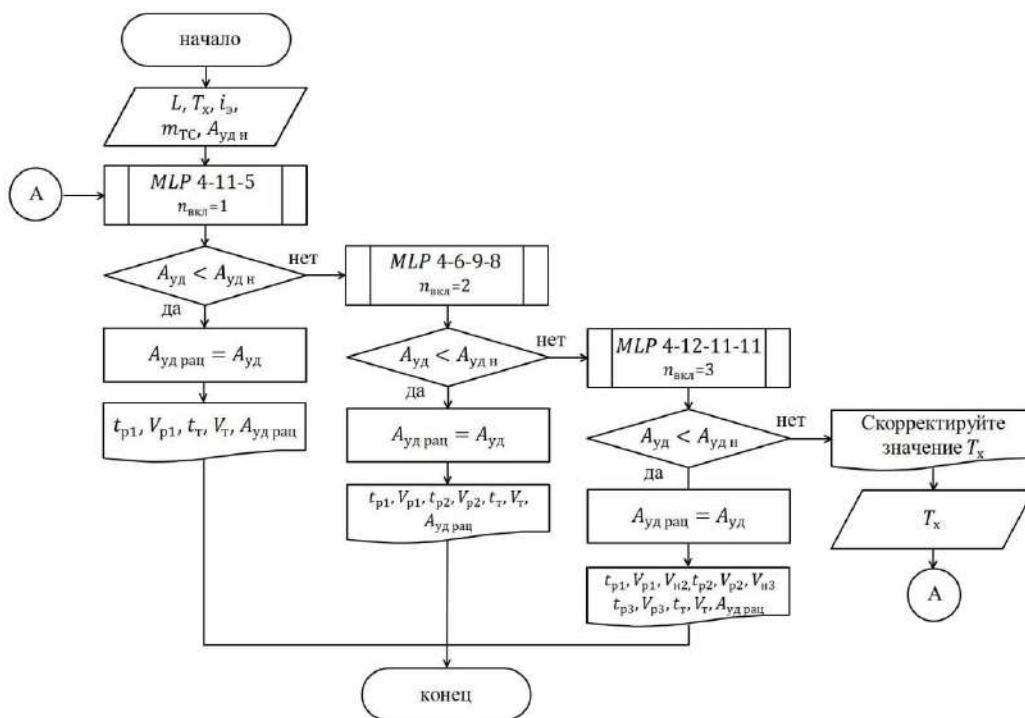


Рис. 5 Алгоритм определения параметров рациональных режимов работы ТЭО Fig. 5 - Algorithm for determining the parameters of rational modes of traction electrical equipment

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Особенностью модуля *Automated Neural Networks* программы *STATISTICA* является возможность создания исходного системного кода нейросетевой модели в виде файла на языках *C*, *C++*, *C#* или *Java* [15]. Это позволяет разработать комплекс нейронных сетей для различных частных случаев и интегрировать их системный код в общую программу расчета рациональных режимов работы ТЭО.

### Заклучение

Развитие отрасли беспилотного общественного ГЭТ определяет актуальность совершенствования и развития методов расчета рациональных режимов работы ТЭО эксплуатируемого парка ТС на основе технологий искусственного интеллекта. Активно применяемый при этом аппарат нейросетевого моделирования требует организации комплексного исследования процессов построения управляемого движения ГЭТ для обоснования эффективной архитектуры нейронных сетей и подготовки адекватного реальным условиям эксплуатации набора данных (*dataset*) для их обучения. Результаты проведенного компьютерного моделирования и экспериментального исследования позволили установить уровень и направленность стохастических связей эксплуатационных и энергетических параметров процесса управляемого движения ТС и режимов работы ТЭО, что дало возможность обосновать состав параметров входного и выходного слоя нейронных сетей и ограничить избыточность выборки обучающих данных.

Предложенный подход к применению нейронных сетей в расчетах рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ, реализованный на примере алгоритма, использующего комплекс «простых» нейросетевых моделей разного уровня сложности, позволяет повысить оперативность расчётов и их адекватность реальным эксплуатационным значениям.

### Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: [Утверждена распоряжением Правительства РФ 22 нояб. 2008 г. N 1734-р; по состоянию на

12 мая 2018 г.] [Электронный ресурс] Доступно по: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_82617/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/).

2. Стратегия развития автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (Проект) [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://www.mintrans.ru/file/413547>.

3. Тише, чище, быстрее: как электробусы за 5 лет «захватили» Москву - <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/elektrobus-po-stolichnomu/>

4. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 31 марта 2015 г. N 660 "Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли транспортного машиностроения Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/57427568/>. Ссылка активна на 01.02.2023.

5. Протокол заседания президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию от 16 мая 2016 года [Электронный ресурс]. URL: [www.ac.gov.ru/les/attachment/4843.pdf](http://www.ac.gov.ru/les/attachment/4843.pdf). Ссылка активна на: 06.02.2023.

6. Пролиско Е.Е, Шуть В.Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта // Математические методы в технике и технологиях. 2018. Т.9. С. 16–23.

7. Абдулхаков А.К., Павлов П.П., Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С. Особенности построения систем автоматизированного управления движением трамваев // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2021: сб. матер. Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2021. С. 20-25.

8. Rylov, Yu. A. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock / Yu. A. Rylov, A. E. Aukhadeev, S. I. Solovyeva, A. Yu. Korolkov // Modern Science. – 2017. – № 9. – P. 137–140.

9. Малахов С.В. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80. № 1. С. 13-19.

10. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (57). С. 33-41.

11. Платонов А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике // Прикладная механика и управление движением. М: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. С. 127–222.

12. Бернштейн Н.А. О построении движений. М: Медгиз, 1947. 234 с.

13. Аухадеев А.Э., Идиятуллин Р.Г., Киснеева Л.Н., Литвиненко Р.С., Залялов Р.Р., Павлов П.П., Аухадеев А.А. Программа расчета рациональных режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного состава при движении по заданному маршруту с учетом влияния эксплуатационных факторов: а.с. 2019618673 Рос. Федерация / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГЭУ». - № 2019617116; заявл. 18.06.2019; опубл. 03.07.2019.

14. Aukhadeev A., Idiyatullin R., Kisneeva L., et al. Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019, - V.643(1), - 012027.

15. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе СТАТИСТИКА. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 288 с. ISBN 978-5-9912-0326-5. – EDN SDSJFB.

16. Аухадеев А.Э., Идиятуллин Р.Г., Залялов Р.Р., Литвиненко Р.С., Сафиуллин Б.И., Аухадеев А.А., Рашитова Р.А. База данных основных энергетических и эксплуатационных характеристик производственного процесса трамвайного транспорта: а.с. 2020621735 Рос. Федерация / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». № 2020621618; заявл. 18.09.2020; опубл. 23.09.2020.

17. Аухадеев А.Э., Идиятуллин Р.Г., Залялов Р.Р., Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.А., Тухбатуллина Д.И. База данных основных энергетических и эксплуатационных характеристик производственного процесса троллейбусного транспорта: а.с. 2020621753 Рос. Федерация / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГЭУ». № 2020621617; заявл. 18.09.2020; опубл. 28.09.2020

### Авторы публикации

**Ившин Игорь Владимирович** – др. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, Казанский государственный энергетический университет.

**Аухадеев Авер Эрикович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Казанский государственный энергетический университет.

**Ле Кхак Тхинь** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. *Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda*. Available at: URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_82617/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/) Accessed to: 2 February 2023.
2. *Strategiya razvitiya avtomobil'nogo transporta i gorodskogo nazemnogo elektricheskogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda*. Available at: URL: <https://www.mintrans.ru/file/413547>. Accessed to: 3 February 2023.
3. *Tishe, chishche, bystree: kak elektrobussy za 5 let «zakhvatili» Moskvu*. Available at: <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/elektrobus-po-stolichnomu>. Accessed to: 29 January 2023.
4. *Prikaz Ministerstva promyshlennosti i torgovli RF ot 31 marta 2015 goda N 660 «Ob utverzhdenii plana meropriyatii po importozameshcheniyu v otrasli transportnogo mashinostroeniya Rossiiskoi Federatsii» (s izmeneniyami i dopolneniyami)* Available at: <https://base.garant.ru/57427568/> Accessed to: 1 February 2022.
5. *Protokol zasedaniya prezidiuma Soveta pri Prezidente RF po modernizatsii ekonomiki i innovatsionnomu razvitiyu ot 16 maya 2016 goda*. Available at: URL: [www.ac.gov.ru/les/attachment/4843.pdf](http://www.ac.gov.ru/les/attachment/4843.pdf). Accessed to: 2 August 2022.
6. Prolisko EE, Shut' VN. *Vozmozhnosti i perspektivy bespilotnogo gorodskogo obshchestvennogo transporta. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2018;9:16–23.
7. Abdulkhakov AK, Pavlov PP, Aukhadeev AE, et al. *Osobennosti postroeniya sistem avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem tramvaev*. Mezhdunarodnyi forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2021. Sbornik materialov [International forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2021. Collected papers]. Kazan, 2021, pp. 20–25.
8. Rylov YuA, Aukhadeev AE, Solovyeva SI, et al. *Experimental research of operating modes traction electric rolling stock*. *Modern Science*. 2017;9:137–140.
9. Malakhov SV, Kapustin MYu. *Metod postroeniya adaptivnogo suboptimal'nogo statsionarnogo regul'yatora dvizheniya poezda na osnove iskusstvennykh neuronnykh setei*. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2021;80(1):13–19.
10. Sivitskii DA. *Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neuronnykh setei na zheleznodorozhnom transporte*. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2021;2 (57):33–41.
11. Platonov AK. *O postroenii dvizhenii v ballistike i mekhatronike. Prikladnaya mekhanika i upravlenie dvizheniem*. Moscow, M.V. Keldysha Institute of Applied Mechanics Publ. 2010, pp. 127–222.
12. Bernshtein NA. *O postroenii dvizheni*. Moscow, Medgiz Publ., 1947, 234 p.
13. Aukhadeev AE, Idiyatullin RG, Kisneeva LN, et al. *Programma rascheta ratsional'nykh rezhimov raboty tyagovogo elektrooborudovaniya elektropodvizhnogo sostava pri dvizhenii po zadannomu marshrutu s uchetom vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov*. Patent RF, no. 2019618673, 2019.
14. Aukhadeev A, Idiyatullin R, Kisneeva L, et al. *Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, issue 643(1), 012027.
15. Borovikov VP. *Populyarnoe vvedenie v sovremennyy analiz dannykh v sisteme STATISTICA*. Moscow, Goryachaya liniya. Telekom Publ., 2013, 288 p.
16. Aukhadeev AE, Idiyatullin RG, Zalyalov RR, et al. *Baza dannykh osnovnykh energeticheskikh i ekspluatatsionnykh kharakteristik proizvodstvennogo protsessa tramvainogo transporta*. Patent RF, no. 2020621735, 2020.
17. Aukhadeev AE, Idiyatullin RG, Zalyalov RR, et al. *Baza dannykh osnovnykh energeticheskikh i ekspluatatsionnykh kharakteristik proizvodstvennogo protsessa trolleibusnogo transporta*. Patent RF, no. 2020621753, 2020.

**Authors of the publication**

*Igor' V. Ivshin* - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Aver E. Auhadeev* - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Thin K. Le* - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Получено*

*28.02.2023г*

*Отредактировано*

*07.03.2023г*

*Принято*

*14.03.2023г.*

УДК 621.18

## PREDICTION OF TAR FORMATION IN A BIOMASS HEATING BOILER

Ion V. Ion, Răzvan Mahu, Florin Popescu, Gabriel Mocanu, Robert Chivu  
«Dunarea de Jos» University of Galati, Romania

**Abstract:** THE RELEVANCE of this study is the issue of predicting the formation of resin in a biomass heating boiler. THE PURPOSE. Biomass is an important source of energy, especially in the field of heating. The thermochemical decomposition of biomass is accompanied by the formation of tar, a product present in the combustion gases, which condenses upon cooling the gases forming, together with the entrained ash, deposits on the convective surfaces of the boiler. These deposits reduce the overall heat transfer coefficient and lead to corrosion of the metal surfaces. This work aimed to analyze the influence of the operating regime of a boiler on the generation of tar. Tar formation depends, in addition to the type of biomass, on the operating conditions of the boiler. METHODS. In order to analyze the formation of tar, modeling and numerical simulation of biomass combustion (briquettes from a mixture of sawdust and agricultural residues) in a downdraft combustion boiler was used. RESULTS. The model developed for biomass combustion was tested and validated by using the experimentally obtained results. The measurements for temperatures and carbon monoxide concentrations in the two combustion chambers of the boiler were used to calibrate the model. CONCLUSION. The results of the simulation showed that with the reduction of the excess air in the boiler, the tar concentration also decreased. This result is consistent with the results obtained by other authors at biomass gasification. The developed model was designed to be used for any thermochemical decomposition process of biomass.

**Keyword:** prediction; tar formation; biomass; boiler; calibrate the model.

**For citation:** Ion V. Ion, Răzvan Mahu, Florin Popescu, Gabriel Mocanu, Robert Chivu. Prediction of tar formation in a biomass heating boiler. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):117-124.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СМОЛЫ В КОТЛЕ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ

Ион В. Ион, Рэзван Маху, Флорин Попеску, Габриэль Мокану, Роберт Чиву  
Университет Галати, Румыния

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ настоящего исследования заключается в прогнозировании образования смолы в котле для отопления биомассы. ЦЕЛЬ. Биомасса является важным источником энергии, особенно в области отопления. Термохимическое разложение биомассы сопровождается образованием дегтя - продукта, присутствующего в газах сгорания, который конденсируется при охлаждении газов, образующих, вместе с осадками осадения на конвективных поверхностях котла. Эти отложения снижают общий коэффициент теплопередачи и приводят к коррозии металлических поверхностей. Целью данной работы является анализ влияния режима работы котла на образование смолы. Образование смолы зависит, помимо типа биомассы, от условий эксплуатации котла. МЕТОДЫ. Для анализа образования смолы использовалось моделирование и численное моделирование сжигания биомассы (брикеты из смеси опилок и сельскохозяйственных отходов) в котле для сжигания с нисходящим уровнем. РЕЗУЛЬТАТЫ. Модель, разработанная для сжигания биомассы, была испытана и проверена с использованием результатов, полученных в экспериментальном порядке. Для калибровки модели использовались измерения температуры и концентраций окиси углерода в двух камерах сгорания котла. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты моделирования показали, что с уменьшением избыточного воздуха в котле концентрация дегтя также снизилась. Этот результат согласуется с результатами, полученными другими авторами при газификации биомассы. Разработанная модель предназначена для использования в процессе термохимического разложения биомассы.



**Ключевые слова:** прогнозирование; образование смолы; биомасса; котел; калибровка модели.

**Для цитирования:** Ион В. Ион, Рэзван Маху, Флорин Попеску, Габриэль Мокану, Роберт Чиву. Прогнозирование образования смолы в котле для отопления биомассы // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 117-124.

### *Introduction and literature review*

Biomass continues to be the main source of renewable energy in the EU, with a share of almost 60%. The largest application of biomass is the heating and cooling sector, which uses approximately 75% of all biomass. Forestry is the main source of biomass used for energy (forest residues, wood processing residues, firewood, etc.), representing more than 60% of all EU domestic biomass supplied for energy purposes. Almost 27% of biomass comes from agricultural biomass (agricultural crops and agricultural by-products), the remaining 13% being covered by waste (municipal, industrial, etc.) [1]. In the European Commission's long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy is estimated that, by 2050, the gross domestic biomass consumption will amount to (170 - 252) Mтep. There are significant opportunities for increasing the use of agricultural residues and by-products as well as waste [2].

Compared to coal, biomass has a lower calorific value and a higher content of moisture, volatile matter and ash. The high content of moisture and ash creates problems in the thermochemical conversion processes (combustion, gasification, pyrolysis) of biomass, such as the high production of tar and ash that have the effect of harmful gas emissions, slagging and fouling with decrease of boiler performance [3, 4, 5].

Slagging deposits are formed through ash melting and sintering in the area with the highest temperature of the combustion chamber. Fouling deposits are formed in the convective part of the boiler by condensation of volatile species, especially tar [6, 7].

Direct burning of biomass is considered the most complex thermochemical decomposition process, involving drying, pyrolysis and gasification. During pyrolysis, the biomass components cellulose, hemicellulose and lignin are broken down into char, combustible gas and tar. Tar is a by-product of thermal conversion and is a very viscous liquid, consisting of hydrocarbons, oxygen-containing compounds, derivatives of phenol, free fatty acids, and esters of fatty acids. The formation (quantity and composition) of tar depends on the type of biomass, boiler design and operation. Because its dew point is high, it condenses and forms deposits on the cooler surfaces of the boiler, worsening heat exchange and damaging the boiler surfaces. Studies conducted in [4] shows that a tar deposition of 1 mm decreases the thermal efficiency of a wood pellet boiler by 7,26%.

The reduction of tar concentration in a boiler can be obtained by pre-treatment of the biomass (modification of the physico-chemical properties and addition of additives), addition of additives during combustion or by modifications to the boiler [5]. The use of dolomite or lime during biomass combustion leads to increased deposits because the additive also forms deposits. On the other hand, the addition of 1% dolomite and 1% lime to wood pellets leads to a reduction of tar deposits by approximately 82% of the layer thickness and 76% of mass reported to the surface. This reduction is explained by improving the properties of the pellets: particle density, bulk density, mechanical durability, and Low Heating Value and by increasing the temperature in different points in the combustion chamber of the boiler. The addition of 2% lime to pellets increases their production price by 14% [5].

The main purpose of this research is to better understand the tar formation mechanism and to find the operating regime that leads to the minimization of tar production during biomass combustion in a boiler. As operating conditions greatly influence the boiler performance it appears that optimization could provide a means of significantly improving existing systems at a lower initial outlay. When used carefully in conjunction with experiments, Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling is a powerful tool in the optimization process, enabling the modeling of fluid flows, heat transfer and emissions in a boiler. It provides cost-effective help in optimizing existing boilers as well as new ones. However, this is not easy to do, and successful modeling of a low power boiler requires adequate submodels to simulate all the important combustion processes, flow and heat/mass transfer processes and their interactions. The complexity of these models affects the computation time and accuracy of the modeling results differently.

*Factors that influence the thermal decomposition of biomass*

The transformations that take place during the thermal decomposition of biomass are influenced both by the physical and chemical properties (initial moisture, biomass composition, inorganic matter content, density, thermal conductivity, specific heat, particle size and shape), and by the operating conditions (temperature, heating rate, pressure) [8-14].

#### **Materials and Methods. Moisture content**

The percentage of water initially present in the biomass affects the temperature evolution in the mass of the particle primarily due to the energy absorbed through evaporation. Disregarding this aspect in the modeling and simulation of biomass combustion leads to the overestimation of the temperature in the numerical solution, with all the negative consequences it entails (wrong estimation of the decomposition rate, conversion time, composition of volatiles, fractions of decomposition products, etc.). In the case of the dominant conductive heat transfer regime (larger particles) and at initial moisture levels of (15–20)%, or even higher, corresponding to naturally dry biomass, water evaporation occurs slowly, from the outside to the inside, continuously influencing the thermal decomposition process. Moreover, the heat transport in the mass of the particle also takes place through the water vapor that diffuses from the outer, warmer layers to the inner, colder ones, where it condenses. It should also be mentioned that water vapor has a reducing effect on char (gasification), but the reaction rate is much lower than in the case of oxidation (approx. an order of magnitude).

#### *Composition*

Obviously, the composition of biomass determines the fractions and compositions of the thermal decomposition products. Cellulose, hemicellulose and lignin break down differently, as found in experimental research, and the simple fact that there is a non-negligible variability between the proportions of the three main components of biomass, related to its origin, leads to the possibility of changing the proportions of the possible products following thermal degradation. Adding the fact that the very compositions of hemicellulose and lignin (cellulose practically does not depend on the biomass source) are not very clearly established, being able to differ more or less between the various types of biomass, the problem becomes even more complicated. However, some generally valid characteristics can be highlighted [9]. Regarding the char, the thermal decomposition of cellulose under medium-fast pyrolysis conditions (typical conditions for combustion installations) generates a small amount of char, at temperatures of (400–500)°C, the mass fraction of char being approx. (5–10) %, and at high temperatures (above 650°C) practically no solid residue remains. At the opposite pole is lignin, for which low temperatures fully favor the formation of char, with fractions of more than 60% solid residue, and even raising the temperature above 700°C, the amount of residue can reach 20%. Hemicellulose exhibits intermediate properties, with a percentage of fixed carbon at 600°C of approx. 7.5%.

The composition of the tar varies quite a lot between the biomass components, cellulose and hemicellulose producing condensable volatile fractions that mostly contain simple depolymerization products (levoglucosan, xylose) but also products resulting from the dehydration of the former (loss of one or more water molecules from the chemical structure initial, such as: dianhydroxylopyranose, furfural, etc.). Tar derived from lignin contain large amounts of phenol derivatives and aromatic compounds. It should be mentioned, however, that, depending on the thermal conditions, there are certain common pyrolysis products with low molecular weight, which appear in appreciable quantities especially at higher temperatures, being the result of the successive decomposition of the monomers. Representative examples would be: acetol, acetic acid, formic acid, acetaldehyde, furaldehyde, etc.

The gases resulting from the pyrolysis of the three main components of biomass do not differ essentially, the dominant chemical species being carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), water (H<sub>2</sub>O) and, in smaller quantities, carbon monoxide (CO).

#### *Inorganic fraction*

A large part of the experimental studies carried out for the characterization of the thermal decomposition of the biomass components (cellulose - CL, hemicellulose - HCL and lignin - LG) used fractions isolated and extracted by specific methods from various plant sources, and subsequently purified. However, there have also been studies on the effects that the inclusion of inorganic salts can have on the way decomposition occurs, and the conclusions of the studies indicate that, on the one hand, lignin seems to be practically insensitive to their presence, but on the other the other side, both cellulose and hemicellulose, are significantly affected [9].

Although the exact mechanism by which mineral salts intervene in the decomposition of biomass is not fully clarified, their catalytic effect has been well highlighted. Thus, in the case of cellulose [9], an increase in the char fraction was observed from approx. 5% to 18% by using potassium salts (KCl, 1%), under similar conditions, and the slight reduction of the tar fraction and the increase of the gas fraction respectively, but the most obvious effect was the reduction of the

levoglucosan percentage (from 60 to 20% in the case of initially pure cellulose), the main component of cellulosic tar, respectively the corresponding increase in its decomposition products (acetic acid, glycolic aldehyde, etc.). For hemicellulose, all inorganic salts had the effect of increasing the fractions of CO<sub>2</sub> and char, with the reduction of species with lower molecular weight in the tar composition. In conclusion, inorganic salts present a catalyzing effect of decomposition reactions, generally favoring the production of char and/or gas at the expense of tar production. The intensity of this effect, however, depends on the origin and composition of the biomass [10], as can be seen from Figure 1.

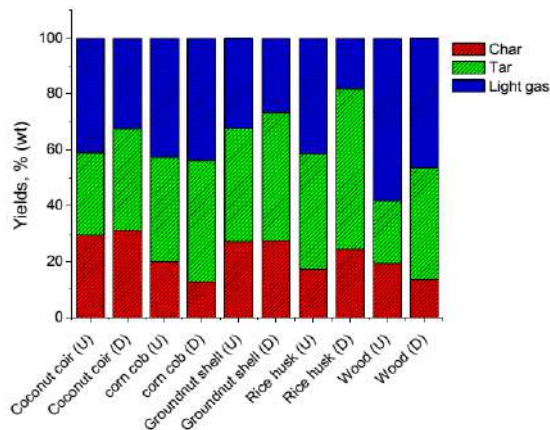


Fig. 1. The effect of inorganic salts on the thermal decomposition of biomass [10] (U = untreated biomass, D = demineralized biomass) Рис. 1. Влияние неорганических солей на термическое разложение биомассы [10] (U = необработанная биомасса, D = деминерализованная биомасса)

\*Source: compiled by the author

#### Physical properties, temperature and heating rate

Among the physical properties of biomass, the most important, respectively those that have been proven to have the greatest influence on the way in which the thermal decomposition takes place, are the apparent density and the effective thermal conductivity [11, 12]. Concretely, for example, it is known that the thermal decomposition of hardwood is different from that of softwood, the latter being characterized by an easy ignition and a much higher combustion rate, a reduced amount of char, etc., which limits its use as such in applications involving combustion. However, by chopping and subsequently pelletizing or briquetting the soft essence wood (respectively by reducing the porosity and, implicitly, increasing the apparent density) it is possible to obtain thermal performance close to those encountered with hard essences. Regarding the thermal conductivity, this parameter particularly affects the decomposition of the char. Temperature and heating rate are largely interdependent. For the case of biomass combustion, the thermal regime is usually severe, i.e. the temperatures reached are quite high (over 1000°C), and the heating rate can reach values of the order of 1000 degrees/min for particles of small size (< 1 cm). The main effect of increasing the temperature and heating rate under pyrolysis conditions is the reduction of the char fraction and the biomass conversion time. Tar fractions generally show (for all biomass components, CL, HCL and LG) increasing trends with temperature, but only up to certain values (450–550°C), beyond which thermal cracking of the various tar components occurs and respectively the reduction of the total fraction. Emissions of non-condensable volatile fractions increase with temperature, especially due to the decomposition of tar. However, these effects also depend on the residence time of the volatiles in the high temperature area, of course referring strictly to pyrolysis. In general, it was found that in the combustion process of most types of biomass of technical interest (composition, shape and dimensions), the drying and volatilization stages of the biomass are controlled by the thermal regime, while the oxidation of the carbonaceous residue is dependent on mass transfer from biomass to the outside [13].

#### Shape and dimensions of the biomass

The effect of biomass particle sizes on the characteristics of the thermal decomposition process has been investigated in numerous experimental studies. Their results demonstrated the existence of two distinct thermal regimes, differentiated by the Biot number (Bi), which represents the ratio between the intensity of the convective heat transfer on the outside of the particle and the conductive on the inside. At numbers  $Bi \ll 1$ , the thermal resistance inside the particle is reduced compared to the resistance to heat transfer on the outer surface, so the particle is in a convective thermal regime (thermally-thin particle), and for numbers  $Bi > 1$ , the situation reverses, the particle

being in a thermally conductive regime (thermally-thick particle). In the convective thermal regime, the internal temperature of the biomass particle is practically uniform, a much simpler case to model mathematically. Practically, only small-sized particles (< 1 mm) subjected to a severe thermal load (combustion, fluidized bed regime) fulfill this condition. In the rest, the existence of the thermal gradient inside the particle, i.e. the thermally conductive regime, reduces the decomposition rate due to the reduction of the thermal load of the inner layers, to which is added the effect of the reduction of the thermal conductivity in the outer layers with the formation of the char.

For large particles, the residence time of volatiles is another parameter that plays an important role. The longer the residence time, the more the secondary reactions of the volatiles change their composition upon leaving the particle. These secondary reactions are, on the one hand, thermal cracking (the breaking of large molecules into molecules of smaller mass), and on the other hand, decompositions catalyzed by both the presence of inorganic salts and the char, favoring formation of char. However, this effect is partially counterbalanced by the increase in the efficiency of char gasification, especially due to the water vapor.

Most theoretical studies on the thermal decomposition of biomass and its components have used regular geometric shapes, such as the sphere, cylinder or rectangular parallelepiped. In the case of irregular shapes, most of the time the approximation of the particle with a sphere of equivalent diameter was resorted to, primarily due to the simplicity of the mathematical formulations resulting from the use of this shape. Experimentally, it was found that for a series of particles with different shapes but with the same volume, the minimum decomposition rate corresponds to the shape with the minimum external surface, respectively the spherical shape [14]. In the convective thermal regime, however, the shape of the particle plays a reduced role, the conversion time being almost the same [15].

#### *Prediction of tar formation in a downdraft biomass boiler*

For the study of tar generation during biomass combustion, the numerical combustion model developed in [16, 17] was used. The numerical model is made of a static component, namely the chemical kinetic model and a dynamic component, the implementation function assembly (UDF) plus numerical CFD model. The chemical kinetic-model aims to generate some functions for the numerical representation of all quantities needed in the dynamic model, whose only parameter is temperature. The independent character of the representation of the quantities of the mathematical model conferred by these functions leads to the great simplification of their implementation in the external function. Due to the differentiation by biomass components (cellulose, hemicellulose, lignin) based on the hypothesis of superposition of effects, the determined functions have a unique form, invariable when changing the type of biomass. This aspect attributes to the numerical model a particularly valuable property, namely the possibility to represent through a combination of all individual functions any type of biomass for which the mass fractions of the initial components (main components + ash and moisture) and the density are known.

The study was carried out on a 40 kW downdraft (or two-stage) combustion boiler, fed with briquettes made from a mixture of hardwood sawdust and ground agricultural residues. The characteristics of the briquettes, the characteristics of the boiler and the CAD model of the boiler are presented in [18-22].

The discretization grid is finer for the air intake channels and for the briquettes. The briquettes in number of 7 were placed transversely in the upper chamber and were shaped as cylinders with a diameter of 70 mm and a length of 320 mm. The total weight of the briquettes was 6,44 kg.

The CFD program was checked and validated using the experimental measurements made on the boiler, more precisely the measured values of the temperature in the two combustion chambers and the concentration of carbon monoxide in the two combustion chambers. Figures 2 and 3 show the evolution over time of temperature and CO concentration. The simulation was done for the first 20 minutes after the cold start of the boiler. This is indicated by the fact that the temperature in the combustion chambers at the time of fuel ignition is equal to that of the air introduced into the boiler. Experimental measurements were performed only after the first 10 minutes after the start-up. One can observe close proximity between the estimated and measured values, but also some overlapping of the variation trend.

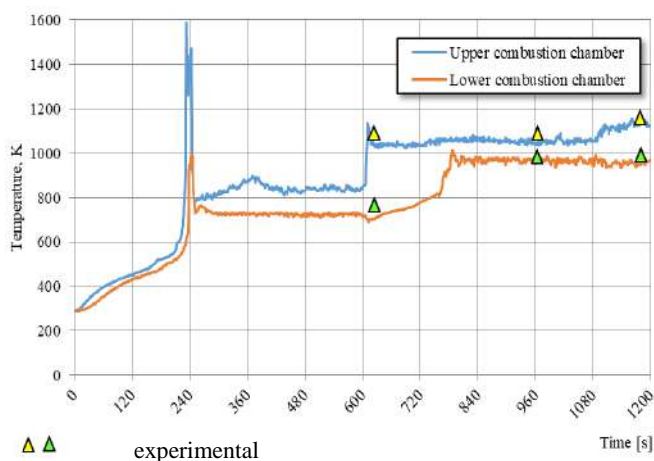


Fig. 2. Comparison between estimated and measured temperature values in the boiler combustion chambers.

Рис. 2. Сравнение расчетных и измеренных значений температуры в камерах сгорания котла.

\*Source: compiled by the author

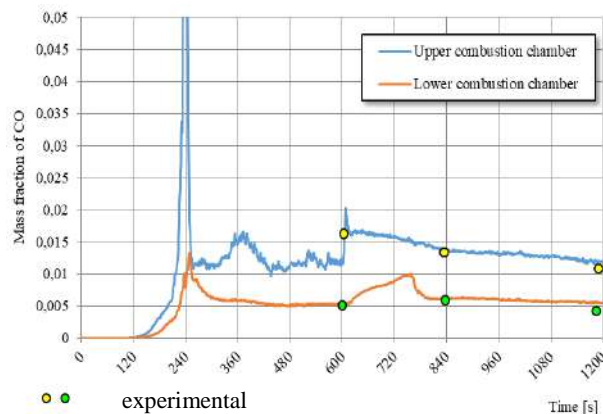


Fig. 3. Comparison between estimated and measured values of CO concentration

Рис. 3. Сравнение расчетных и измеренных значений концентрации CO

\*Source: compiled by the authors

**Results and discussions**

In order to find out the influence of the boiler operating regime on the combustion process and tar formation, two combustion regimes were simulated: combustion with normal air flow (0.04 kg/s) and combustion with reduced air flow (0.02 kg/s). Part of the simulation results (turbulence intensity, flow velocity, distribution of CO, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> concentrations) are presented in [18, 22]. The temperature distribution in the boiler and the tar concentration for the two combustion regimes are presented in Figures 4 and 5, respectively. With their help, the characteristics of the combustion process in the two cases can be compared.

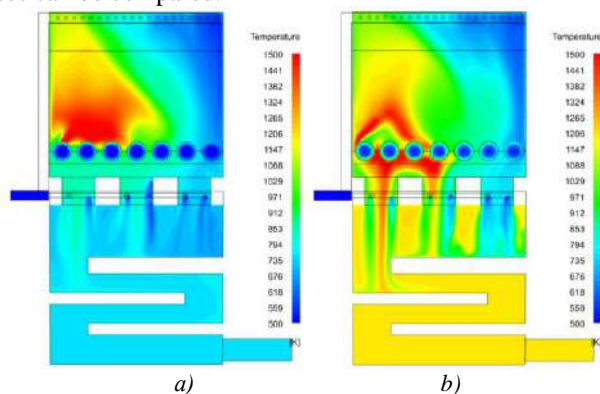


Fig. 4. Temperature distribution in the median longitudinal section, at air flow = 100% (a) and at air flow = 50% (b).

Рис. 4. Распределение температуры в среднем продольном сечении при расходе воздуха = 100% (a) и при расходе воздуха = 50% (б).

\*Source: compiled by the author

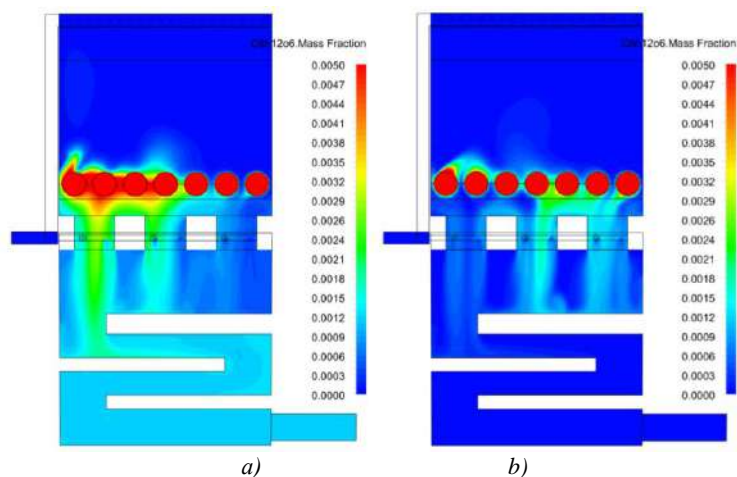


Fig. 5. Distribution of tar in the median longitudinal section, at air flow = 100% (a) and at air flow = 50% (b).  
 Рис. 5. Распределение смолы в среднем продольном сечении при расходе воздуха = 100% (a) и при расходе воздуха = 50% (б).

\*Source: compiled by the author

It is noticeable the incomplete decomposition of the tar for the normal air flow, the tar produced on the lower part of the briquettes passing into the secondary chamber, where, due to lower temperatures, it does not burn and is evacuated to the chimney. At low flow, the tar fraction at the exit is almost zero. However, it must be remembered that, in the absence of heat transfer to the outside, the temperature of the combustion gases in the convective system is much higher than in reality, which favors the decomposition of the tar.

The results obtained from the combustion simulation are in agreement with those obtained in the work [23], in which the influence of the type of biomass and the air flow on the performance of a gasifier was studied and it was found that, for all types of biomass studied, the reduction of the flow of air leads to the reduction of the formation of tar species.

### Conclusions

The ability of CFD to encompass combustion parameters makes it an indispensable and accessible tool in the optimization of combustion processes. The results of the calculations obtained in the present study are particularly valuable, given the fact that under the given conditions, this is the only method at hand for carrying out detailed research, with a level of information detail inaccessible to experimental methods. The comparison of some calculated quantities, for example carbon monoxide or carbon dioxide emissions, the oxygen concentration in the combustion gases, or the temperature values in the combustion chambers, with the experimental measurements, demonstrates the ability of the developed model to estimate the phenomenon as a whole. A feature of the developed model consists in the ability to calculate, in addition to the chemical composition of the primary gas mixture resulting from the decomposition of biomass, and the composition of the secondary gas mixture resulting from the thermal decomposition of tar.

The application of the model to biomass combustion in a downdraft boiler, with a power of 40 kW, allowed highlighting the influence of the boiler's operating regime on tar formation. Reducing the combustion air flow leads to reduced tar formation. This is in agreement with the results obtained by other authors.

### References

1. European Commission. Joint Research Centre. *Brief on biomass for energy in the European Union*, Publications Office. 2019. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/546943>.
2. Scarla N, Dallemand J, Taylor N, et al. *Brief on biomass for energy in the European Union*. Sanchez L.J., Avraamides M. editor(s). Publications Office of the European Union. Luxembourg. 2019.
3. Luis MR, Raquel G. Fouling control in biomass boilers. *Biomass and bioenergy*. 2009;(33):854 – 861
4. Seung HE, Sagar K, Yun SC, et al. A study on the effect of tar fouled on thermal efficiency of a wood pellet boiler: A performance analysis and simulation using Computation Fluid Dynamics. *Energy*. 2016;(103):305-312.
5. Sagar K, Seung HE, Lahoon C, et al. Tar fouling reduction in wood pellet boiler using additives and study the effects of additives on the characteristics of pellets. *Energy*. 2017;(129): 79-85.

6. Tortosa-Masiá AA, et al. Slagging and Fouling in Biomass Co-Combustion, *Thermal Science*. 2005;9 (3):85 -98.
7. Couch G. *Understanding slagging and fouling during pf combustion*. IEA Coal Research. No. IEZCR/72. 1994.
8. Donskoy IG. Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):107-117. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117>.
9. Islamova SI, Vachagina EK. Study of energy conversion efficiency at thermal utilization of wood biomass. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(9-10):3-11.<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-09-10-3-11>.
10. Patwardhan PR. *Understanding the product distribution from biomass fast pyrolysis*. PhD Thesis. Iowa State University. 2010.
11. Raveendran K. et al., Influence of Mineral Matter on Biomass Pyrolysis Characteristics. *Fuel*. 1995;74(12):1812-1822.
12. Miller RS, Bellan J. Analysis of Reaction Products and Conversion Time in the Pyrolysis of Cellulose and Wood Particles. *Combustion Science and Technology*. 1996;(119):331-373.
13. Di Blasi C. Influences of Physical Properties on Biomass Devolatilization Characteristics. *Fuel*. 1997;(76):957-964.
14. Baxter LL, Robinson AL. *Engineering Models of Biomass Combustion Processes*. Biomass for Energy and Industry. 1st World Conference and Technology Exhibition. Seville, Spain, 2000.
15. Lu H. *Experimental and Modeling Investigations of Biomass Particle Combustion*. PhD Thesis. Brigham Young University. Provo, UT, US. 2006.
16. Janse A.M.C. et al., *Modelling of Flash Pyrolysis of a Single Wood Particle*, *Chemical Engineering and Processing*. 2009;(39):239-252.
17. Ion VI, Popescu F, Mahu R. A Numerical Model of Biomass Combustion Physical and Chemical Processes. *Energies*. 202;14(7):1978. <https://doi.org/10.3390/en14071978>
18. Mahu R, Popescu F, Ion VI, *Numerical simulation of biomass combustion in a downdraft boiler*, The Annals of «Dunărea de Jos» University of Galați Fascicle V, *Technologies in Machine Building*. 2014, p. 37-40.
19. Mahu R, Ion VI, Popescu F. *Testing of improved boiler for biomass briquettes*. *Proceedings of the 41 International Symposium on Agricultural Engine - Actual Tasks on Agricultural Engineering*, 25-28th February 2013, Opatija, Croatia, p. 336-342. [http://atae.agr.hr/Zbornik\\_2013.pdf](http://atae.agr.hr/Zbornik_2013.pdf)
20. Ciocea Gh, Panait T, Ion VI, et al. *Combustion performance of a reverse combustion boiler firing various agricultural residues*. The 5th International Conference on Biomass for Energy. 22-23 September, 2009, Kyiv, Ukraine.
21. Rolea GG, Ciocea Ghe, Ion VI, et al. *The Use of Reed Briquettes in a Domestic Heating boiler*. *International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE '10)*, Puerto De La Cruz, Tenerife, November 30-December 2, 2010, p. 403-406.
22. Mahu R, Popescu F, Ion VI. CFD modelling of biomass combustion in a heating boiler. *Termotehnica, Supliment 1*. 2013, p. 141-145.
23. James AM, Yuan W, Boyette MD, et al. The Effect of Air Flow Rate and Biomass Type on the Performance of an Updraft Biomass Gasifier. *BioResources*. 2015;10(2):3615-3624.

#### **Authors of the publication**

**Ion V. Ion** – professor, «Dunarea de Jos» University of Galati, Romania.

**Răzvan Mahu** – professor, «Dunarea de Jos» University of Galati, Romania.

**Florin Popescu** – professor, «Dunarea de Jos» University of Galati, Romania.

**Gabriel Mocanu** – professor, «Dunarea de Jos» University of Galati, Romania.

**Robert Chivu** – professor, «Dunarea de Jos» University of Galati, Romania.

**Получено**

**20.02.2023г**

**Отредактировано**

**27.02.2023г**

**Принято**

**07.03.2023г**

УДК 621.315.2-026.17:681.586.7

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАБЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КВАЗИ-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Алькина А.Д.<sup>1</sup>, Юрченко А.В.<sup>2,3</sup>, Мехтиев А.Д.<sup>4</sup>, Мади П.Ш.<sup>1</sup>, Аймагамбетова Р.Ж.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,  
г. Караганда, Казахстан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>4</sup>Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,  
г. Астана, Республика Казахстан

<sup>5</sup>Казахстанский институт стандартизации и метрологии,  
г. Астана, Республика Казахстан

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>, [peri@mail.ru](mailto:peri@mail.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящий момент времени у электроэнергетических предприятий Казахстана и других стран СНГ сформировалась реальная потребность в автоматических распределенных и квази-распределенных охранных системах, которые способны своевременно предупредить дежурный персонал и охранные структуры о попытке хищения с указанием места вторжения в охраняемый кабельный канал. Одним из решений является разработка автоматической системы контроля кабелей на основе квази-распределенных волоконно-оптических датчиков.

**ЦЕЛЬ.** Разработка автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков способных своевременно предупредить дежурный персонал и охранные структуры о попытке хищения. Также имеется возможность установить место вторжения в охраняемый кабельный канал. Автоматическая система контроля кабелей позволяет частично решать проблемы безопасности охраняемого объекта в режиме реального времени. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся метод контроля интенсивности световой волны распространяющейся в оптическом волокне и сформированных дополнительных потерь при механическом воздействии на него. Дополнительные потери, можно численно преобразовать в картину изменения пикселей и далее уже в численные значения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результатом является разработка опытного образца автоматической системы охраны периметров с использованием волоконно-оптических датчиков и программного обеспечения. Программное обеспечение является важной частью, так как это основа предложенного метода интеллектуального пиксельного анализа светового пятна и определения дополнительных потерь в оптическом волокне. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Рассмотренный новый метод контроля позволяет преодолеть ряд недостатков известные методы оптической интерферометрии и рефлектометрии, а также волоконные решетки Брэгга, которые требуют достаточно дорогостоящих структурных компонентов автоматической системы контроля кабелей и специфического программного обеспечения на основе искусственного интеллекта. Предлагаемая автоматическая система контроля кабелей может стать альтернативой для замены устаревших систем охраны военных объектов, использующих электрические сигналы, при этом будет полностью исключаться блокировка и подавление специальными средствами.

**Ключевые слова:** система охраны; волоконно-оптический сенсор; несанкционированный доступ; оптическое волокно; охраняемый периметр.

**Для цитирования:** Алькина А.Д., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Мади П.Ш., Аймагамбетова Р.Ж. Разработка автоматической системы контроля кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 125-143.



## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CABLE MONITORING SYSTEM USING QUASI-DISTRIBUTED FIBER-OPTIC SENSORS

AD. Alkina<sup>2</sup>, AV. Yurchenko<sup>2,3</sup>, D. Mekhtiyev<sup>4</sup>, PSh. Madi<sup>1</sup>, RZh. Aimagambetova<sup>5</sup>

<sup>1</sup>NJS «Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov», Karaganda, Kazakhstan Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Republic of Kazakhstan

<sup>5</sup>Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology, Astana, Kazakhstan Republic of Kazakhstan

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>, [peri@mail.ru](mailto:peri@mail.ru)

**Abstract:** *RELEVANCE.* At the moment, the electric power enterprises of Kazakhstan and other CIS countries have a real need for automatic distributed and quasi-distributed security systems that are able to timely warn the on-duty personnel and security structures about an attempted theft, indicating the place of intrusion into the protected cable channel. One of the solutions is the development of an automatic cable monitoring system based on quasi-distributed fiber-optic sensors. *THE PURPOSE.* Development of an automatic system for monitoring the integrity of power cables using quasi-distributed fiber-optic sensors capable of timely warning the personnel on duty and security structures about the attempted theft and the place of intrusion into the protected cable channel. The automatic cable monitoring system allows you to partially solve the security problems of the guarded perimeter in real time. *METHODS.* In solving this problem, a method was used to control the intensity of the light wave propagating in an optical fiber and the additional losses generated by mechanical action on it. Additional losses can be numerically converted into a picture of pixel changes and then into numerical values. *RESULTS.* The result is the development of a prototype of an automatic perimeter security system using fiber-optic conductors and software. The software is an important part, as it is the basis of the proposed method of intelligent pixel analysis of a light spot and determination of additional losses in an optical fiber. *CONCLUSION.* The considered new control method makes it possible to overcome a number of disadvantages of the well-known methods of optical interferometry and reflectometry, as well as Bragg fiber gratings, which require rather expensive structural components of an automatic cable control system and specific software based on artificial intelligence. The proposed automatic cable monitoring system can become an alternative to replace outdated security systems for military facilities using electrical signals, while blocking and suppression by special means will be completely excluded.

**Keywords:** security system; fiber-optic sensor; unauthorized access; optical fiber; guarded perimeter.

**For citation:** Alkina AD, Yurchenko AV, Mekhtiyev D, Madi PSh, Aimagambetova RZh. Development of an automatic cable monitoring system using quasi-distributed fiber-optic sensors. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15:1(57):125-143.

### **Введение**

В настоящее время в Казахстане существует определенная проблема связанная с надежностью работы распределительных сетей районной энергетической компании «Астана РЭК». Сущность проблемы заключается в том, что имеются случаи кражи силовых кабелей 0,4 кВ из кабельных каналов. Это достаточно серьезная проблема для электроэнергетиков, так как нарушается надежность электроснабжения потребителей. В настоящий момент данная проблема частично решается различными методами и средствами, но пока эффективных решений, удовлетворяющих всем требованиям производства, не найдено. Похищаются как кабели находящиеся под напряжением, так и резервные кабели. Значительная стоимость цветного металла способствует формированию определенных групп злоумышленников, которые организуют мобильные группы, у которых есть все необходимые инструменты и спецтехника. Также существует проблема кражи проводов воздушных линий электропередачи, проходящих по удаленным степным районам сельской местности. Ежегодно похищаются десятки километров электрических

проводников и наносится значительный вред энергетическим компаниям по всему Казахстану. В открытом доступе можно найти достаточно много информации, связанной с хищением проводов и кабелей, не только в Республике Казахстан, но и в других странах СНГ. Одним из методов борьбы с данным явлением является организация охраны кабельных линий с использованием как частных, так и ведомственных охранных структур. К решению проблемы привлекаются правоохранительные органы, которые предотвращают случаи воровства или ведут расследования при факте похищения силового кабеля. Целью проведения исследований является разработка автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков для внедрения в производственный процесс энергетической компании «Астана РЭК», что позволит сократить производственные потери.

Научной и практической значимостью является получение новых результатов, которые позволяют разработать автоматическую систему контроля кабелей их целостности с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков для системы охраны электроэнергетических объектов. Значимостью данной работы является переход от традиционных систем сигнализации к использованию цифровых методов контроля основанных на основе волоконно-оптических технологий работающих в режиме реального времени. В настоящий момент времени у электроэнергетических предприятий Казахстана и других стран СНГ сформировалась реальная потребность в данных охранных системах. Данная система позволит зафиксировать не только факт вторжения в охраняемую зону, но точно установить место на всем протяжении кабельного канала. Вторым важным моментом для внедрения системы контроля является требование, связанное с внедрением цифровых технологий и использования Индустрии 4.0. Предлагаемый метод позволяет создать относительно не высокий по стоимости квази-распределенных волоконно-оптический датчик способный защищать кабельные линии на всем ее протяжении.

#### ***Литературный обзор***

Литературный анализ и практика показывает, что усилиями полиции и охранных организаций, не получается решить проблему и эффективно бороться с данным явлением [1-2]. Злоумышленники находят различные способы, как обойти существующую охранную систему, установленную на трансформаторной подстанции, например, устраивают подкопы и проникают в кабельный канал минуя охраняемые участки. Руководство энергетических компаний принимает меры для недопущения кражи кабелей, создаются мобильные бригады, которые охраняют наиболее уязвимые участки электрической сети и делают периодическую проверку кабельных линий (КЛ). Помещения трансформаторных подстанций оборудуются охранными системами и ставится на круглосуточный контроль. Кражам подвергаются проводники тока не только действующих линий электропередач и подстанций, но и резервные линии, поэтому приходится держать их под напряжением. Компания «Астана РЭК» вынуждена пускать часть своих средств не на развитие, а на ликвидацию последствий краж КЛ на различных участках разветвлённой распределительной сети города Астана. В настоящий момент времени Астана переживает пик строительства, а так как коммуникации подводятся к зданиям и сооружениям в первую очередь, то какое-то время КЛ не подключаются к фидерам трансформаторной подстанции (ТП). Отсутствие напряжения достаточно облегчает задачу для злоумышленников, намеренных извлечь КЛ из кабельного канала. Кабельный канал является не защищенным охранной сигнализацией или иными техническими средствами и скрытый подкоп позволяет злоумышленникам проникнуть в него, где они уже могут осуществлять свою деятельность практически не замеченными. Существующие системы охранной сигнализации, реагирующую на проникновение внутрь помещения трансформаторной подстанции (ТП) или колодца [3], но не обеспечивают защиты кабельного канала от подкопа.

Использование оптического волокна позволяет создать квази-распределенный датчик значительной протяженности в десятки километров, что уже используется в охранных системах различных периметров [4]. Предлагается закреплять датчики непосредственно на самом кабеле и при попытке его хищения можно будет установить место механического воздействия на кабель. На рисунке 1 показан кабельный канал, проходящий от ТП до потребителей 0,4 кВ, подобные каналы проходят между отдельными ТП формируя единую электрическую сеть. Внутри кабельного канала имеется достаточно места для перемещения человека, что позволяет злоумышленникам путешествовать по всей системе каналов переходя от одной линии к другой. Обычно подкоп делается в малозаметном месте, где он не виден с поверхности земли при объезде представителями охранной структуры. Как показала практика, наблюдается слишком поздняя реакция со стороны служб охраны и полиции из-за отсутствия автоматических технических средств

противодействия этому явлению. Больше всего случаев кражи КЛ, которые находятся вдали от черты города для обеспечения электропитания отдаленных районов, там уже для проведения подкопа и вскрытия кабельного канала может использоваться тяжелая землеройная техника. Внутри города подкопы выполняются злоумышленниками вручную и маскируются, они получаются малозаметными и трудно обнаруживаемыми при объезде территории охранными службами. Это позволяет преступным сообществам процветать и практически безнаказанно продолжать свою деятельность [1-3].

В мире существует достаточно много систем охраны различного технического уровня и стоимости, которые используют различные принципы и методы в своей работе. Например, существуют инфракрасные, виброакустические, магнитометрические, емкостные, сейсмические и другие типы систем. Есть отдельный вид систем охраны, основанный на видеонаблюдении. Достоинства и недостатки указанных систем рассмотрены ранее [5]. Основной идеей данной работы является, использование волоконно-оптических датчиков, которые уже используются в системах охраны в различных областях промышленности, но при этом необходимо разработать аппаратно-программный комплекс контроля и метод обработки данных. Анализ показывает, что актуальность использования данных систем охраны чрезвычайно высока, ежегодно растёт интерес к использованию оптических волокон в качестве датчиков с высокими метрологическими характеристиками. На основе ОВ можно создать распределенные системы охраны способные не только установить факт вторжения, но и определить точное место вторжения [5]. Задачей также является создать принципиально новую волоконно-оптическую систему охраны, имеющую значительно меньшую стоимость по сравнению с существующими аналогами, но полностью адаптированную к климатическим условиям города Астана и условиям эксплуатации Астана РЭК. Еще пожеланием производителей является определенная доля Казахстанского содержания для получения льгот и поддержки со стороны государства в реализации планов внедрения волоконно-оптических систем охраны.



Рис. 1. Кабельный канал, проходящий от ТП до потребителей 0,4 кВ *Fig. 1. Cable channel from TP to consumers 0.4 kV*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

Проведенный анализ литературы показал значительный интерес к использованию ОВ в охранных системах, например, на мировом рынке уже имеются, производятся и продаются охранные системы различных фирм. Первый обнаруженный патент по охранным системам данного типа был зарегистрирован в США в 1977 году, который стал основой последующих разработок. Основой является источник излучения, волоконно-оптический сенсор, фотоприемник и устройство обработки данных [5,6]. Можно выделить ряд успешных разработок и лидеров в данной области, которые уже не сколько десятков лет присутствуют на рынке, например, *Future Fibre Technologies FFT* (Австралия); *Remsdaq* (Англия); *TRANS Security Systems and Technology (TSS)* (Израиль); *Fiber SenSys* (США); *Magal* (Израиль); *Senstar-Stellar* (Канада). Имеются из России, например, НПО Прикладная радиофизика «Ворон» (Россия); «Дунай» (Россия); «Гюрза» (Россия), можно привести еще с десяток примеров в какой той мере успешные проекты в области волоконно-оптических систем охраны. Отдельно можно отметить успехи разработчиков *Yangtze Optical Fibre and Cable Company Ltd* из Китая, которые производят достаточно недорогие системы на основе

разработок *Fiber SenSys* (США), но имеющие более низкую стоимость [6,7]. Каждый производитель использует свои научные разработки, методы и средства. При анализе доступных источников, данные разработки недостаточно освещены в открытой печати, а некоторые засекречены, можно сделать вывод, что между различными системами охраны есть ряд определенных сходств, объединяющих их в несколько групп [8-10]. Производители стремятся повысить технический уровень своей продукции и добиться определенного преимущества перед конкурентами, но есть обстоятельства, вызывающие ряд общих проблем, которые ограничивают их возможности применения и ведут к серьезному удорожанию [8-10]. В России сложился определённый рынок по продаже охранных систем для различных периметров функционирующие на основе волоконно-оптических технологий [11]. Обеспечение охраны объектов ограниченного доступа и опасных объектов государственного значения или просто частных территорий от несанкционированного доступа, которые занимают значительные площади, в отличие от локальных объектов требует больших затрат и сложных коммуникации для построения системы охраны и мониторинга периметра, это обстоятельство существенно повышает стоимость систем охраны. К примеру, охранный система «ВОРОН-3М-К» (Россия) составляет примерно 10 млн. руб. - длина охраняемого периметра: 2400 м, длина зоны: 15 м. Продукция *Fiber SenSys* (США) стоит более чем в два раза дороже [5-11]. Проанализировав стоимость распределенной ВОСО «Ворон» [6,8], можно сказать, что наиболее выгодным вариантом по стоимости для заказчика является протяженность охраняемого периметра от 15 до 30 км, так как стоимость одного километра существенно снижается. Соответственно желательно иметь протяженные участки, чтобы снизить стоимость вложений. В работе [12] можно найти основные теоретические сведения о принципах работы волоконно-оптических датчиков созданных на основе оптического интерферометра. К примеру, использование принципов оптического интерферометра вызывает ряд проблем при возникновении помех из-за температурных воздействий на оптическое волокно. Поэтому полностью не решенные известные проблемы распределенных волоконно-оптических охранных систем и отсутствие доступной подробной информации об их устройстве, служат основанием для проведения дополнительных исследований и ознакомление широкой общественности с принципами их функционирования. Также необходимо проведение исследований для их совершенствования и снижения стоимости, что сделает их более доступными. Все достоинства и недостатки волоконно-оптических систем можно узнать в источниках [5, 6]. Основное преимущество таких систем, это их скрытность. На оптическое волокно не действуют электромагнитные помехи [11, 12]. Поэтому использование оптических волокон для построения пассивных систем охраны периметров и рубежей различных объектов — это крайне перспективное направление. Есть публикация, посвящённая использованию волоконно-оптических датчиков для контроля технического состояния шахтной крепи [13]. Есть научные работы, посвящённые датчикам используемых в горной промышленности. В итоге можно сказать, что оптическое волокно может служить одновременно, как направляющая система для передачи информации, так и измерительный датчик, практически любых параметров [12-15]. Имеется ряд зарубежных публикаций, в которых представлены результаты исследования волоконно-оптических датчиков, которые используются в системах охраны или в качестве датчиков различных физических величин [15]. Получена информация [13-15], что оптическое волокно и компоненты ежегодно дешевеют на рынке, например, стоимость оптического волокна составляет менее 10 долларов США. Оптическое волокно является искробезопасным, если световая энергия, передаваемая по волокну, находится на уровне или ниже определенного уровня мощности [13-15]. Проведены полевые испытания распределенной оптоволоконной системы датчиков несанкционированного вторжения для протяженных периметров свыше 20 км [16]. Представлены результаты обработки сигналов, полученных от волоконно-оптических датчиков, а также представлены методы нормализации уровня счета нечувствительных к поляризации волоконно-оптических интерферометрических датчиков [17]. В данной работе учтен опыт разработки частотной волоконно-оптическая система сигнализации [18]. Есть публикация, посвященная оценки способности оптического волокна воспринимать акустические волны [19]. Результаты исследований представленные в работе [20], тоже подтверждают, что достаточно высокий уровень помех возникает в оптическом волокне при изменении его температуры. Передача сигнала на расстояние 100 км по волокну не проблема, при этом затраты энергии не сопоставимо низкие по сравнению с контрольными кабелями [20, 21]. В источниках [22] представлены методы борьбы с помехами и способы защиты информации, передаваемой по оптическим волокнам. Оптические волокна не подвержены влиянию шума, молнии, помех от ВЧ, ЭДС, электромагнитных помех,

распространенных в горной промышленности. Анализ показал определенные преимущества оптического волокна для его использования в качестве чувствительного элемента автоматической системы контроля целостности силовых кабелей. На основе оптических волокон можно создать с помощью распределенные и квази-распределенные волоконно-оптические датчики для систем охраны кабельных каналов. Соответственно важным моментом является поиск новых решений для снижения стоимости волоконно-оптической сигнализации. Для решения поставленных задач разработан собственный метод позволяющий решить данную проблему и разработать собственную конструкцию автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков.

### Материалы и методы

Разработан опытный образец автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков, который прошел практическую апробацию в условиях «Астана РЭК». В качестве датчиков были использованы волоконно-оптические кабели марки КС - ОККО - А - 2 -G.652.D - UCF и КС - FTTH - А - 2 -G.652.D - UCF. Волоконно-оптические датчики прокладывались в оба конца в кабельном канале от РП197 до ТП 3257, 3258 и 3259. Все объекты находятся на балансе Астана РЭК. Охраняемый участок разбивается на 4 зоны, на рисунке 2 показана условная схема прокладки волоконно-оптических датчиков.

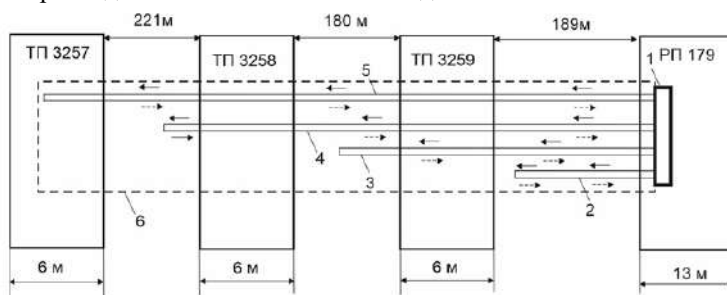


Рис. 2 - Условная схема прокладки волоконно-оптических датчиков  
 Fig. 2 - Fibre optic sensor layout  
 1 - Блок обработки данных; 2 – канал №1; 3 – канал №2; 4 - канал №3; 5 - канал №4, 6 – условное обозначение кабельного канала  
 1 - Data processing unit; 2 - Channel 1; 3 - Channel 2; 4 - Channel 3; 5 - Channel 4, 6 - symbol

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Один датчик содержит два ОВ, один называется прямым, второй обратным. По прямому ОВ свет распространяется от источника излучения до конечной точки канала, а по обратному возвращается к фотоприемному устройству. ОВ каналов 1-4 подключаются к блоку обработки данных при помощи оптических коннекторов.

Натурные эксперименты проводились в условиях реальной электрической сети 10/0,4 кВ компании Астана РЭК. Трансформаторные подстанции (ТП 10/0,4 кВ) и распределительный пункт РП 10 кВ расположены в районе «Депутатский городок» город Астана, фото улицы с расположением ТП 10/0,4 кВ показано на рисунке 3.



Рис. 3 - Фото улицы с расположением ТП 10/0,4 кВ  
 Fig. 3 - Street photo with 10/0.4 kV TP location

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На рисунке 4 показана карта с указанием расположения ТП 10/0,4 кВ и РП 10 кВ «Депутатский городок» город Астана.

На рисунке 5 показано, как был установлен блок обработки данных внутри помещения РП 10 кВ, для обеспечения надежности работы системы охраны блок обработки данных оснащен бесперебойным источником питания. При срабатывании сигнала тревоги данные передаются по каналам сотовой связи при помощи радиомодема 4G на пульт диспетчера компании Астана РЭК, там же установлен сервер для хранения информации, который выполнен на базе персонального компьютера. Также осуществляется передача сигнала тревоги службе безопасности путем рассылки сообщений в мессенджер «Telegram». Система смонтирована в универсальном настенном шкафе Spacial CRN 800x600x300 Schneider Electric.

На рисунке 6 представлен лабораторный образец автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков. В лабораторных условиях была выполнена сборка 4 канальной системы. Все элементы схемы закреплены на общем металлическом основании, которое в последствии встраивается в универсальный настенный шкаф. Была произведена наладка системы для обеспечения срабатывания при механическом воздействии на охраняемый кабель.

Далее непосредственно на самом объекте были установлены волоконно-оптические датчики марки КС - ОККО - А - 2 -G.652.D - UCF и КС - FTTH - А - 2 -G.652.D – UCF, которые имеют защитную пластиковую оболочку и силовой элемент из кевларовой нити. Два различных типа ОВ были выбраны для сравнения их чувствительности в условиях кабельного канала.

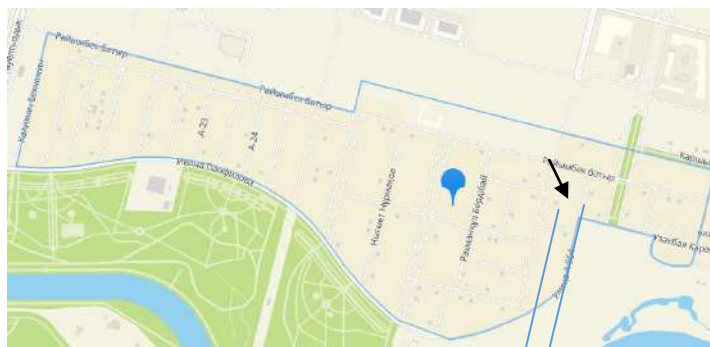


Рис. 4 - Карта с указанием расположения ТП 10/0,4 кВ и РП 10 кВ «Депутатский городок» город Астана

Fig. 4 - Map indicating location of 10/0.4 kV TP and 10 kV RP «Deputy Town» Astana

Источник: [https://2gis.kz/karaganda]Source: [https://2gis.kz/karaganda].



Рис. 5. Универсальный настенный шкаф с блоком обработки размещенный внутри помещения РП 10 кВ

Fig. 5. Universal wall cabinet with processing unit located inside the room RP 10 kV

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

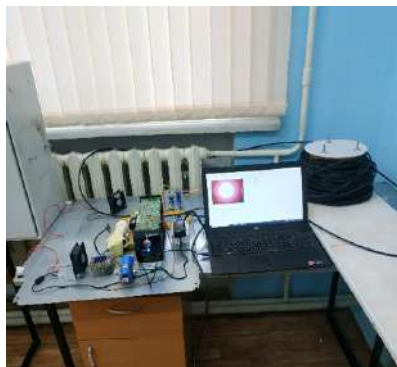


Рис. 6. Лабораторный образец автоматической системы контроля целостности силовых кабелей *Fig. 6. Laboratory sample of automatic integrity control system for power cables*

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

На рисунке 7 показан процесс монтажа волоконно-оптических датчиков в кабельном канале работниками компании Астана РЭК.



Рис. 7. Монтаж волоконно-оптических датчиков *Fig. 7. Installation of fiber optic sensors*

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Для удобства монтажа кабельный канал был вскрыт в трех местах, что позволило протянуть волоконно-оптические датчики. При прокладке волоконно-оптических датчиков необходимо проявлять особую осторожность для исключения их излома и повреждения защитной оболочки. Автоматической системы контроля целостности силовых кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков далее АСКК в своей основе не использует известных методов и принципов работы, известных зарубежных аналогов [5, 6]. Так как информации в открытых источниках недостаточно для полного дублирования существующих охранных систем на основе ВОД принято решение разработать принципиально новых метод контроля и обработки полученных данных. При обработке данных полученных от ОВ не используются известные методы и технические решения рассмотренные в работе [7-11]. Важным моментом практической реализации научной разработки и ее использования в дальнейшем, является условие выдвинутое энергетической компанией Астана РЭК, которая заключается в простоте конструкции и минимальной стоимости АСКК, а также должны быть незначительные материальные затраты на эксплуатацию.

Было принято решение не использовать известные методы оптической интерферометрии и рефлектометрии, а также волоконные решетки Брэгга. Данные методы достаточно изучены и рассмотрены в научной литературе [12-14]. Например, использование известного метода оптической интерферометрии обусловлен зависимостью фазы распространения световой волны от температуры, так как изменение температуры на 1 °С может вызвать ложное срабатывание при отсутствии механического воздействия на сенсор [5, 6]. Использование методов оптической рефлектометрии или решеток Брэгга обусловлено более высокой стоимостью комплектующих и необходимостью использования высокотехнологического оборудования, что увеличивает стоимость АСКК [6, 7]. Для реализации идей по созданию новой АСКК был разработан метод электронно-оптического анализа светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения установленной на выходе из одномодового оптического волокна, которое используется в качестве датчика. При механическом воздействии на волоконно-оптический датчик АСКК возникает известный фотоупругий эффект, который вызывает изменение фазы распространения световой волны и изменения ее свойств, в частности интенсивности.

Механические воздействия на волоконно-оптический датчик приводят к изменению хода луча оптического интерферометра, на данном принципе построено множество АСКК, но у оптического интерферометра есть достаточно серьезная проблема при колебаниях температуры наблюдается изменение фазы распространения световой волны в ОВ. Механические воздействия на волоконно-оптический датчик АСКК приводят к возникновению дополнительных потерь световой моды в ОВ, что можно зафиксировать и использовать данный эффект для работы АСКК. Наличие дополнительных потерь в ОВ фиксируется по изменению интенсивности светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы. Отличием является использование именно фотоматрицы высокого разрешения, а не одно пиксельного фотоприемника. Это позволяет производить анализ изменения картины пикселей светового пятна, в отличие от аналогов, где фиксируется изменение только амплитуды светового сигнала [12-14].

На рисунке 8 показана сущность метода контроля интенсивности и дополнительных потерь при помощи электронно-оптического анализа. Представлены два изображения светового пятна, позитив и негатив. На изображении негатива отмечены две зоны, под цифрой 1 показано изображение сердцевины оптического волокна, а под цифрой 2 показано изображение оболочки оптического волокна. Предлагаемый метод контролирует изменения светового пятна в области оболочки, а сердцевина из анализа исключается, так как при механическом воздействии световая волна выходит из сердцевины и попадает в оболочку. Далее уже световая волна распространяется по оболочке до фотоматрицы. Предлагаемый метод основан теории контроля дополнительных потерь в оптических волокнах. Теоретические основы данного метода уже опубликованы ранее и подробно рассмотрены в [12-14]. Пятно, которое схоже с известным изображением светового пятна Пуассона, падает на поверхность фотоматрицы, формируется картина, когда сердцевина более яркая, а оболочка более темная, так как в ней сосредоточены только потери световой волны, а соответственно можно зафиксировать их увеличение при механическом воздействии. Световое пятно подчиняется нормальному распределению Гаусса и содержит достаточно значительное количество шумов, сгенерированных источником излучения, для нивелирования помех используется программное обеспечение [12-14].

Позитив не используется, так как потери распространяются по оболочке, и она в позитивном изображении более тусклая. Сердцевина напротив более яркая, но не информативная, соответственно в негативе более яркая оболочка. Метод основан на контроле дополнительных потерь, формируемых в оболочке. Лазер должен быть когерентным с отклонением длины волны не более 5 нм. Теоретически длина волны может быть от 650 до 850 нм. Чем больше длина тем меньше затухание в оптическом волокне, что необходимо учитывать при увеличении длины волны волоконно-оптического датчика. Длина волны 650 нм достаточно для датчика протяженностью 20 км. В данном эксперименте использовалась длина волны 650 нм, так как длина волоконно-оптического датчика незначительна в километрах 1 км. Принцип работы предлагаемой АСКК базируется на использовании источника света (лазерного излучения), одномодового или многомодового оптического волокна и фотоприемника [12-14]. Лазер установлен с одной стороны ОВ, а фотоприемник с другой. Если на ОВ оказывается механическое или виброакустическое воздействие и это вызывает изменение свойств световой волны, распространяющейся по сердцевине, что фиксируется фотоприемником высокого разрешения. Далее система обработки данных и принятия решений выдает сигнал тревоги или игнорирует зафиксированные изменения и распознает случайные помехи. При механическом воздействии на волоконно-оптический датчик изменяется пиксельная картина светового пятна.

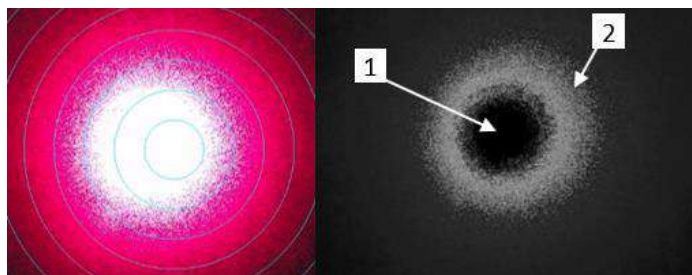


Рис. 8 - Форма светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы

Fig. 8 - Shape of the light spot falling on the surface of the photomatrix

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author



Программа преобразовывает все изменения интенсивности светового пятна и возрастающие дополнительные потери в картину изменения пикселей. На рисунке 9 показан снимок с экрана компьютера, на котором приведены несколько вариантов изменения картины пикселей светового пятна и их перехода от черного к белому свету. Чем сильнее воздействие на волоконно-оптический датчик тем больше изменения интенсивности светового пятна и больше возникающие дополнительные потери распространяющиеся по оболочке волоконно-оптический датчик, соответственно большее количество белых пикселей. При возникновении помехи количество пикселей увеличивается, позиция 1, но скорость их роста отличается и количество меньше в сравнении с позицией 2 и 3 когда рост белых пикселей достаточно значительный, так как на волоконно-оптический датчик было оказано воздействие для имитации преодоления охраняемого периметра. Световое пятно проходит преобразование за счет программы от изображения на рисунке 8 до картины изменения пикселей, представленной на рисунке 9.



Рис. 9 - Снимок с экрана компьютера

Fig. 9. Computer screen shot

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На экране компьютера четко видно, как изменяется световое пятно, особенно на границе раздела ядра и оболочки оптического волокна. Программа позволяет различать воздействие на волоконно-оптический датчик и помехи, например, изменение внешней температуры или порывы ветра. Помехи всегда порождают меньшее количество белых пикселей по сравнению с воздействием при несанкционированном доступе к охраняемому кабелю. Программа анализирует изменение картины пикселей светового пятна и принимает решение о срабатывании сигнализации. Если воздействие было оказано несколько раз с определенной частотой, интенсивностью и периодичностью, то это воспринимается как вторжение. Более сильное воздействие вызывает большие изменения картины пикселей и провоцирует их переход от черного к белому цвету. Все изменения фиксируются системой и при нескольких воздействиях превышающих уставку система срабатывает. Программа ступенчато изменяет свою чувствительность в случае возникновения помех, которые отличаются по частоте и скорости изменения интенсивности от воздействия на волоконно-оптический датчик. Метод позволяет контролировать скорости изменений производной интенсивности световой волны и потерь во времени, а также изменения формы пятна и перехода пикселей от белого к черному. Программа может распознавать шум, так как рост шума и механическое воздействие характерными разными показателями изменения интенсивности светового пятна. Также программа выполняет численную оценку уровня давления на ОВ при его изгибе. Все изменения светового пятна можно наблюдать в режиме реального времени. Опытный образец автоматической АСКК имеет в настоящий момент имеет пока 4 независимых канала, что на данный момент ограничено отсутствием необходимости увеличения числа каналов и программным обеспечением, но в дальнейшем количество каналов будет значительно увеличено.

На рисунке 10 показана структурная схема опытного образца АСКК. Предложенная АСКК устроена следующим образом, бесперебойный источник питания постоянного тока подключен к когерентному полупроводниковому лазеру 5 с длиной волны 650 нм, мощностью 30 мВт в зависимости от протяженности волоконно-оптических датчиков. Для снижения помех от источника излучения используется оптический разветвитель (сплиттер) 6. Оптическое излучение разделяется в пропорции  $\frac{1}{4}$  в оптическом кроссе для подключения оптических коннекторов 9. Каналы на схеме обозначены позицией 11.

Предложенная АСКК имеет 4 канала, в перспективе числом каналов будет увеличено до 64. Это позволит защищать участок длиной 16 км, который разделяется на отдельные зоны охраны протяженностью 500 м. Длина охраняемой зоны может быть от 20 до 500 метров в зависимости от ситуации и пожеланий заказчика. При необходимости на объекте можно установить два и более блоков обработки данных. Предельная дистанция действия до 20 км. АСКК содержит, источник питания лазера 5 который обеспечивает стабилизацию

параметров напряжения и тока, для снижения пульсации лазера, которая негативно отражается на работе системы и может стать источником помех. Полупроводниковый лазер работает на длине волны 650, его мощность составляет 30 мВт. Имеются устройства для согласования 3, оптический кросс для подключения оптических коннекторов 9. Оптический разветвитель разделяет луч на необходимое число лучей, но мощность распределяется между ними в равной пропорции.

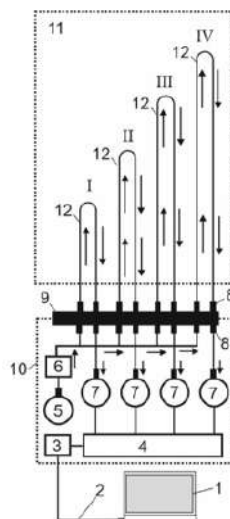


Рис. 10. Структурная схема лабораторного образца

1 – компьютер с программным обеспечением; 2 – соединительный кабель; 3 – устройство согласования с компьютером; 4 – микропроцессор предварительной обработки данных; 5 – полупроводниковый лазер с длиной волны в 650 нм; 6 – оптический разветвитель (сплиттер); 7 – фотоприемное устройство; 8 – оптические соединительные коннекторы; 9 – оптический кросс для подключения оптических коннекторов; 10 – корпус блока обработки данных; 11 – кабельный канал; 12 – одномодовый волоконно-оптический датчик (стандарта G652)

Fig. 10. Diagram of laboratory sample

1 - computer with software; 2 - connecting cable; 3 - a device for coordination with a computer; 4 - a microprocessor of pre-processing data; 5 - a semiconductor laser with a wavelength of 650 nm; 6 - optical splitter (splitter); 7 - photo receiver; 8 - optical connectors; 9 - optical cross for connection of optical connectors; 10 - data processing unit housing; 11 - cable channel; 12 - single mode fiber optic sensor (G652 standard)

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В качестве направляющей системы и датчика одновременно используется волоконно-оптический датчик 12, который размещается в кабельном канале. Волоконно-оптический датчик присоединяется к оптическому разветвителю 9 при помощи стандартных универсальных адаптеров 8 UPP 2.5 мм и оптических коннекторов типа SC 2.5 мм. Волоконно-оптический датчик 12 размещается в кабельном канале 11, а также разделяется условно на два направления движения световой волны «прямое» и «обратное». Ранее на рисунке 2 были показаны направления движения световой волны по волоконно-оптическим датчикам. Луч света проходит по всей длине одномодового волоконно-оптического датчика 12 и падает на поверхность фотоприемного устройства 7 установленной на его торце. Каждый канал содержит по одному фотоприемному устройству высокого разрешения. Все четыре фотоприемного устройства подключены в микропроцессорное устройство предварительной обработки данных 10. Далее уже электрический сигнал, через устройство согласования 3 поступает в компьютер 1 через соединительный кабель 2 для окончательной обработки и выдачи решения. Как показано ранее на рисунках 8,9 при механическом воздействии меняются параметры световой волны проходящей по сердцевине одномодового волоконно-оптического датчика 5, что и фиксируется АСКК.

### Результаты

Результатом является разработка опытного образца автоматической системы охраны периметров с использованием волоконно-оптических датчиков и программного обеспечения. Программное обеспечение является важной частью, так как это основа предложенного метода интеллектуального пиксельного анализа светового пятна и определения дополнительных потерь в ОВ. Программа написана с использованием языка

программирования Python. На рисунке 11 показаны все варианты работы АСКК в различных режимах при воздействии на волоконно-оптического датчика и без воздействия.

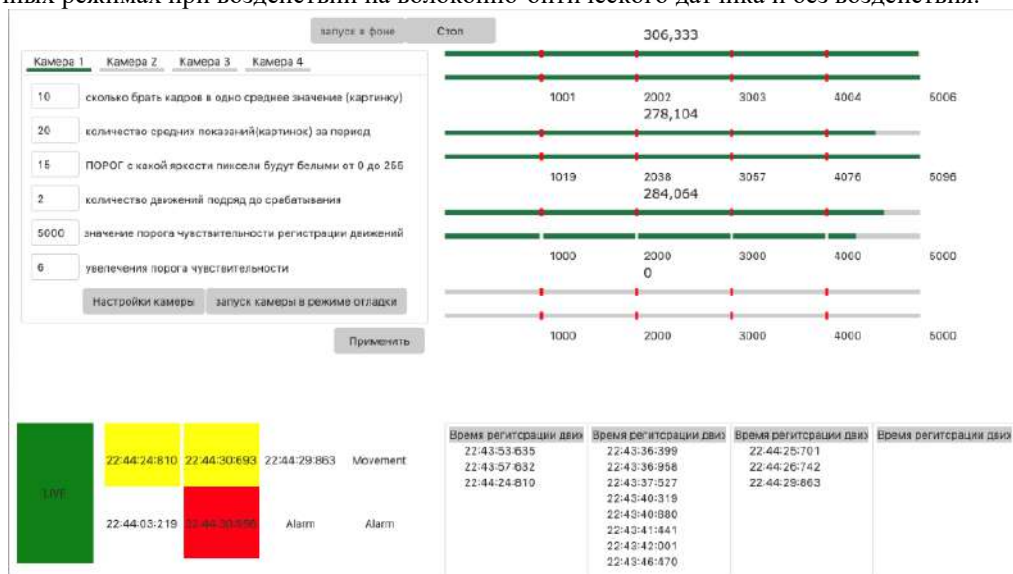


Рис.11. Окно программы

Fig.11. Program window

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При включении «желтого» или «красного» указателя система автоматически сохраняет в памяти компьютера время срабатывания. Окно программы, которое можно разделить на три основные части, слева блок настройки, справа шкала для оценки уровня воздействия на ВОС и количества воздействий за определённый период времени. В нижней части представлены индикаторы: зеленого цвета «нормальный режим», желтого цвета «вероятность вторжения» (предупреждение), красного цвета «тревога». Каждая из четырех зон имеет протяженность 500 метров. Пока опытный образец АСКК работает при протяженности каналов не более 1 км. Увеличить число охраняемых зон и дистанцию не имеет сложности и может быть легко реализовано. Предельная длина охраняемого периметра для одного блока обработки данных разработанной АСКК до 20 км. При подаче сигнала тревоги АСКК отправляет сообщения по каналам сотовой связи уполномоченным лицам для принятия решений. Исследование проводилось с использованием способа измерения дополнительных потерь при механическом воздействии и формировании изгиба на оптическом волокне. Способ основан на изменении свойств света, испускаемого от источника лазерного излучения. Источник лазерного излучения представляет собой лазерный диод с длиной волны 650 нм мощностью 30 мВт, принцип действия которого основан на возникновении изменения заселенности в области рп-перехода во время инжекции носителей заряда. При механическом воздействии излучаемый свет имеет свойство изменения светопропускания при прохождении через оптическое волокно. В случае микроизгиба возникает влияние фотоупругости, что приводит к изменению показателя преломления между оболочкой и сердечником. В случае микроизгиба дополнительные потери, возникающие в оптическом волокне при механическом воздействии на него, увеличиваются, а также происходят изменения интенсивности световой волны и фазы ее распространения. Может преобразовывать изменение фазы в изменение амплитуды. Следовательно, во время механического воздействия на оптическое волокно наблюдаются изменения в характере световых волн, проходящих через сердцевину оптического волокна и падающих на поверхность фотоприемника, в котором регистрируются все изменения. Роль фотоприемника на выходе оптического волокна исполняет фотоэлектрическая матрица с графическим процессором измерительного канала для предварительной обработки сигналов высокого разрешения. На конце оптического волокна установлен оптоволоконный соединитель типа SC с наконечником диаметром 2,5 мм, а также установлен физический контактный разъем UPC Ultra. Это позволяет формировать более четкие пятна света в отличие от ситуации при резке оптических волокон ножом [12-14]. В процессе настройки определяется фокусное расстояние между концом разъема и поверхностью фотоматрицы. Эта настройка позволяет аппаратно-программному комплексу контроля записывать все изменения светового пятна при воздействии на оптическое волокно.

На рисунке 12 представлено окно программы в котором имеются: 1) блок запуска в фоне, 2) блок настройки камер, 3) блок мониторинга активности, 4) кнопка сохранения настроек «Применить», 5) блок индикаторов состояния и сигналов, 6) блок регистрации движения с ведением логов по времени.

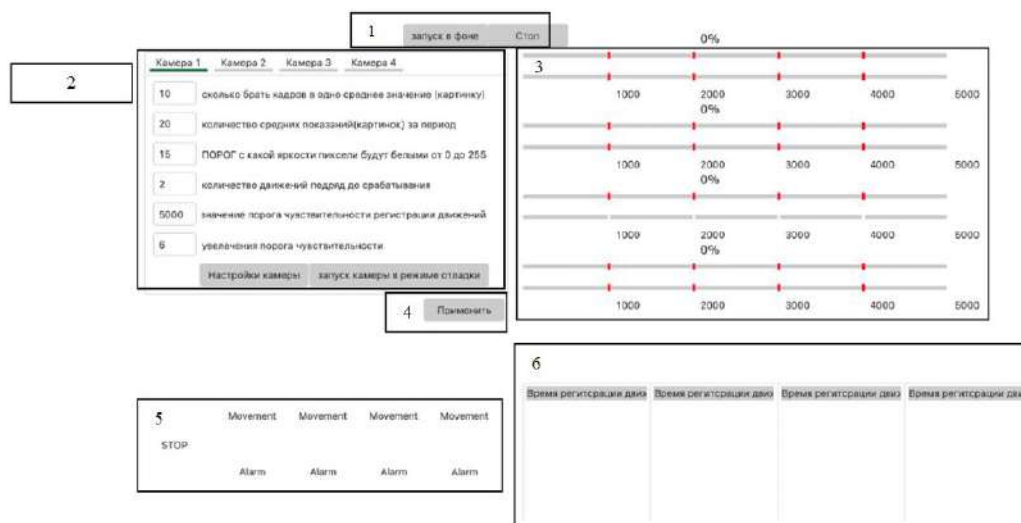


Рис. 12. Главное окно АСКК

Fig. 12. Main window of ASCC

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

АСКК разработана используя элементы библиотеки *OpenCV (Open Source Computer Vision Library)* [22, 23]. *OpenCV* - эта библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом. Эта библиотека алгоритмов теории и технологии создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов. *OpenCV* реализована на основании компилируемых статистически типизированных языках программирования, в данном комплексе используется версия для языка *Python* [23, 24]. Генерация и отображение графиков производится в библиотеке *Matplotlib* на языке программирования *Python* для визуализации данных с использованием двумерной (2D) графики (также поддерживается 3D-графика). Сгенерированное изображение может быть использовано в качестве иллюстрации в публикации. Интерфейс был реализован с помощью библиотеки *Tkinter*. *Tkinter* - кросс-платформенная событийно-ориентированная графическая библиотека на основе средств *Tk* [22-24], входит в стандартную библиотеку *Python* [25, 26].

Кнопка «Запуск в фоне», запускает программу в нормальном режиме. При запуске программы, берется эталонное изображения для сравнения всех следующих с ним для измерения изменений. В блоке кнопка «Стоп» – остановка программы. В блоке настройки камер существует четыре вкладки, для настройки каждого канала отдельно, в каждой вкладке имеется шесть полей ввода параметров и две функциональные кнопки, а также кнопка сохранения настроек кнопки «Применить». Кнопка «Применить» изменяет значения переменных и сохраняет их в файл «config.ini» который всегда должен находится в той же папке что и программа, при ее запуске все значения загружаются из этого файла. Кнопку «Применить» можно использовать при работающей программе, без остановки, для изменения параметров и чувствительности в реальном времени.

Количество кадров с камеры, которое будет усредненно в одно изображение, применяется снижения шумов камеры. Увеличение значения так же увеличивает время реакции детектирования. В среднем камера снимает 30 кадров в секунду. Например, при значении этого параметра равным 10 займет  $10/30 = 1/3 = 0.33$  секунды на каждое получение изображения. При изменении этого параметра в момент работы программы необходимо перезапустить программу (нажать стоп и запустить повторно) Прямо влияет на чувствительность детекции и время реакции. Количество изображений (измерений значений) за один период детекции. Служит для построения графиков скорости изменения и величин значений (белых пикселей) и указания периода – раз в сколько изображений (измерений значений) выявлять движение Минимальное значение = 2. Пороговое значение цвета пикселя в градациях серого (от 0 до 255), при котором произойдет срабатывание (превращение его в белый) для подсчета. 0 = черный 255 = белый 1-254 = оттенки серого. Прямо влияет на чувствительность детекции. Количество срабатываний (детекции

движения) подряд до сигнала «ТРЕВОГА». Значение порога срабатывания детекции движения (количество белых пикселей) при превышении которого будет зарегистрировано движение. Значение увеличения порога чувствительности на величину  $N$ , при регистрации движений подряд. При отсутствии движения значение будет сброшено к исходному значению из поля б.

В блоке настройки камеры в каждой вкладке «Камера» имеются функциональные кнопки: 1) «Настройки камеры» и 2) «Запуск в режиме отладки». При нажатии кнопки «Настройки камеры» - открывается браузер с IP-адресом текущего канала для настройки IP-камеры в веб-интерфейсе для наладки аппаратных характеристик матрицы.

При нажатии кнопки «Запуск в режиме отладки» - запускается соответствующий режим где отображаются окна режима показа поступающих и обрабатываемых данных. На рисунке 13 представлены изображение светового пятна и результатов обработки данных при помощи электронно-оптического анализа светового пятна.

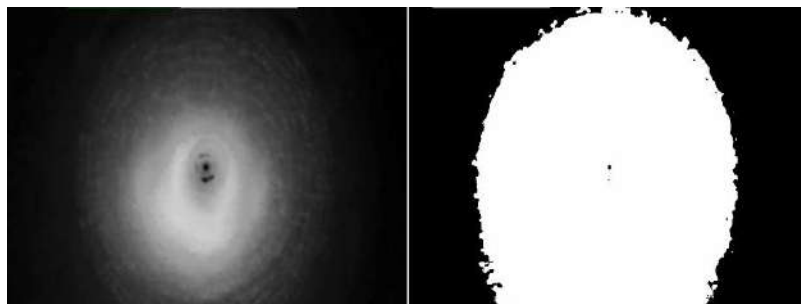


Рис. 13. Режим показа поступающих и обрабатываемых данных

Fig. 13. Mode of presentation of incoming and processed data

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На рисунке 14 представлены графики. Первый график показывает разницу (мгновенную скорость изменения количества белых пикселей) между двумя последовательными значениями количества белых пикселей во времени. Второй график показывает общее количество белых пикселей в каждом последовательном изображении. Для остановки программы в режиме отладки, достаточно закрыть окно режима отладки.

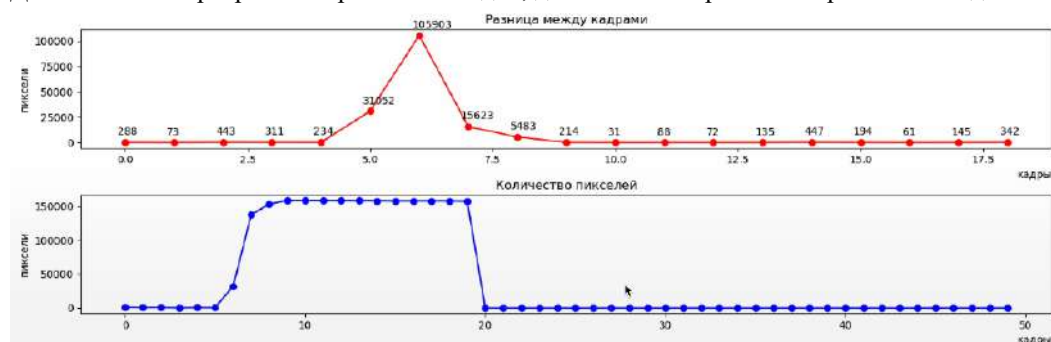


Рис. 14. Графики режимов показа поступающих и обрабатываемых данных

Fig. 14. Graphs of modes of presentation of incoming and processed data

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В блоке мониторинга активности показаны размеченные шкалы, соответственно для каждой камеры. Шкалы представляют собой: верхняя – количество белых пикселей, яркость которых выше заданного порога яркости, нижняя – изменения количества пикселей выше заданного порога яркости между двумя последовательными измерениями, шкала имеет лимит заданным полем «значение порога чувствительности регистрации движений». Шкала размечена через промежутки 20% от максимума, с указанием числовых значений.

Блок индикаторов состояния и сигналов, представленный на рисунке 15 при запуске становится зеленым и надпись изменяется на *LIVE*, при движении или тревоге становится белым не изменяя надпись *LIVE*.



Рис. 15. Режим работы в включенном положении Fig. 15. Operating mode in the included position  
 Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Индикатор детекции движения, представленный на рисунке 16 при срабатывании становится желтым и надпись изменяется на точное время зарегистрированного движения, при отсутствии движения становится белым.



Рис.16. Режим срабатывания сигнала «движения» Fig. 16. Mode of operation of signal «movement»  
 Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Индикатор детекции тревоги, представленный на рисунке 17 при срабатывании заданного количества сигналов «движение» становится красным и надпись изменяется на точное время зарегистрированной тревоги, при отсутствии тревоги становится белым.

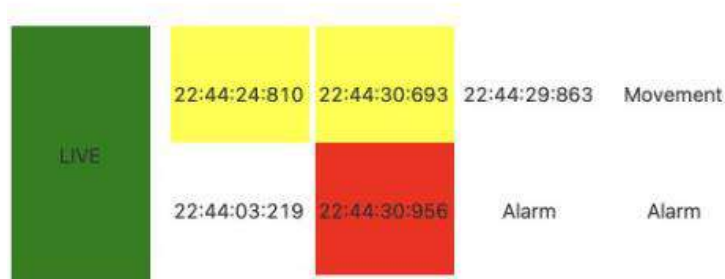


Рис.17. Режим срабатывания сигнала «тревога» Fig. 17. Alarm mode «alarm»  
 Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Блок регистрации движения, представленный на рисунке 18, с ведением логов по времени записывает все движения за текущий запуск, прокрутка осуществляется колесиком мыши.

Время регитсрации движ	Время регитсрации движ	Время регитсрации движ	Время регитсрации движ
22:43:53:635	22:43:36:399	22:44:25:701	
22:43:57:632	22:43:36:958	22:44:26:742	
22:44:24:810	22:43:37:527	22:44:29:863	
	22:43:40:319		
	22:43:40:880		
	22:43:41:441		
	22:43:42:001		
	22:43:46:470		

Рис. 18. Блок регистрации движения с ведением логов по времени Fig. 18. Traffic registration unit with logs by time  
 Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Все блоки предоставляют полную информацию об изменениях абсолютных и скоростных изменения пятна в режиме реального времени с сохранением времени срабатывания сигналов возможностью полной настройки с мгновенным применением параметров. Вся информация о срабатывании АСКК хранится на сервере до востребования. При срабатывании системы автоматически отправляется сообщение с помощью каналов сотовой связи.

### **Обсуждение**

В нормальном режиме работы возможно возникновение помех, связанных с нарушением когерентности лазера, для их снижения необходима стабилизация параметров напряжения и тока, допустимые отклонения при длине волны 650 нм должны быть не более 5 нм. При проведении лабораторных экспериментов волоконно-оптический датчик нагревался до температуры от 23<sup>0</sup> до 50<sup>0</sup>С, при этом ложного срабатывания ВОД не зафиксировано, соответственно предложенный метод контроля интенсивности светового пятна и дополнительных потерь более эффективный и менее зависим от колебания температуры, которая вызывает изменение коэффициента преломления ОВ. Анализ изображения рисунка 7 показывает, что достаточно высокая вероятность обнаружения вторжения в охраняемый периметр при воздействии на ОВ, так как система может четко распознавать вторжение и помехи. Картина изменения пикселей от черного к белому цвету при возникновении помех отличается от картины пикселей при вторжении и воздействии на ВОС. При отсутствии воздействия на ВОД их уровень произвольно возникающих белых пикселей достаточно низкий и может достигать значения в 1000 единиц, а при воздействии уже десятки тысяч.

Предложенный метод позволяет контролировать механическое воздействие на волоконно-оптический датчик по изменению уровня дополнительных потерь и изменению интенсивности световой волны, падающей на поверхность фотоприемника, а интеллектуальная обработка изображения пятна позволяет отслеживать изменения интенсивности отдельных пикселей. Нужно отметить, что падающий свет на поверхность фотоприемника содержит значительное количество шумов, это видно на рисунка 1 и 2, для снижения помех необходимо снизить шум и пульсацию источника излучения. Шум негативно влияет на работу системы, но интеллектуальная программа отслеживает динамику изменения формы светового пятна и способна отделять флюктуации, вызванные внешними факторами, например, внешними помехами, от полезных сигналов при воздействии на ОВ нарушителя. Важным моментом борьбы с ложными шумами является способность системы ступенчато изменять свою чувствительность, первоначально она настроена на максимальную чувствительность для контроля начальных смещений и подачи предупредительных сигналов оператору, после чего происходит автоматическое загроушение параметров для точности фиксации смещения и исключения ложного измерения.

Испытания системы показали достаточно высокую надежность срабатывания при воздействии на волоконно-оптический датчик. Значение вероятности срабатывания составили 0,87. В сравнении с зарубежными аналогами, у которых вероятность срабатывания составляет 0,9-0,95 при различных ситуациях, например, одиночный нарушитель, группа нарушителей или автотранспорт. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1.

### **Выводы**

Цель научной работы реализована полностью, результатом является разработанный опытный образец автоматической системы охраны периметров с использованием волоконно-оптических датчиков. Предложен новый метод позволяющий преодолеть ряд недостатков известные методы оптической интерферометрии и рефлектометрии, а также волоконные решетки Брэгга, которые требуют достаточно дорогостоящих структурных компонентов АСКК и специфического программного обеспечения на основе искусственного интеллекта. Формируется перспектива создания приемлемых по цене АСКК отечественного производства, а также волоконно-оптических датчиков для различных отраслей промышленности. Предлагаемая АСКК может стать альтернативой для замены устаревших систем охраны энергетических объектов, использующих электрические сигналы, при этом будет полностью исключаться блокировка и подавление специальными средствами.

### **Литература**

1. Cable for 2 million tenge stolen in Astana. Available at: <https://365info.kz/2016/04/kabel-na-2-mln-tenge-ukrali-v-astane>.
2. Police detained suspected cable stealing in the amount of 1.5 million tenge. Available at: <https://astana.gov.kz/ru/news/news/3724>.

3. All rights reserved. Use an active reference to [inform.kz](https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-v-krazhe-kabelya-na-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-nur-sultane_a3782959) [https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-v-krazhe-kabelya-na-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-nur-sultane\\_a3782959](https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-v-krazhe-kabelya-na-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-nur-sultane_a3782959)
4. Perimeter detection tools based on the "Voron" technology. Available at: <https://www.grand-prix.ru/upload/iblock/73e/voron.pdf>
5. Yurchenko A, Mekhtiyev A, Bulatbayev F, Neshina Y, Alkina A 2018 The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. Russian Journal of Nondestructive Testing 54(7) (528)-(533) doi.org/10.1134/S1061830918070094
6. Куликов А.В. Волоконно-оптическая система охраны периметра на брэгговских решетках, как перспективный метод мониторинга безопасности объекта. Ползуновский Альманах . 2010. №2 pp. 274-278
7. Иванов И В. 200 Охрана периметров-2 (Москва, Паритет граф).
8. Русанов Ю.А. Технологии «Ворон» для охраны периметров аэропортов. "Транспортная безопасность и технологии" №2 (33) 2013
9. Лавриненко А.В. Периметровые средства обнаружения: современное состояние // Специальная техника. 2001. № 5
10. Введенский Б Волоконно-оптические сенсоры в системах охраны периметра // Мир и безопасность. 2006. Vol.4-5
11. Свирский Ю. Рынок периметровых средств охранной сигнализации на пороге 3-го тысячелетия // Системы безопасности. 2001. № 38
12. Mekhtiyev A.D, Yurchenko, A.V., Neshina, E.G., Al'kina, A.D., Madi, P.S. Physical Principles of Developing Pressure Sensors Using Refractive Index Changes in Optical Fiber Microbending. Russian physics journal.63 (2020)№2, С.: 323-331. doi: 10.1007/s11182-020-02038-y
13. Yugay V, Mekhtiyev A., Neshina, Y. Aubakirova, B., Aimagambetova, R., Kozhas, A., Alkina, A., Musagazhinov, M., Kovtun, A. Design of an information-measuring system for monitoring deformation and displacement of rock massif layers based on fiber-optic. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6 (5 (114)), 2021. Pp. 12–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244897>
14. The use of optical fiber for the creation of security systems for electrical cables of distribution networks of 0.4 kV / Yugay, V.V., Mekhtiyev, A.D., Sh Madi, P., Alkina, A.D., Neshina, E.G. // Journal of Physics: Conference Series, 2021. 2140(1), 012002.
15. Angelo Catalano, Francesco Antonio Bruno, Carlo Galliano, Marco Pisco, Giovanni Vito Persiano, Antonello Cutolo, Andrea Cusano. An optical fiber intrusion detection system for railway security // Sensors and Actuators A: Physical Volume 253, 2017 Pages 91-100 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.026>.
16. Juarez J and Taylor H 2007 Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters // Applied Optics 46(11) (1968)-(1971) doi.org/10.1364/AO.46.001968
17. Shih-Chu Huang and Hermann Lin 2006 Counting signal processing and counting level normalization techniques of polarization-insensitive fiber-optic Michelson interferometric sensors // Applied Optics 45(35) (8832)-(8838) doi.org/10.1364/AO.45.008832.
18. Polyakov A, Ksenofontov M 2007 Frequency fiber-optical alarm system // International Conference on Laser, Applications and Technologies Minsk, 28 May-1 June p. 93.
19. Iqbal M, Fathallah H, Belhadj N 2011 Optical fiber tapping: methods and precautions Proc. of HONET (164)-(168) doi:10.1109/HONET.2011.6149809.
20. Peng Y, Sun Z, Du S et al.: 2011 Propagation of all-optical crosstalk attack intransparent optical networks, Opt. Eng., 50(8), p. 085002 doi: 10.1117 / 1.3607412
21. Winzer P, Gnauck A, Konczykowska A et al.: 2011 Penalties from in-band crosstalk for advanced optical modulation formats. Proc. European Conf. on Optical Communication (ECOC), paper Tu.5.B. 7 doi.org/10.1364/ECOC.2011.Tu.5.B.7
22. Bruno G, Camera M M 2014 Securing optical monitoring ports of transmission network elements'. Proc. Fotonica AEIT Italian Conference Of Photonics Technologies pp.1-3
23. [https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial\\_root.html](https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html)
24. Сидорова, А. В. Python как инструмент оптимизации режима ГЭС в составе ЭЭС / А.В. Сидорова, А. А. Черемных, А. Г. Русина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 2(50). – С. 119-132.
25. Аппаратно-программный комплекс для контроля смещения бортов карьеров / П. Ш. Мадди, А. Д. Алькина, А. В. Юрченко [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 3(55). – С. 126-143. – EDN AEKTWN.
26. Доступно по: [https://www.w3schools.com/python/matplotlib\\_pyplot.asp](https://www.w3schools.com/python/matplotlib_pyplot.asp)
27. Доступно по: <https://python-scripts.com/tkinter-introduction>



### Авторы публикации

**Алькина Алия Даулетхановна** - магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и безопасность» некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Республика Казахстан.

**Юрченко Алексей Васильевич** – д-р техн. наук, профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета, профессор Томского государственного университета, г. Томск, Россия.

**Мехтиев Али Джаванирович** – канд. техн. наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Эксплуатация электрооборудования» Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан.

**Мадиди Перизат Шаймуратовна** - магистр электроэнергетики, старший преподаватель кафедры «Энергетические системы» некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (КарТУ), г. Караганда, Республика Казахстан.

**Аймагамбетова Раушан Жанатовна** - магистр стандартизации, метрологии и сертификации, заместитель руководителя департамента стратегического развития и науки Казахстанского института стандартизации и метрологии Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции, г. Астана, Республика Казахстан.

### References

1. *Cable for 2 million tenge stolen in Astana.* Available at: <https://365info.kz/2016/04/kabel-na2-mln-tengeukrali-v-astane>.
2. *Police detained suspected cable stealing in the amount of 1.5 million tenge.* Available at: <https://astana.gov.kz/ru/news/news/news/3724>.
3. *All rights reserved.* Use an active reference to [inform.kz](https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-vkrazhe-kabelna-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-sulnurtane_a3782959) [https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-vkrazhe-kabelna-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-sulnurtane\\_a3782959](https://www.inform.kz/en/podozrevaemye-vkrazhe-kabelna-devyat-mln-tenge-zaderzhany-v-sulnurtane_a3782959)
4. *Perimeter detection tools based on the «Voron» technology.* Available at: <https://ww.grand-prix.ru/upload/iblock/73e/voron.pdf>
5. Yurchenko A, Mekhtiyev A, Bulatbayev F, Neshina Y, Alkina 2018 The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018;54(7):(528) -(533) doi.org/10.1134/S1061830918070094
6. Kulikov AB. Fiber Optic Perimeter Protection System on Bragg Grids as a promising method of site security monitoring. *Polzunovsky Almanac*. 2010. pp. 274-278
7. Ivanov IB. *Perimeter protection-2* (Moscow, Parity Count).
8. Rusanov YA. Technologies «Vorontm» for perimeter protection of airports. *Transport Security and Technology*. 2020;2 (33).
9. Lavreinenko AB. *Perimeter detection equipment: current state*. Special equipment 2001.V.5.
10. Introduced B. Fiber Optic Sensors in Perimeter Protection Systems. *Peace and Security*. 2006. V.4-5
11. Svir Yu 2001 Market of perimeter alarm devices at the threshold of the 3rd millennium. *Security systems*. 2001. V.38
12. Mekhtiyev AD, Yurchenko AV, Neshina EG, et al. *Physical Principles of Developing Pressure Refs Using Ractive Index Changes in Optical Fiber Microbending*. *Russian physics journal*. 63 (2020) 2: 323-331 doi: 10.1007/s11182-020-02038-y
13. Yugay V, Mekhtiyev A, Neshina Y, et al. System of information-monitoring deformation and displacement of rock massif layers based on fiber-optic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021;6(5(114)):12–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244897>
14. Yugai VV, Mehdiyev AD., W Madi. *The use of optical fiber for the creation of security systems for electrical cables of distribution networks of 0.4 kV*. *Journal of Physics: Series*, 2021, 2140, 2002.)

15. Angelo Catalano, Francesco Antonio Bruno, Carlo Galliano, Marco Pisco, Giovanni Vito Persiano, Antonello Cutolo, Andrea Cusano. Optical Fiber Penetration Detection System for Railway Safety. *Sensors and Actuators A*: 2017;253:91-100 <https://doi.org/10.1016/j.sna.11.026>
16. Juarez J and Taylor H 2007 Field Trials of Distributed Fiber Optic Intrusion Sensor System for Long Perimeter. *Applied Optics* 46(11) (1968)-(1971) [doi.org/10.1364/AO.46.001968](https://doi.org/10.1364/AO.46.001968)
17. Shi-Chu Huang and Herman Lin 2006 Counting Signal Processing and Normalization Level Counting Methods of Polarization-Insensitive Fiber-Optic Interferometric Mithelson // *Applied Optics* 45(35) (8832)-(8838) [doi.org/10.1364/0032](https://doi.org/10.1364/0032).
18. Polyakov A, Xenophontov M 2007 Frequency Fiber Optic Signaling System. *International Conference on Laser, Applications and Technologies Minsk*, 28 May - 1 June pp. 93.19. Iqbal M, Fathallah H, Belhadj N 2011
20. Peng Y, Sun Z, Du S et al.: 2011 Spread of all-optical cross-attack of intragenic optical networks, *Opt. Eng.*, 50(8), p. 085002 Add: 10,1117 / 1,3607412
21. Winzer P, Gnauck A, Konczykowska A, etc.: 2011 Penalty from in-bandcrosstalk for advanced optical modulation formats. *Proc. European Conf. on Optical Communication (ECOC)*, paper Tu.5.B. 7 [doi.org/10.1364/ECOC.2011.Tu.5.B.7](https://doi.org/10.1364/ECOC.2011.Tu.5.B.7)
22. Bruno G, Camera M M 2014 Provision of optical ports monitoring elements transmission network. *Pr. Fotonica AEIT Italian conference Of Photonics Technologies* p.1-323. [https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial\\_root.html](https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html)
24. Sidorova AV, Cheremnykh AG, Rusin AG. Python as a tool to optimize the regime of hydroelectric power plants in the UES. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2021;13:2(50):119-132.
25. Hardware and software for controlling the displacement of the sides of the quarries / P.S. Madi, A.D. Alkin, A.V. Yurchenko [et al.]. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2022;14:3(55):126-143. EDN AEKTWH.
26. Available at: [https://www.w3schools.com/python/matplotlib\\_pyplot.asp](https://www.w3schools.com/python/matplotlib_pyplot.asp)
27. Available at: <https://python-scripts.com/tkinter-introduction>

#### **Authors of the publication**

**Aliya D. Alkina** - Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Republic of Kazakhstan.

**Alexey V. Yurchenko** - National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk State University, Tomsk, Russia.

**Ali D. Mekhtiyev** - Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Republic of Kazakhstan.

**Perizat Sh. Madi** - Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Republic of Kazakhstan.

**Raushan Zh. Aimagambetova** - Ministry of Trade and Integration, Astana, Republic of Kazakhstan.

**Получено** 20.02.2023г

**Отредактировано** 27.02.2023г

**Принято** 09.03.2023г

УДК 621.314

## ПАССИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ГАРМОНИК В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Боярская<sup>2</sup> Н.П., Довгун<sup>1</sup> В.П., Егоров<sup>1</sup> Д.Э., Синяговский<sup>1</sup> А. Ф.

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Красноярский государственный аграрный университет,  
г. Красноярск, Россия

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Основной причиной ухудшения качества электрической энергии в сетях различных уровней напряжения являются значительное увеличение доли нелинейных нагрузок, вызывающих гармонические искажения токов и напряжений. Массовое использование нелинейных нагрузок вызывает искажения формы токов и напряжений. Серьезной проблемой становится проникновение высших гармоник в сети высокого напряжения. **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – разработка процедуры проектирования пассивных фильтров, ограничивающих проникновение гармоник тока, создаваемых нелинейными нагрузками, во внешние сети. Для уменьшения стоимости фильтр подключается к обмотке низкого напряжения трехобмоточного трансформатора. **МЕТОДЫ.** Предложенный метод основан на использовании теории синтеза реактивных двухполюсников. Рассмотрены новые конфигурации пассивных фильтров, представляющие комбинации канонических структур реактивных двухполюсников и позволяющие включить в состав фильтра индуктивность обмотки трансформатора. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что в процессе реализации можно варьировать конфигурацию фильтра и частоты подавляемых гармоник, выбирая подходящую схему реактивного двухполюсника. С помощью предложенного метода проектирования получены новые варианты пассивных фильтров, подключаемых к обмотке низкого напряжения трехобмоточного трансформатора. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработан метод расчета пассивных фильтров, обеспечивающих ослабление гармоник, проникающих во внешние сети высокого напряжения. Предложены новые конфигурации фильтров, позволяющие включить в их состав индуктивность обмотки трансформатора, к которой подключен фильтр. Рассмотренная схема фильтрации может служить эффективным и экономичным средством ограничения проникновения гармоник в сети различных уровней напряжения.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии; гармоники; силовые фильтры.

**Для цитирования:** Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Синяговский А.Ф. Пассивные фильтры для компенсации гармоник в линиях электропередачи высокого напряжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т.15. №1 (57). С. 144-151.

## PASSIVE FILTERS FOR HARMONIC COMPENSATION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION SYSTEMS

NP. Boyarskaya<sup>2</sup>, VP. Dovgun<sup>1</sup>, DE. Egorov<sup>1</sup>, AF. Sinjagovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** *RELEVANCE.* The increasing implementation of nonlinear loads has led to increased injection of harmonic currents into transmission systems. The penetration of harmonic currents into transmission systems is becoming a serious issue. **THE PURPOSE.** This paper presents a new procedure for designing passive filters, which provide attenuation of harmonics penetrating high-voltage transmission systems. To reduce costs and simplify maintenance, the filter is connected to the tertiary winding of the substation transformer. **METHODS.** The method for passive filters design, based on the theory of passive LC-one-port synthesis, is described. The advantage of the proposed approach is that the filter configuration can be varied during the implementation process by choosing the appropriate canonical form of the LC-one-port.

*RESULTS. A new filter configurations including the inductance of the transformer winding as a component are proposed. The advantage of the proposed approach is that the filter configuration can be varied during the implementation process by choosing the appropriate canonical form of the LC-one-port. Performance of the filter is evaluated through computer simulation.*

*CONCLUSION. A design procedure for harmonic filters design, based on the theory of passive LC-one-port synthesis, is considered. New passive filter configurations are proposed including the inductance of the tertiary transformer winding as a component. Simulation has shown that the proposed filtering scheme is an efficient and economical tool for attenuating harmonics penetrating high voltage transmission systems*

**Key words:** power quality; harmonics; power filter.

**For citation:** Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, Sinjagovsky AF. Passive filters for harmonic compensation in high-voltage transvission systems. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):144-151.

### **Введение**

Проблема обеспечения качества электроэнергии, вызванная широким распространением нелинейных нагрузок, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы, приобрела в последние годы большое значение. Доля нелинейных нагрузок неуклонно растёт из-за возрастающего использования силовой электроники в системах электроснабжения промышленных и муниципальных потребителей [1 – 8].

Массовое использование нелинейных нагрузок вызывает искажение токов и напряжений не только в распределительных, но и в магистральных сетях высокого напряжения [2, 5, 7, 9]. Искажения формы кривых токов и напряжений приводят к увеличению потерь мощности, ускоренному старению изоляции и вызванному этим сокращению срока службы электрооборудования. Увеличиваются капитальные вложения и эксплуатационные расходы, связанные с преждевременной заменой оборудования и необходимостью проводить организационные и технические мероприятия по улучшению качества электроэнергии.

Основным средством компенсации высших гармоник в электрических системах высокого напряжения являются пассивные фильтры гармоник (ПФГ) [5, 7, 9-13]. Использование пассивных фильтров остаётся важным в связи с их высокой надёжностью, низкой стоимостью и простотой эксплуатации. Однако установка ПФГ в сетях 110 или 220 кВ требует больших затрат. Для снижения стоимости и упрощения обслуживания фильтры целесообразно включать на пониженное напряжение.

Во многих случаях трансформаторы, установленные на подстанциях, имеют третью обмотку. Вариант подключения ПФГ к обмотке низкого напряжения трехобмоточного трансформатора рассмотрен в статье [9]. Это позволяет значительно уменьшить стоимость фильтра. Однако при таком включении частотные характеристики пассивных фильтров традиционной структуры искажаются из-за влияния индуктивностей обмоток трансформатора. Необходимы принципиально иные конфигурации ПФГ, позволяющие учесть влияние индуктивности обмоток трансформатора и внешней сети на характеристики фильтра.

В [9] рассмотрена итеративная процедура расчета пассивных фильтров, позволяющая уменьшить искажения частотных характеристик, вносимых индуктивностью трансформатора. Фильтры осуществляют подавление 3, 5, 7, 9 и 11 гармоник. Структура фильтров и частоты подавляемых гармоник фиксированы и в процессе расчета не изменяется. Целью настоящего исследования является разработка общего метода расчета пассивных фильтров, подключаемых к третьей обмотке трансформатора. Предлагаемый метод основан на использовании классической теории синтеза реактивных двухполюсников и позволяет включить индуктивность третьей обмотки трансформатора в схему фильтра. Отличие предлагаемого подхода заключается в том, что в процессе реализации можно варьировать конфигурацию фильтра и частоты подавляемых гармоник, выбирая подходящую схему реактивного двухполюсника.

### **Метод синтеза пассивных фильтров**

Эквивалентная схема сети с трехобмоточным трансформатором на частоте  $k$ -й гармоники показана на рисунке 1. Нелинейную нагрузку моделирует источник тока  $J_k$ .

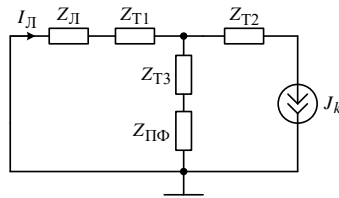


Рис. 1. Эквивалентная схема сети

Fig. 1. Equivalent network diagram

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 1  $Z_{T1} = R_{T1} + jX_{T1}$ ,  $Z_{T2} = R_{T2} + jX_{T2}$ ,  $Z_{T3} = R_{T3} + jX_{T3}$  – импедансы обмоток трансформатора;  $Z_L = R_L + jX_L$  – импеданс линии электропередачи;  $Z_{ПФ} = R_{ПФ} + jX_{ПФ}$  – импеданс пассивного фильтра.

Ток  $k$ -й гармоники, передаваемой во внешнюю сеть

$$I_L = \frac{Z_{T3}(j\omega_k) + Z_{ПФ}(j\omega_k)}{Z_L(j\omega_k) + Z_{T1}(j\omega_k) + Z_{T3}(j\omega_k) + Z_{ПФ}(j\omega_k)} J_k. \quad (1)$$

Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Согласно формуле (1) коэффициент передачи токов гармоник во внешнюю сеть имеет минимальное значение на частотах, при которых реактивное сопротивление

$$X_{T3} + X_{ПФ} = 0.$$

Таким образом, для исключения искажений частотных характеристик при расчете фильтра необходимо учитывать влияние индуктивности обмотки трансформатора. Наиболее простой путь – включение ее в схему фильтра.

Рассмотрим основные положения теории синтеза пассивных цепей, необходимые для получения новых конфигураций ПФГ. Известно, что входные сопротивления и проводимости  $LC$ -двухполюсников являются дробно-рациональными функциями комплексной частотной переменной  $p$  с простыми нулями и полюсами, ограниченными осью  $j\omega$ . Функция входного сопротивления  $LC$ -двухполюсника определяется выражением [13, 14]

$$Z(p) = H \frac{\prod_{i=1}^n (p^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (p^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(p)}{D(p)}. \quad [13, 14] \quad (2)$$

Здесь  $\omega_{zi}$  и  $\omega_{pj}$  – соответственно нули и полюсы входного сопротивления.

Постоянную  $H$  называют коэффициентом нормирования.

Процедура синтеза пассивного двухполюсника основана на разложении функции  $Z(p)$  или  $Y(p)$  на сумму элементарных слагаемых или в цепную дробь. Каждое слагаемое реализуется простейшей последовательной или параллельной цепью. Эти конфигурации пассивных двухполюсников получили название канонических схем Фостера и Кауэра.

Первая схема Фостера соответствует разложению функции входного сопротивления  $LC$ -двухполюсника на сумму простых дробей [13, 14]:

$$Z(p) = \frac{k_0}{s} + k_\infty p + \sum_{j=1}^n \frac{k_j p}{p^2 + \omega_{pj}^2}. \quad [13, 14] \quad (3)$$

Здесь  $k_\infty = \left. \frac{Z(p)}{p} \right|_{p \rightarrow \infty}$  – вычет, соответствующий полюсу в бесконечности.

Вычеты в полюсах  $\omega_{pj}$  находят с помощью формулы

$$k_j = \left. \frac{(p^2 + \omega_{pj}^2)Z(p)}{p} \right|_{p^2 = -\omega_{pj}^2}. \quad [13, 14]$$

Формуле (3) соответствует последовательное соединение элементарных двухполюсников (рис. 2). Индуктивный элемент  $L_1$  реализует полюс входного

сопротивления в бесконечности, а емкостный элемент  $C_1$  реализует полюс  $Z(p)$  в начале координат, при  $p = 0$ . Слагаемым второго порядка соответствуют параллельные колебательные контуры. Параметры контуров вычисляются по формулам

$$C_j = \frac{1}{k_j}; \quad L_j = \frac{k_j}{\omega_{pj}^2}. \quad [13]$$

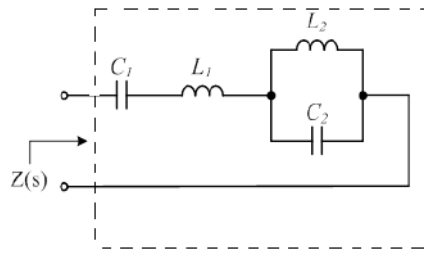


Рис. 2. Первая каноническая схема Фостера [13, 14] Fig. 2. Foster's First Canonical Form [13, 14]

Вторая схема Фостера основана на разложении функции входной проводимости реактивного двухполюсника:

$$Y(p) = \frac{k_0}{p} + k_\infty p + \sum_{i=1}^n \frac{k_i p}{p^2 + \omega_{zi}^2}. \quad [13, 14] \quad (4)$$

Одиночный индуктивный элемент реализует полюс  $Y(p)$  в начале координат, а емкостный элемент – полюс в бесконечности. Вычет  $k_i$  определяется по формуле

$$k_i = \frac{(p^2 + \omega_{zi}^2)Y(p)}{p} \Big|_{p^2 = -\omega_{zi}^2}. \quad [13, 14] \quad (5)$$

Формуле (4) соответствует вторая каноническая схема Фостера, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты  $\omega_{zi}$  (рис. 3).

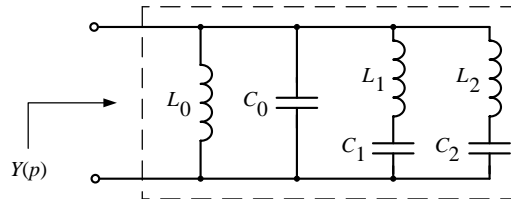


Рис. 3. Вторая каноническая схема Фостера [13, 14] Fig. 3. Foster's Second Canonical Form  
Значения элементов  $i$ -го колебательного контура находятся по формулам:

$$L_i = \frac{1}{k_i}; \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2}. \quad [13] \quad (6)$$

Первую и вторую канонические схемы Кауэра получают, раскладывая входную функцию в цепную дробь. Такому разложению соответствует двухполюсники лестничной структуры (рис. 4 и 5).

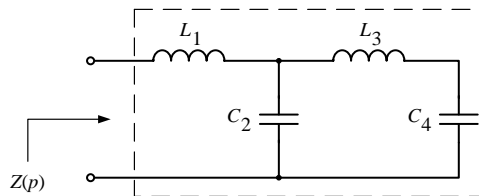


Рис. 4. Первая каноническая схема Кауэра [13, 14] Fig. 4. Cauer's First Canonical Scheme

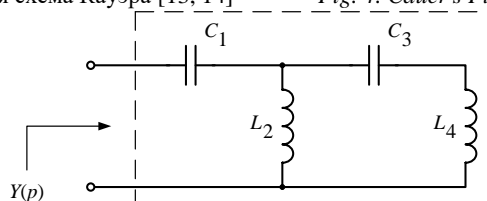


Рис. 5. Вторая каноническая схема Кауэра [13, 14]

Fig. 5. Cauer's Second Canonical Scheme

Нетрудно заметить, что пассивный фильтр традиционной структуры представляет собой реализацию в виде второй схемы Фостера. Новые варианты пассивных фильтров можно получить, выбирая другие канонические реализации реактивных двухполюсников либо их комбинации. В рассматриваемом случае целесообразно использовать первые схемы Фостера и Кауэра (рис. 2 и 4 соответственно). Эти структуры содержат одиночный последовательный индуктивный элемент и за счет этого позволяют включить индуктивность третьей обмотки трансформатора в состав фильтра.

Процедура проектирования фильтра включает следующие шаги.

- На первом шаге выполняется анализ спектрального состава несинусоидальных напряжений и токов, генерируемых нелинейными нагрузками, и формируется модель системы сеть – пассивный фильтр [13].

- На основе полученных данных формулируются требования к операторному сопротивлению фильтра  $Z_{ПФ}(p)$ . Для упрощения расчетов целесообразно использовать передаточную функцию, нормированную к частоте основной гармоники. Полюсы определяют частоты, на которых модуль  $Z_{ПФ}(j\omega) = 1$ .

- Осуществляется синтез реактивного четырехполюсника, реализующего сопротивление  $Z_{ПФ}(p)$ , и рассчитываются нормированные значения элементов фильтра  $C_i^*$ ,  $L_i^*$ .

- Производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники:  $C_i = C_i^*/\omega_0$ ,  $L_i = L_i^*/\omega_0$ . Частоту денормирования  $\omega_0$  следует выбирать на 4-5% меньше частоты основной гармоники. Это позволит учесть эффект уменьшения емкости конденсаторов в результате старения изоляции.

- Осуществляется денормирование элементов фильтра по уровню сопротивления третьей обмотки трансформатора.

Предлагаемая процедура расчета дает возможность учитывать индуктивность обмотки трансформатора и обеспечивает требуемую настройку фильтра.

#### Результаты расчета предлагаемого фильтра

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим примеры пассивных фильтров, полученных с помощью предложенного метода. Необходим фильтр, обеспечивающий ослабление 5 и 7-й гармоник, генерируемых трехфазной нелинейной нагрузкой.

Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте основной гармоники, имеет вид

$$Z(s) = \frac{(p^2 + 25)(p^2 + 49)}{p(p^2 + 36)}. \quad [\text{авторы}]$$

Варианты реализации фильтра в виде канонических схем Фостера и Кауэра показаны на рис. 6, 7 соответственно.

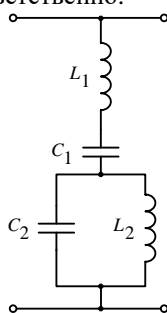


Рис. 6. Схема Фостера [авторы]

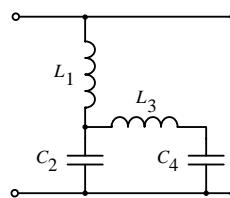


Fig. 6. Foster Scheme

Рис. 7. Схема Кауэра [авторы]

Fig. 7. Cauer Scheme

Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Нормированные значения элементов схемы на рис. 7:  $L_1 = 1$  Гн,  $C_2 = 0,026$  Ф,  $L_3 = 10,11$  Гн,  $C_4 = 0,0031$  Ф. После денормирования получим:  $L_1 = 161$  мГн,  $C_2 = 1,68$

мкФ,  $L_3 = 1,63$  Гн,  $C_4 = 0,2$  мкФ. Элемент  $L_1$  представляет индуктивность обмотки низкого напряжения трансформатора. Включение индуктивности обмотки низкого напряжения в схему фильтра позволяет исключить искажения частотных характеристик и обеспечить эффективное ослабление гармоник.

На рис. 8 показана частотная характеристика коэффициента передачи токов в магистральную сеть после установки фильтра.

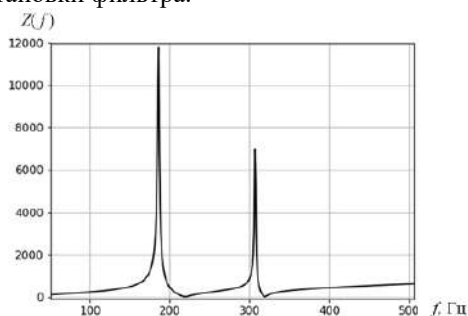


Рис. 8. Частотная характеристика коэффициента передачи токов после установки фильтра *Fig. 8. Frequency response of the current transfer coefficient after filter installation.*

Источник: составлено автором.  
Source: compiled by the author.

В таблице 1 приведены значения гармоник тока во внешней сети (в процентах от основной гармоники) до и после установки рассчитанного фильтра.

Значения гармоник тока во внешней сети  
*Current harmonic values in external network*

Вариант	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
Без фильтра	17	12	8	5
С фильтром	1,7	0,85	2,8	1,9

Результаты моделирования показывают, что предлагаемый фильтр эффективно ослабляет наиболее мощные 5 и 7-ю гармоники. Для ослабления высокочастотных гармоник ( $n > 7$ ) необходимо увеличить порядок фильтра.

### Заключение

В статье рассмотрена процедура расчета пассивных фильтров, обеспечивающих ослабление гармоник, проникающих в сети высокого напряжения. Для уменьшения стоимости и упрощения обслуживания фильтр подключается к обмотке низкого напряжения трехобмоточного трансформатора. Научная значимость исследования заключается в том, что предложен общий метод расчета пассивных фильтров, подключаемых к трехобмоточным трансформаторам, основанный на использовании теории синтеза реактивных двухполюсников. С его помощью получены новые структуры ПФГ, позволяющие включить в их состав индуктивность обмотки трансформатора, к которой подключен фильтр. Это позволяет исключить искажения характеристик, вызванные влиянием трансформатора. Анализ характеристик фильтров показал, что они могут служить эффективным и экономичным средством, ограничивающим проникновение гармоник в сети различных уровней напряжения.

### Литература

1. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению // Коверникова Л. И., Суднова В. В., Шамонов Р. Г. и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017 – 217 с.
2. Arrilaga J., Bradley D. A., Bodger P. S. Power system harmonics. New York, Wiley, 2003.
3. McBee, K. D., Simoes M. G. Evaluating the long-term impact of a continuously increasing harmonic demand on feeder-level voltage distortion. IEEE transactions on industry applications, Vol. 50, No. 3, 2014, pp. 2142-2149.



4. Salles J., Chen W., Xu W., Freitas W., Mazin H. Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads – part I, IEEE transactions on power delivery, Vol. 27, No. 4, 2012, pp. 1937-1946.
5. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
6. Семенов А. С., Егоров А. С., Харитонов Я. С., Федоров О. В. Оценка электромагнитной совместимости высоковольтных преобразователей частоты в электротехнических комплексах. Вестник Казанского государственного энергетического университета. Т. 11, № 4, 2019, с. 64-75.
7. Dovgun V., Egorov D., Boyarskaya N., Novikov V. Passive harmonic filters for high voltage transmission systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012052 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/643/1/012052 p. 1-7.
8. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
9. Ding T., Xu W. A filtering scheme to reduce the penetration of harmonics into transmission systems. IEEE transactions on power delivery, Vol. 31, No. 1, 2016, pp. 59-66.
10. Bagheri P., Xu W. A technique to mitigate zero-sequence harmonics in power distribution system. IEEE transactions on power delivery, vol. 29, 2014, no. 1, 204, pp. 215–223.
11. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
12. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE transactions on industry applications. 2011, Vol. 47, No 2, pp. 973-983.
13. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
14. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров и др.; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
15. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 816 с.

#### Авторы публикации

**Боярская Наталья Петровна** – кан. техн. наук, доцент кафедры ТОЭ, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: [bnp2006dvg@mail.ru](mailto:bnp2006dvg@mail.ru)

**Довгун Валерий Петрович** – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет. E-mail: [vdovgun55@mail.ru](mailto:vdovgun55@mail.ru), [vdovgun@sfu-kras.ru](mailto:vdovgun@sfu-kras.ru).

**Егоров Денис Эдуардович** – канд. техн. наук, доцент Сибирского федерального университета. E-mail: [denis.egorov.90@br.ru](mailto:denis.egorov.90@br.ru), [deegorov@sfu-kras.ru](mailto:deegorov@sfu-kras.ru).

**Синяговский Артем Феликсович** – канд. техн. наук, доцент кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирского федерального университета. E-mail: [asinяgovskiy@sfu-kras.ru](mailto:asinяgovskiy@sfu-kras.ru).

#### References

1. Kovernikova LI, Sudnova VV, Shamonov RG. et al. *Katchestvo elektricheskoy energii: sovremennoe sostoyanie, problem i predlozheniya po ikh resheniyu*. Otv.red.N. I. Voropaiv. – Novosibirsk; Nauka, 2017 – 217 s.
2. Arrilaga J, Bradley D.A., Bodger P.S. *Power system harmonics*. New York, Wiley, 2003.

3. McBee, K.D., Simoes M.G. *Evaluating the long-term impact of a continuously increasing harmonic demand on feeder-level voltage distortion*. IEEE transactions on industry applications. 2014;50(3):2142-2149.
4. Salles J, Chen W, Xu W, et al. *Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads – part I*, IEEE transactions on power delivery. 2012;27(4):1937-1946.
5. Lange A, Redlarski G. *Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces*. – *Energies*, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
6. Semenov AS, Egorov AS. Kharitonov YaS, Fedorov OV. *Otchenka elektromagnitnoy sovmestimosti vysokovoltyykh preobrazovateley tchastoty v elektrotekhnicheskikh kompleksakh*. *Vestnikh Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. T.11.N 4, 2019,s.64-75.
7. Dovgun V., Egorov D., Boyarskaya N., Novikov V. *Passive harmonic filters for high voltage transmission systems*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012052 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/643/1/012052 p. 1-7.
8. Egorov DE, Dovgun VP, Boyarskaya NP. et al. *Korreksiya koeffitsienta moshnosti v sistemakh elektrosnabzheniya s mnogofaznymi nelineynymi nagruzkami*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020;22:3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
9. Ding T, Xu WA. *Filtering scheme to reduce the penetration of harmonics into transmission systems*. IEEE transactions on power delivery. 2016;31(1):59-66.
10. Bagheri P, Xu W. *A technique to mitigate zero-sequence harmonics in power distribution system*. IEEE transactions on power delivery. 2014;29(1):215–223.
11. Nassif AD, Xu W., Freitas W. *An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications*. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
12. Badrzadeh D, Smith K, Wilson R. *Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant*. IEEE transactions on industry applications. 2011;47(2):973-983.
13. Li X, Xu W, Ding T. *Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems*. – IEEE transactions on power delivery. 2017;32(1):117-124.
14. Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, et al. *Sintes filtrokompensiruyushikh ustroystv dlya sistem elektrosnabzheniya: kollektivnaya monografiya / pod red. V.P. Dovguna – Krasnoyarsk:Sib. feder. un-t, 2014. – 192 s.*
15. Ulakhovich DA. *Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh tsepey*:– St.Pb.: BHV-Peterburg, 2019.- 816 s.

#### **Authors of the publication**

**Nataliya P. Boyarskaya** – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia.

**Valery P. Dovgun** – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Denis E. Egorov** – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Artiom F. Sinyagovsky** – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Получено** **02.03.2023г**

**Отредактировано** **10.03.2023г**

**Принято** **13.03.2023г**

# РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 620.9:338.516.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТАРИФНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОКОМПАНИЙ РФ

Колибаба В.И., Тарасова А.С.

Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново, Россия  
tarasova-as@mail.ru

**Резюме:** Устойчивое функционирование и развитие энергокомпаний России – это важное направление обеспечения технологического суверенитета государства. Государственная тарифная политика влияет на функционирование и развитие отечественных предприятий электроэнергетического сектора. Тариф на электроэнергию для конечного потребителя включает регулируемую и нерегулируемую составляющие, что влияет на устойчивое поступление выручки от продаж генерирующих, сетевых и сбытовых энергокомпаний. **ЦЕЛЬ.** Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения темпов устойчивого развития современных энергокомпаний в условиях сохранения баланса интересов генерирующих, сетевых и сбытовых энергетических предприятий. Исследование направлено на оценку структуры тарифа на электроэнергию для конечных потребителей с точки зрения реализуемой государственной политики тарифного регулирования и их влияния на устойчивость функционирования и развития энергокомпаний РФ. **МЕТОДЫ.** Рассмотрены методы государственного регулирования в электроэнергетике, а также методы регулирования тарифов в отрасли. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проанализирована структура тарифа на основе экономических данных всех гарантирующих поставщиков России. Представлены диапазоны значений составляющих тарифа на электроэнергию по генерирующим, сетевым и сбытовым энергокомпаниям. Выявлены тенденции по динамике отпускного и сетевого тарифа в зависимости от классов напряжения. Сделан вывод о сохранении устойчивости энергокомпаний России вне зависимости от применяемого государственного тарифного регулирования и повышении рисков неплатежеспособности для промышленных потребителей ввиду возможного завышения необходимой валовой выручки энергопредприятий в ряде регионов России. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Дробление тарифа на электроэнергию вследствие проведенных преобразований в электроэнергетической отрасли обуславливает конфликт интересов между различными субъектами конкурентного рынка электроэнергии и мощности России, что в перспективе может создать проблемы устойчивого функционирования и развития энергокомпаний.

**Ключевые слова:** генерирующие энергокомпании; структура тарифа; оптовый рынок электроэнергии и мощности; устойчивое развитие; электроэнергетика; сбытовая надбавка.

**Для цитирования:** Колибаба В.И., Тарасова А.С. Оценка влияния тарифного регулирования на устойчивое функционирование и развитие энергокомпаний РФ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т.15. №1 (57). С. 152-172.

## ASSESSMENT OF THE TARIFF REGULATION IMPACT ON THE SUSTAINABLE FUNCTIONING AND DEVELOPMENT OF ENERGY COMPANIES OF THE RUSSIAN FEDERATION

VI. Kolibaba, AS. Tarasova

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia  
tarasova-as@mail.ru

**Abstract:** The sustainable development of Russian energy companies is an important direction in ensuring the technological sovereignty of our country. The state tariff policy affects the

*functioning and development of domestic enterprises in the electric power sector. The electricity tariff for the end consumer includes a regulated and non-regulated component, which affects the steady receipt of revenue from the sales of generating, grid and retail energy companies.* **PURPOSE.** *The relevance of the work is due to the need to study the pace of sustainable development of modern energy companies in conditions of maintaining a balance of interests of generating, grid and distribution energy enterprises. The study is aimed at assessing the structure of the electricity tariff for end consumers from the point of view of the implemented state policy of tariff regulation and their impact on the sustainability of the operation and development of energy companies in the Russian Federation.* **METHODS.** *The methods of state regulation in the electric power industry, as well as methods of regulating tariffs in the industry are considered.* **RESULTS.** *The structure of the tariff is analyzed on the basis of economic data of all guaranteeing suppliers in Russia. The ranges of values of the components of the tariff for electricity for generating, grid and retail energy companies are presented. Trends in the dynamics of the selling and network tariffs depending on the voltage classes are revealed. The conclusion is made about the stability of Russian energy companies regardless of the applied state tariff regulation and the increase in the risks of insolvency for industrial consumers due to the possible overestimation of the required gross revenue of energy enterprises in a number of regions of Russia.* **CONCLUSION.** *The fragmentation of the electricity tariff due to the reforms carried out in the electricity industry caused a conflict of interest between various subjects of the competitive electricity and capacity market in Russia, which may create problems for the sustainable functioning and development of energy companies in the future.*

**Keywords:** *generating energy companies; tariff structure; wholesale electricity and capacity market; sustainable development; electric power industry; sales margin.*

**For citation:** Kolibaba VI, Tarasova AS. Assessment of the tariff regulation impact on the sustainable functioning and development of energy companies of the Russian Federation. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15(57):152-172.

### **Введение**

Концепция технологического развития Российской Федерации до 2030 года определяет три основных направления развития – устойчивый технологический суверенитет, развитие технологий как фактора роста экономики и развития социальной сферы и технологическое обеспечение устойчивого функционирования производственных систем [1, 2].

Электроэнергетика является системообразующей отраслью Российской экономики и определяет эффективность функционирования многих промышленных и инфраструктурных объектов. Реформирование электроэнергетики России привело к серьезным структурным преобразованиям в отрасли, связанным с разделением функций генерации электроэнергии, ее транспортировки и сбыта.

Либерализация электроэнергетики предусматривала уменьшение государственного влияния и устранение монополизма в отрасли. Как отмечают специалисты [3,4,5], реформы 2000-х годов включали ослабление контроля над ценами и тарифами, снижение дотаций. В последнее время наблюдаются процессы обратной интеграции и усиление государственного контроля электроэнергетической отрасли. Существующая динамика роста цен на электроэнергию и действующие механизмы рынка позволяют генерирующим компаниям получать прибыль, не стимулируя их самостоятельно проводить модернизацию оборудования и повышать эффективность производства [6].

Основной целью данной научной работы является оценка структуры тарифа на электроэнергию для конечных потребителей, а также анализ структуры тарифа в условиях современной тарифной политики государства и степень их влияния на устойчивость функционирования и развития энергокомпаний РФ. Важным аспектом устойчивого развития современной генерирующей энергокомпании является оценка влияния регулируемых тарифов на формирование ценовых заявок на оптовом рынке электроэнергии и мощности России. В связи с этим, необходимо проанализировать деятельность субъектов электроэнергетического рынка и экономическую цепочку поставки электроэнергии от генерирующей компании до конечного потребителя.

### *Субъекты генерации оптового рынка электроэнергии и мощности России*

На оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) генерирующие компании предоставляют своим покупателям (сбытовым компаниям, гарантирующим поставщикам, крупным потребителям, экспортерам) два вида товара: электроэнергию и мощность. Новая модель электроэнергетики, а также взаимодействие различных субъектов энергорынка широко обсуждается различными учеными [7, 8, 14, 20].

Энергогенерирующий сектор в этой системе является первичным или стартовым звеном. Генерирующие компании вырабатывают электроэнергию и поставляют ее на оптовый рынок, где ее покупают крупные промышленные потребители, сбытовые компании и гарантирующие поставщики.

*В зависимости от способа выработки и потребляемых первичных ресурсов выделяют следующие виды энергогенерирующих активов:*

- Гидроэлектростанции (ГЭС) - используют в качестве источника энергии движение водных масс в русловых водотоках. Наша страна обладает богатым теоретическим потенциалом выработки энергии на гидрообъектах. Основная часть генерирующих активов сконцентрирована в Сибири и на Дальнем востоке. На долю гидроэнергетики приходится около 20% общей выработки электроэнергии в стране.

- Атомные электростанции (АЭС) - производство электроэнергии осуществляется с использованием внутренней энергии атома. Россия обладает технологией ядерной электроэнергетики полного цикла от добычи урановых руд (обладает разведанными запасами руд) до выработки электроэнергии. На долю АЭС приходится около 19% от общей выработки электроэнергии.

- Тепловые электростанции (ТЭС) – вырабатывают электрическую энергию за счёт преобразования химической энергии топлива в процессе сжигания в тепловую, а затем в механическую энергию вращения вала электрогенератора. Тепловые электростанции дают наибольший вклад в производство электроэнергии в России - примерно 60%, что вполне объяснимо богатыми запасами топливного сырья, используемого в процессе генерации. В качестве топлива используются: природный газ, уголь, реже — мазут.

На текущий момент доля энергогенерирующего сектора в капитализации всего фондового рынка РФ составляет около 3%. При этом данный сектор является крупнейшим в отрасли энергетики, его доля в общей капитализации энергетической отрасли составляет примерно 65%.

#### *Структура рынков в электроэнергетике*

Торговля электрической энергии на оптовом рынке осуществляется с использованием следующих основных рыночных механизмов:

- РСВ – рынок на сутки вперед
- БР – балансирующий рынок
- РД – рынок регулируемых договоров
- СДД – свободные договора купли-продажи электроэнергии.

*Рынок на сутки вперёд (РСВ)* – это маржинальный аукцион ценовых заявок на продажу и покупку электрической энергии, производимый на каждый час суток за сутки до момента реальной поставки (потребления) электрической энергии.

В рамках торговли на РСВ поставщики и покупатели подают ценовые заявки, в которых указывают, какой объём электрической энергии, в какой час и по какой цене они готовы поставить и купить соответственно. Эти заявки упорядочиваются для поставщиков - по возрастанию цены, а для покупателей - по убыванию цены. Таким образом, формируется «кривая предложения» и «кривая спроса» - строго по канонам классической экономической теории. На пересечении этих кривых определяется маржинальная цена, по которой все поставщики, подавшие ценовые заявки с указанием такой же или более низкой цены, а также все покупатели, подавшие заявку с указанием такой же или более высокой цены, продают и покупают электрическую энергию.

*Балансирующий рынок (БР)* - рынок отклонений в реальном времени. На балансирующем рынке происходит купля-продажа объёмов электрической энергии, которые потреблены (произведены) сверх плановых объёмов или не потреблённых (не произведённых) объёмов относительно плановых.

Участие покупателей электрической энергии на БР обязательно и необходимо в целях покупки/продажи объёмов электрической энергии в размере отклонений фактического почасового потребления от планового почасового потребления.

Основной механизм балансирующего рынка – конкурентный отбор заявок поставщиков электрической энергии и покупателей с регулируемой нагрузкой в режиме близком к реальному времени, исходя из минимизации стоимости удовлетворения возникшего спроса на электрическую энергию для актуальных системных условий.

*Рынок Регулируемых договоров (РД)* состоит из договоров, заключаемых субъектами ОРЭМ к числу покупателей которых относятся население или приравненные к ним категории. Цена в них фиксируется на 1 год.

*Рынок Свободных двусторонних договоров купли - продажи электрической энергии (СДД)* - сторонами в СДД выступают генератор и потребитель. Договорной ценой является

цена, согласованная между контрагентами. Они заключаются как на внебиржевом рынке, так и при заключении сделок на бирже.

*Розничный рынок электроэнергии* - это сфера обращения электрической энергии вне оптового рынка с участием ее потребителей.

В результате реформы у потребителя розничного рынка электроэнергии появилась возможность покупать электроэнергию у разных энергосбытовых организаций по свободным (нерегулируемым ценам). Кроме того, появился целый набор субъектов розничного рынка, а именно: гарантирующие поставщики электрической энергии, независимые энергосбытовые организации (ЭСО), территориальные сетевые организации, и т.д. Появилось многообразие юридических конструкций при организации электроснабжения потребителей: договор по типу электроснабжения, по типу купли-продажи с заключением прямого договора на передачу электроэнергии с сетевой организацией и т.д.

С 1 января 2011 года, в результате окончания процесса либерализации, весь объем потребленной электроэнергии и мощности, потребители, покупают по свободным нерегулируемым ценам. Нерегулируемая цена зависит от результатов торгов на ОРЭМ. Все отклонения (колебания цены) перераспределяются Гарантирующими поставщиками между потребителями. В части населения, электрическая энергия продается по регулируемым ценам - тарифам. Тарифы - регулируемые цены - утверждаются региональными органами исполнительной власти в области регулирования тарифов. ЭСО для своих потребителей приобретает электроэнергию у Гарантирующего поставщика и независимой генерации и вправе продавать по свободным ценам, которые будут устраивать как потребителя, так и саму ЭСО.

#### *Материалы и методы*

Ценообразование на розничных рынках напрямую зависит от формирования цены на оптовом рынке электроэнергии (мощности) [4, 5, 19]. Потребители на розничных рынках оплачивают электроэнергию по свободной (нерегулируемой) цене. Цена определяется по итогам каждого месяца и представляет собой сумму двух основных составляющих:

- средняя стоимость электроэнергии и мощности на ОРЭМ (публикуется Администратором торговой системы оптового рынка ежемесячно);
- бытовая надбавка гарантирующего поставщика, стоимость услуг по передаче электроэнергии, стоимость услуг инфраструктурных организаций.

С 1 апреля 2012 г. предельные уровни нерегулируемых цен на розничных рынках на территориях, объединенных в ценовые зоны оптового рынка, за соответствующий расчетный период рассчитываются гарантирующим поставщиком **по следующим ценовым категориям:**

- первая ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), учет которых осуществляется в целом за расчетный период;
- вторая ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), учет которых осуществляется по зонам суток расчетного периода;
- третья ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых в расчетном периоде осуществляется почасовой учет и стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу в одноставочном выражении;
- четвертая ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых в расчетном периоде осуществляется почасовой учет и стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу в двухставочном выражении;
- пятая ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых в расчетном периоде осуществляются почасовое планирование и учет и стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу в одноставочном выражении;
- шестая ценовая категория - для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых в расчетном периоде осуществляются почасовое планирование и учет и стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу в двухставочном выражении.

Предельные уровни нерегулируемых цен также дифференцируются **по уровням напряжения** в соответствии с дифференциацией применяемых при определении предельных уровней тарифов (ставок тарифов) на услуги по передаче электрической энергии:

1. Высокое напряжение;
2. Среднее первое напряжение;
3. Среднее второе напряжение;
4. Низковольтное напряжение.

Начиная с расчетного периода, в котором применяются сбытовые надбавки гарантирующих поставщиков, предельные уровни нерегулируемых цен дифференцируются **по группам (подгруппам) потребителей исходя из максимальной мощности** принадлежащих им энергопринимающих устройств согласно Актам разграничения балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности:

- менее 150 кВт;
- от 150 кВт до 670 кВт;
- от 670 кВт до 10 МВт;
- не менее 10 МВт.

Потребители, максимальная мощность энергопринимающих устройств которых в границах балансовой принадлежности менее 670 кВт, осуществляют выбор ценовой категории самостоятельно посредством уведомления гарантирующего поставщика в течение 1 месяца с даты принятия решения об установлении тарифов на услуги по передаче электрической энергии в соответствующем субъекте Российской Федерации (при этом выбранная ценовая категория применяется для расчетов за электрическую энергию (мощность) с даты введения в действие указанных тарифов на услуги по передаче электрической энергии).

Таким образом, структура конечной цены для потребителей включает несколько составляющих, в каждой из которых заинтересованы различные субъекты электроэнергетической отрасли: генерирующие, сетевые, сбытовые компании и инфраструктурные организации.

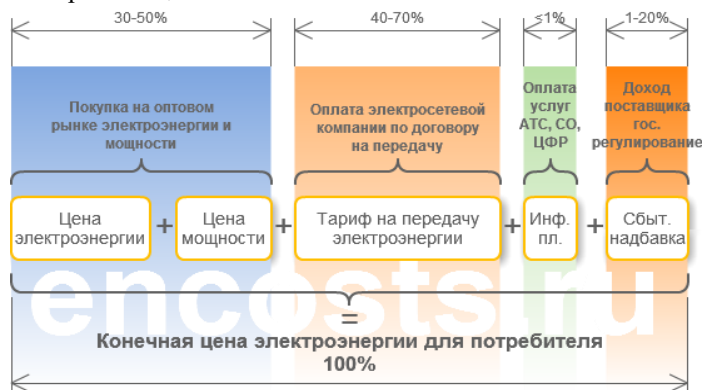


Рис. 1. Структура конечной цены электроэнергии Fig. 1. Structure of the electricity final price. Источник: [7], Source: [7].

Удельный вес составляющих варьируется в достаточно широком диапазоне с разбегом 20-30%. Необходимо проанализировать факторы, влияющие на изменение структуры тарифа, в региональном разрезе с учетом тарифной политики в части регулируемых и нерегулируемых тарифов. Особенно важным аспектом является сохранение устойчивого развития отдельных субъектов электроэнергетики в условиях усиления государственного регулирования отрасли.

Методы формирования тарифов тесно связаны с обеспечением инвестиционной привлекательности электроэнергетики [9, 10, 11], так как в структуре конечной цены присутствует амортизационная составляющая, связанная с реализацией инвестиционных программ энергокомпаний.

Рассмотрим методы государственного регулирования в электроэнергетике:

1. Государственное регулирование инвестиционной деятельности субъектов естественных монополий в электроэнергетике. Данный метод определяет развитие конкурентного рынка электроэнергии и мощности, что в свою очередь обеспечивает единство технологического управления, а также надежность и безопасное функционирование ЕЭС России.

2. Государственное регулирование цен (тарифов) на отдельные виды продукции (услуг). Этот метод обеспечивает недискриминационный доступ к услугам субъектов естественных монополий и услугам организаций коммерческой инфраструктуры оптового рынка, а также способствует повышению эффективности управления государственной собственностью в электроэнергетике.

3. Государственное антимонопольное регулирование и контроль. Метод заключается в достижении баланса экономических интересов поставщиков и потребителей электрической энергии, а также обеспечивает доступ потребителей электрической энергии к информации о функционировании оптового и розничных рынков, деятельности субъектов электроэнергетики.

4. Управление государственной собственностью в электроэнергетике. Данный метод предусматривает энергетическую и экологическую безопасность электроэнергетики.

5. Федеральный государственный энергетический надзор обеспечивает защиту потребителей от необоснованного повышения тарифов на электрическую энергию и мощность.

6. Государственный экологический надзор в электроэнергетике создает необходимые условия для привлечения инвестиций. Последние два метода позволяют проводить экономическое обоснование оплаты мощности генерирующих объектов поставщиков в части обеспечения выработки электрической энергии.

Рассматривая систему тарифов в электроэнергетике, необходимо отметить различия в расчете цен на оптовом и розничном рынках электроэнергии (Табл. 1).

Таблица 1  
Table 1

Система тарифов в электроэнергетике  
Tariff system in the electric power industry

Вид рынка	Нерегулируемые тарифы	Регулируемые тарифы
Оптовый рынок	на электроэнергию, устанавливаемую Правилами ОРЭ: договоры купли-продажи, конкурентный отбор ценовых заявок, конкурентный отбор мощности	на электроэнергию (мощность), поставляемую по регулируемым договорам
	на отклонения фактического объема потребления электроэнергии от плановых объемов	на электроэнергию (мощность) в неценовых зонах
	на электроэнергию (мощность) в целях обеспечения совместной работы ЭЭС России и энергетических систем иностранных государств	на электроэнергию (мощность), покупаемую организацией по управлению Единой национальной энергетической сетью (ЕНЭС), в целях компенсации потерь
		на электроэнергию, покупаемую (продаваемую) в целях экспорта-импорта на услуги инфраструктурных организаций
Розничный рынок	на электроэнергию, устанавливаемую Правилами ОРЭ: договоры купли-продажи, конкурентный отбор ценовых заявок, конкурентный отбор мощности	на электроэнергию, поставляемую населению
	Пределные уровни цен, рассчитываемые гарантирующим поставщиком	на электроэнергию, покупаемую сетевыми организациями в целях компенсации потерь
		на электроэнергию (мощность) в неценовых зонах оптового рынка, технологически изолированных электроэнергетических системах
		на услуги организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности (ЭСО, ГП)

Источник: [21], Source: [21].

Таким образом, в структуру тарифа для конечного потребителя входит как регулируемая государством, так и нерегулируемая часть платежей. На розничном рынке стоимость электроэнергии для населения ограничивается государством. Вместе с этим, сбытовая компания или гарантирующий поставщик покупают электроэнергию на оптовом рынке электроэнергии и мощности с учетом спроса и предложения в текущий момент времени. Данная стоимость покупки изменяется каждый месяц, но риски, связанные с увеличением нерегулируемой составляющей в тарифе, фактически перекладываются на плечи промышленных потребителей и представителей малого и среднего бизнеса.

Основные методы тарифообразования в электроэнергетике представим в таблице 2.

Необходимо отметить определенные сложности в установлении цен на длительный период регулирования в современных условиях [12, 13, 14, 15]. До 2021 г. экономика России характеризовалась низкими темпами инфляции на уровне 3-4%, соразмерными с макроэкономическими показателями развитых стран. В 2022 г. наблюдалась сильная волатильность ключевой ставки ЦБ и в свою очередь скачкообразная динамика инфляции. В связи с этим, корректировка регулируемых тарифов осуществлялась несколько раз в 2022 г. Однако важным принципом государственной тарифной политики является снижение



социальной напряженности в обществе вследствие ограничения резкого роста тарифных ставок.

Таблица 2

Table 2

## Методы регулирования тарифов в электроэнергетике

*Methods of regulating electricity tariffs*

Метод экономически обоснованных расходов (затрат)	
Основной метод регулирования в российской электроэнергетике. До 2011 года применялся при расчете всех регулируемых цен (тарифов). Метод применяется в отношении организаций, расходы которых впервые учитываются при утверждении в установленном порядке тарифов.	Цены (тарифы) рассчитываются на основе размера необходимой валовой выручки (НВВ) организации, осуществляющей регулируемую деятельность, полученной от реализации каждого вида продукции (услуг), и расчетного объема производства соответствующего вида продукции (услуг) за расчетный период регулирования.
Метод индексации тарифов	
Индексации подлежат ранее утвержденные регулируемые цены (тарифы) и (или) их предельные (минимальные и (или) максимальные) уровни либо НВВ регулируемых организаций.	Тарифы, рассчитанные с применением данного метода, устанавливаются на срок не менее 3 лет при первом применении, и на срок не менее 5 лет при повторном.
Метод сравнения аналогов	
Метод применяется для установления долгосрочных тарифов и предполагает сравнение компаний друг с другом. Компания с оптимальным соотношением параметров деятельности принимается в виде стандарта для других регулируемых субъектов.	Анализ осуществляется органом регулирования каждые 5 лет. Метод применяют для небольших организаций.
Метод доходности инвестированного капитала (РАВ-регулирование)	
Метод направлен на привлечение инвестиций в строительство и модернизацию энергетических объектов и стимулирование эффективности расходов организаций энергетического комплекса.	Регулируемые тарифы устанавливаются на основе НВВ, которая определяется с учетом ежегодных в течение долгосрочного периода регулирования корректировок и обеспечивает покрытие расходов, возврат инвестированного капитала, получение дохода на инвестированный капитал.
Метод долгосрочной индексации необходимой валовой выручки	
Метод применяется при осуществлении государственного регулирования тарифов на услуги по передаче электрической энергии в форме установления долгосрочных тарифов.	При установлении тарифов на первый год долгосрочного периода регулирования величина подконтрольных расходов определяется с помощью метода сравнения аналогов, а в последующие годы долгосрочного периода регулирования индексируется исходя из индекса потребительских цен и изменения количества активов сетевой организации.

Источник: [21], Source: [21].

Перекрестное субсидирование в электроэнергетике является одним из активно применяемых регуляторных инструментов при установлении тарифов на электрическую энергию. Перекрестное субсидирование населения осуществляется путем уменьшения тарифа для населения на основе повышения тарифов для прочих потребителей [4, 7, 12].

Отметим основные аспекты тарифного регулирования электроэнергетики России, сложившиеся за последние несколько лет:

- долгосрочный характер определения параметров изменения регулируемых тарифов на макроуровне;
- увеличение доли либерализованных рынков (в сферах электроэнергетики, газоснабжения, теплоснабжения);
- внедрение элементов долгосрочности при регулировании цен конкретных организаций;
- выстроенная многоуровневая система защиты населения от повышения тарифных скачков;
- расширение методического инструментария регулирования;
- увеличение степени вовлеченности потребителей в регуляторный процесс;

- доступность информации о деятельности регулируемых организаций и регуляторов;  
 - появление зачатков стимулирующего регулирования (сохранение экономии, курс на внедрение «эталонных» затрат).

Правительство Российской Федерации уже на протяжении более 10 лет осуществляет политику искусственного сдерживания тарифов в электроэнергетике, что в большей степени обосновывается необходимостью сдерживания инфляции. Важно отметить то, что тарифная политика государства в настоящее время – это главным образом ориентир по темпу роста цен, сравниваемый с инфляционными темпами экономики России.

В качестве инструмента для решения задач развития инфраструктуры и экономики в целом (экологичность, энергоэффективность, модернизация, инновационное развитие и т.д.) тарифная политика практически не рассматривается. В свою очередь в развитых странах можно наблюдать более интенсивные действия регуляторов в направлении усиления стимулирующей роли тарифного регулирования.

**Результаты и Обсуждение**

Результаты расчета конечных цен на электроэнергию для прочих потребителей по сбытовым компаниям Ивановского региона за 2019-2022 гг. представлены в таблице 3 (Приложение 1).

Мы наблюдаем определенную динамику составляющих конечной цены на электроэнергию:

1. Покупка электроэнергии на ОРЭМ изменяется каждый месяц.
2. Тариф на передачу варьируется в зависимости от классов напряжения.
3. Сбытовая надбавка практически не меняется в динамике.
4. Инфраструктурная составляющая незначительна в структуре тарифа.

Представляется необходимым провести структурный анализ тарифа (таблица 2) для получения корректных выводов по движению экономической цепочки с оптового рынка электроэнергии и мощности до конечного потребителя.

Таблица 4

Table 4

Структура конечных цен на электроэнергию для прочих потребителей за 2019-2022 гг.

*Structure of final electricity prices for other consumers for 2019-2022*

	Покупка на ОРЭМ	Сбытовая надбавка	Инфраструктура	Передача ВН	Передача СН1	Передача СН2	Передача НН
<b>2022</b>							
	2 711,98	558,11	6,25	1 670,45	2 139,99	3 583,52	4 545,49
ВН	54,8%	11,3%	0,1%	33,8%			
СН1	50,1%	10,3%	0,1%		39,5%		
СН2	39,5%	8,1%	0,1%			52,2%	
НН	34,7%	7,1%	0,1%				58,1%
<b>2021</b>							
	2 639,41	602,07	5,29	1 573,43	2 055,78	3 444,41	4 381,10
ВН	54,8%	12,5%	0,1%	32,6%			
СН1	49,8%	11,4%	0,1%		38,8%		
СН2	39,4%	9,0%	0,1%			51,5%	
НН	34,6%	7,9%	0,1%				57,4%
<b>2020</b>							
	2 411,99	564,44	4,89	1 513,28	1 999,81	3 387,81	4 320,61
ВН	53,7%	12,6%	0,1%	33,7%			
СН1	48,4%	11,3%	0,1%		40,1%		
СН2	37,9%	8,9%	0,1%			53,2%	
НН	33,0%	7,7%	0,1%				59,2%
<b>2019</b>							
	2 314,72	522,79	2,86	1 426,77	1 881,23	3 235,41	4 163,37

Продолжение таблицы 4

ВН	54,2%	12,3%	0,1%	33,4%			
СН1	49,0%	11,1%	0,1%		39,8%		
СН2	38,1%	8,6%	0,0%			53,3%	
НН	33,0%	7,5%	0,0%				59,4%

**ИТОГО**

ВН	54,4%	12,1%	0,1%	33,4%			
СН1	49,3%	11,0%	0,1%		39,6%		
СН2	38,7%	8,7%	0,1%			52,5%	
НН	33,8%	7,6%	0,1%				58,5%

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Итак, результаты расчетов в рассматриваемом периоде показывают, что стоимость покупки на ОРЭМ и сбытовая надбавка снижаются в зависимости от класса напряжения. Обратная динамика наблюдается по тарифу на передачу электроэнергии: сетевой тариф увеличивается при снижении уровня напряжения. Инфраструктурные платежи практически не изменяются в пределах 0,1%.

Рассмотрим структуру затрат гарантирующего поставщика Ивановской области АО «ЭнергосбыТплос» (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Динамика затрат гарантирующего поставщика Ивановской области за 2014-2021 гг.  
Dynamics of expenditures of the supplier of last resort of Ivanovo region for 2014-2021.

№ п/п	Наименование затрат	Структура затрат по годам, %								
		2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	
1	Покупная электроэнергия и мощность	57,3	57,7	57,9	57,2	55,8	56,5	52,9	56,7	
2	Расходы на услуги по передаче	37,7	38,3	37,9	38,6	39,8	38,7	36,8	36,3	
3	Сбытовая надбавка	5	4	4,1	4,2	4,3	4,8	10,3	7	

Источник: составлено автором.  
Source: compiled by the author.

Таким образом, наблюдается устойчивая динамика составляющих себестоимости продаж сбытовой компании Ивановского региона. Доля покупки электроэнергии и мощности на ОРЭМ составляет от 52 до 58 % на протяжении 8 лет, расходы на услуги по передаче изменяются в небольшом диапазоне от 36 до 40%. Сбытовая надбавка за последние 6 лет сохраняется на уровне 5%, что является невысоким показателем по сравнению с другими регионами Российской Федерации.

Рассмотрим динамику составляющих конечной цены на электроэнергию по гарантирующим поставщикам России (табл. 6, Приложение 2) для оценки диапазонов значений выручки генерирующих, сетевых и сбытовых энергокомпаний в региональном разрезе.

Проанализируем также динамику показателя ROA – рентабельность активов (ReturnOnAssets) (рис.2, Приложение 3) по крупнейшим энергокомпаниям оптового рынка электроэнергии и мощности за 2010-2020 гг. Мы наблюдаем диапазон значений от 3 до 8 % в основной массе рассматриваемых предприятий.

Важно отметить достаточно устойчивые темпы функционирования и развития энергокомпаний. В первую очередь это касается крупнейших энергокомпаний, технологические особенности которых предполагают высокий удельный вес выручки по электрической энергии и мощности на ОРЭМ в общем портфеле продаж компании. В худшей ситуации находится тепловая генерация: здесь оказывают существенное влияние несколько факторов:

1. Высокий износ основных средств.
2. Нерациональная амортизационная политика новых частных собственников энергокомпаний.
3. Низкий КПД тепловых станций.
4. Теплоснабжение потребителей на розничном энергетическом рынке.

Таким образом, негативные последствия реформирования электроэнергетики, которые проявились в дроблении отрасли на отдельные субъекты, несколько снизили

устойчивость отдельных энергокомпаний, в частности, в сфере тепловой генерации. Однако за последние годы мы наблюдаем обратную интеграцию в электроэнергетической отрасли, что, несомненно, повышает устойчивость новых холдинговых структур.

Что касается атомной энергетики, гидрогенерации и сетевой инфраструктуры, то для данных субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности сохранилась высокая степень консолидации активов при значительном государственном участии в структуре акционерного капитала. Это позволяет данным энергокомпаниям устойчиво развиваться, централизованно решать задачи инвестиционного планирования на основе масштабной финансовой консолидации, а при необходимости задействовать механизмы тарифной и бюджетной поддержки инвестиционных проектов. Как правило, ставка дисконтирования по инвестиционным программам рассматриваемых энергокомпаний формируется на уровне ключевой ставки ЦБ, что, несомненно, снижает инвестиционные и финансовые риски проектов. Устойчивое развитие любого предприятия неразрывно связано со своевременным обновлением основных фондов и реновацией производства.

Таким образом, усиление государственного влияния в электроэнергетике, а также в сфере тарифного регулирования приводит к повышению финансовой устойчивости энергокомпаний оптового рынка электроэнергии и мощности России.

#### *Критический анализ тарифной политики*

Важно отметить специфические особенности электроэнергетической отрасли, влияющие на различия в структуре тарифа в ряде регионов России:

1. Покупка электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности осуществляется в первую очередь у атомных и гидростанций. Это связано с технологическими особенностями; у данных генерирующих компаний отсутствуют широкие возможности управления объемами выработанной электроэнергии.

2. Стоимость поставки энергоресурсов у «вынужденной» генерации на ОРЭМ существенно выше, так как ТЭЦ обладают меньшей экономической эффективностью по сравнению с АЭС и ГЭС.

Наблюдаемое повышение стоимости покупки электроэнергии на ОРЭМ вынуждает оптовых потребителей переходить на собственную генерацию, что позволяет существенно снизить энергетическую составляющую в структуре себестоимости производимой продукции.

Планомерное увеличение регулируемых тарифов на передачу электроэнергии, а также сбытовых надбавок приводит к повышению финансовой нагрузки промышленных потребителей.

Данный фактор в перспективе может привести к снижению спроса на электроэнергию и мощность на ОРЭМ и представляет собой определенную угрозу устойчивого функционирования и развития энергогенерирующих компаний РФ.

#### **Заключение**

В работе рассмотрены методы тарифного регулирования электроэнергетической отрасли. Проведен комплексный анализ структуры тарифа для конечного потребителя для различных ценовых зон с точки зрения различных субъектов электроэнергетического рынка: генерирующих, сетевых, сбытовых и инфраструктурных компаний.

Диапазон, %	Генерирующие компании	Сетевые компании	Сбытовые компании	Инфраструктурные компании
по всем ценовым зонам	15,5 – 52,2	39,8 – 75,4	2,4 – 20,2	0,1 – 0,2
первая ценовая зона	17,5 – 52,2	40,4 – 75,4	2,4 – 16	0,1
вторая ценовая зона	23,6 – 51,5	39,8 – 69,5	5,5 – 10,2	0,1 – 0,2
неценовые зоны	15,5 – 38	55,7 – 68	4,9 – 20,2	0,1

*Источник: составлено автором.  
Source: compiled by the author.*

В результате расчета отдельных тарифных составляющих сделан вывод о сохранении в настоящее время устойчивости функционирования энергокомпаний сферы генерации. Однако данная устойчивость в значительной степени зависит от объемов спроса на электроэнергию (мощность) группы промышленных потребителей.

Теоретическая значимость исследования состоит в определении диапазонов значений составляющих цены на электроэнергию по ценовым зонам: отпускного тарифа с ОРЭМ, сетевого тарифа, сбытовой надбавки и инфраструктурной платы. Практическая значимость

связана с возможностью использования указанных диапазонов в качестве ориентиров при расчете тарифов на основе размера необходимой валовой выручки энергокомпаний.

Для тепловой генерации сохраняется актуальным вопрос своевременного обновления основных средств в целях обеспечения устойчивых темпов развития.

Регулирующим органам в сфере тарифообразования необходимо развивать новые методические подходы к формированию цен на электроэнергию и мощность, которые бы стимулировали энергокомпании к повышению энергоэффективности, снижению углеродного следа и декарбонизации энергетики. Данные рычаги будут способствовать устойчивому развитию энергокомпаний России, технологической устойчивости и повышению экологической ответственности субъектов отрасли.

### Литература

1. Кузовкин А.И. Реформирование электроэнергетики и энергетическая безопасность. -М.: ОАО «Институт микроэкономики», 2006. 388 с.
2. Раппопорт А.И. Реструктуризация российской электроэнергетики: методология, практика, инвестирование. М.: ЗАО «Издательство «Экономика», 2005. - 213 с.
3. Кузьмин В.В. О контурах перспективной модели российского электроэнергетического рынка. Сборник: Стратегия устойчивого развития электроэнергетики, низкоуглеродные способы генерации, экология, тарифное регулирование / под ред. Н.Д. Рогалева. Москва, 2022.
4. Мызникова М.Н. Направления совершенствования тарифного регулирования в электроэнергетике. Вестник Самарского государственного экономического университета. 2016. № 11 (145). С. 60-66.
5. Изотова А.В. Тарифное регулирование в сфере электроэнергетики: проблемы правоприменения и тенденции развития. Правовой энергетический форум. 2017. № 1. С. 33-38.
6. Пронина Н.Н., Шиншинова Е.А. Тарифное регулирование и реструктуризация электроэнергетики // Основы экономики, управления и права. 2021. № 6 (31). С. 35-38.
7. Экономика и управление в современной электроэнергетике России / под ред. А.Б. Чубайса. – М.: НП «КОНЦ ЕЭС», 2009. 615 с.
8. Кукукина И.Г., Тарасова А.С. Управление затратами, контроллинг: учеб. пособие. Иваново: изд-во Иван. гос. энерг. ун-та имени В.И. Ленина, 2016. 164 с.
9. Родин А.В. Зарубежный опыт государственного регулирования тарифной политики на рынке электроэнергии. Проблемы современной экономики (Новосибирск). 2010. № 2-3. С. 313-318.
10. Kolibaba VI., Kukukina IG., Morozova AA. SustainableEnergyDevelopmentIssuesintheContextofWorldEconomyDeglobalization.E3SWebConf. 208 02010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202020802010.
11. Development of Key Indicators for Power Supply Companies / A. S. Tarasova, A. M. Karyakin, D. Zaytsev [et al.] // Propositos y Representaciones. – 2021. – Vol. 9. – No S3. – P. 1145. – DOI 10.20511/pyr2021.v9nSPE3.1145. – EDN CVONOM.
12. Development of The Economic Analysis Method for Wholesale Generating Companies (WGC) In Russia / V. V. Velikorossov, A. M. Karyakin, A. S. Tarasova [et al.] // Education Excellence and Innovation Management: A 2025 Vision to Sustain Economic Development during Global Challenges : Proceedings of the 35th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Seville, Spain, 01–02 апреля 2020 года. Vol. I. – Seville, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. – P. 10777-10781. – EDN CBUXVK.
13. Юсупова, И. В. Теоретические подходы к построению стратегического планирования развития территорий / И. В. Юсупова, М. А. Волкова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10. – № 1(37). – С. 123-132. – EDN XSFURF.
14. Жилкина, Ю. В. Развитие электроэнергетики: вертикальная интеграция или дальнейшая либерализация отрасли? / Ю. В. Жилкина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10. – № 2(38). – С. 106-113. – EDN VVXMIS.
15. Ахметов, А. Ш. О стратегиях пространственного развития регионов России / А. Ш. Ахметов, А. М. Туфетулов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1(33). – С. 127-134. – EDN WNNIKF.
16. Валеева Ю.С., Калинина М.В., Зорина Т.Г., Ахметова И.Г. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 155-172.

17. Лисин Е.М., Паршина А.С., Замешаева И.С., Мусаева Д.Э. Технико-экономические аспекты производства и использования водорода на тепловых электростанциях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №2 (54). С. 120-133.

18. Макоев С.О., Ахметова И. Г., Фонов А.М. Разработка когенерационных энергетических систем с применением технологии газификации твердых коммунальных отходов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 178-194.

19. Колибаба В.И., Мокрова К.С. Методика формирования дифференцированных сетевых тарифов на электроэнергию в зависимости от уровня надежности электроснабжения потребителя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 1. С. 69-76.

20. Великороссов В.В., Колибаба В.И., Овсянников А.А. Анализ надежности функционирования распределительных сетевых компаний, входящих в МРСК "Центра и Приволжья" за 2011-2016 годы // Развитие интеграционных процессов в экономике России. Москва, 2018. С. 82-102.

21. Доступно по [<http://www.cm-ok.ru/services/elektroenergiya>]. Ссылка активна на: 28.02.2023.

22. Овсянников А.А., Колибаба В.И. Критерии оптимизации затрат на повышение надежности функционирования электросетевых компаний // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2019. № 2 (58). С. 75-91.

23. Сайтов С.Р., Карачурин Б.Р., Сидоров М.В. Прогнозирование пиковых часов гарантирующих поставщиков, входящих в реестр АО «АТС» // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т.14. № 4 (56). С. 59-68.

#### Авторы публикации

**Колибаба Владимир Иванович** - д-р экон. наук, заведующий кафедрой «Экономика и организация предприятия» Ивановского государственного энергетического университета.

**Тарасова Анна Сергеевна** - канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономика и организация предприятия» Ивановского государственного энергетического университета.

#### References

1. Kuzovkin AI. *Reforming the electric power industry and energy security*. М.: JSC Institute of Microeconomics, 2006. 388 p.

2. Rappoport AI. *Restructuring of the Russian electric power industry: methodology, practice, investment*. М.: CJSC Publishing House Economics, 2005. - 213 p.

3. Kuzmin VV. *On the contours of a promising model of the Russian electricity market. Collection: Strategy for sustainable development of the electric power industry, low-carbon generation methods, ecology, tariff regulation* / ed. N.D. Rogalev. Moscow, 2022.

4. Myznikova MN. Directions for improving tariff regulation in the electric power industry. *Bulletin of the Samara State Economic University*. 2016;11 (145):60-66.

5. Izotova AV. Tariff regulation in the electric power industry: problems of law enforcement and development trends. *Legal Energy Forum*. 2017;1:33-38.

6. Pronina NN., Shinshinova EA. Tariff regulation and restructuring of the electric power industry. *Fundamentals of Economics, Management and Law*. 2021;6 (31):35-38.

7. *Economics and management in the modern electric power industry of Russia* / ed. A.B. Chubais. -М.: NP KONTs UES, 2009. 615 p.

8. Kukukina IG, Tarasova AS. *Cost management, controlling: textbook. Allowance*. Ivanovo: publishing house Ivan. state energy University named after V.I. Lenina, 2016. 164 p.

9. Rodin AV. Foreign experience of state regulation of tariff policy in the electricity market. *Problems of Modern Economics (Novosibirsk)*. 2010;2-3:313-318.

10. Kolibaba VI, Kukukina IG., Morozova AA. *Sustainable Energy Development Issues in the Context of World Economy Deglobalization*. E3S Web Conf. 208 02010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202020802010.

11. Tarasova AS, Karyakin AM, Zaytsev D, et al. *Development of Key Indicators for Power Supply Companies*. *Propositos y Representaciones*. 2021;9(3):1145. doi 10.20511/pyr2021.v9nSPE3.1145. EDN CVONOM.

12. Velikorossov VV, Karyakin AM, Tarasova AS, et al. *Development of The Economic Analysis Method for Wholesale Generating Companies (WGC) In Russia Education Excellence*

*and Innovation Management: A 2025 Vision to Sustain Economic Development during Global Challenges* : Proceedings of the 35th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Seville, Spain, 01–02 april 2020. Vol. I. – Seville, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. – P. 10777-10781. – EDN CBUXVK.

13. Yusupova IV, Volkova MA. Theoretical approaches to the construction of strategic planning for the development of territories. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2018;10:1 (37):123-132. EDN XSFURF.

14. Zhilkina YuV. Development of the electric power industry: vertical integration or further liberalization of the industry? *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2018;10:2 (38):106-113. EDN VVXMIS.

15. Akhmetov ASh. On the strategies of spatial development of Russian regions / AkhmetovASh.,TufetulovAM. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2017;1 (33):127-134. EDN WNNIKF.

16. Valeeva YuS, Kalinina MV, ZorinaTG, et al. Stimulating the development of electric transport as a tool for the development of the territory. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2022;14(1 (53):155-172.

17. Lisin EM, Parshina AS, Zameshaeva IS, et al. Technical and economic aspects of the production and use of hydrogen at thermal power plants. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2022;14:2 (54):120-133.

18. Makoev SO, Akhmetova IG, Fonov AM. Development of cogeneration energy systems using the technology of gasification of solid municipal waste. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2022;14:4 (56):178-194.

19. Kolibaba VI, Mokrova KS. Methodology for the formation of differentiated network tariffs for electricity depending on the level of reliability of the consumer's power supply. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2017;1:69-76.

20. Velikorossov VV, KolibabaVI, Ovsyannikov AA. Analysis of the reliability of the functioning of distribution grid companies included in IDGC «Center and Volga Region» for 2011-2016. *Development of integration processes in the Russian economy*. Moscow, 2018.p. 82-102.

21. Available at: Internet source [<http://www.cm-ok.ru/services/elektroenergiya>]. Accessed 28.02.2023.

22. Ovsyannikov AA, Kolibaba VI. Criteria for optimizing costs for improving the reliability of the operation of electric grid companies. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2019;2(58):75-91.

23. Saitov SR, Karachurin BR, Sidorov MV. Forecasting peak hours of guaranteeing suppliers included in the register of JSC «ATS». *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2022;14:4 (56):59-68.

#### **Authors of the publication**

**Vladimir I. Kolibaba** – Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia.

**Anna S. Tarasova** – Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia.

**Получено** 28.02.2023г

**Отредактировано** 06.03.2023г

**Принято** 14.03.2023г

Состав конечных цен на электроэнергию для прочих потребителей за 2019-2022 гг.  
Composition of final electricity prices for other consumers for 2019-2022

Период	АО «ЭнергосбыТплюс»	ООО «Ивановоэнерго сбыт»	АО «ЭнергосбыТ плюс»	ООО «Ивановоэнерго сбыт»	Одноставочный тариф на передачу				Инфраструктура	АО «ЭнергосбыТплюс»	ООО «Ивановоэнерго сбыт»
	Конечная цена, менее 670 кВт, НН		Сбытовая надбавка, менее 670 кВт		ВН	СН1	СН2	НН		Покупка с ОРЭМ	
<b>2022</b>											
дек	8 068,49	8 246,90	303,63	850,50	1 856,72	2 359,15	3 936,93	4 992,94	7,441	2 764,48	2 396,02
ноя	8 266,89	7 777,97	869,11	822,84	1 703,41	2 164,36	3 611,86	4 580,68	7,441	2 809,66	2 367,01
окт	7 829,73	7 792,68	379,05	822,84	1 703,41	2 164,36	3 611,86	4 580,68	7,441	2 862,56	2 381,72
сен	7 989,81	8 036,38	379,05	822,84	1 703,41	2 164,36	3 611,86	4 580,68	7,441	3 022,64	2 625,42
авг	7 784,53	8 010,29	195,25	822,84	1 703,41	2 164,36	3 611,86	4 580,68	7,441	3 001,16	2 599,33
июл	7 940,14	8 180,43	195,25	822,84	1 703,41	2 164,36	3 611,86	4 580,68	7,441	3 156,77	2 769,47
июн	7 750,08	7 984,16	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	3 108,18	2 714,67
май	7 478,69	7 745,28	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	2 836,79	2 475,79
апр	7 576,58	7 789,53	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	2 934,68	2 520,04
мар	7 328,28	7 559,95	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	2 686,38	2 290,46
фев	7 657,24	7 896,36	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	3 015,34	2 626,87
январь	7 410,05	7 623,33	195,25	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	5,057	2 768,15	2 353,84
<b>2021</b>											
дек	7 464,68	7 615,67	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	2 611,35	2 344,38
ноя	7 687,80	7 718,40	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	2 834,47	2 447,11



окт	7 681,70	7 675,47	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	2 828,37	2 404,18
сен	7 895,90	7 929,73	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	3 042,57	2 658,44
авг	7 791,64	7 734,16	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	2 938,31	2 462,87
июл	7 745,44	7 747,58	404,88	822,84	1 611,94	2 083,16	3 501,00	4 441,59	6,859	2 892,11	2 476,29
июн	7 741,90	7 663,23	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	3 033,14	2 542,79
май	7 403,40	7 340,14	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	2 694,64	2 219,70
апр	7 611,39	7 591,22	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	2 902,63	2 470,78
мар	7 392,51	7 508,03	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	2 683,75	2 387,59
фев	7 505,50	7 639,30	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	2 796,74	2 518,86
январь	7 457,97	7 525,96	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	3,717	2 749,21	2 405,52
<b>2020</b>											
дек	6 990,17	7 368,99	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 278,26	2 245,40
ноя	7 150,03	7 453,59	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 438,12	2 330,00
окт	7 384,44	7 402,71	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 672,53	2 279,12
сен	7 572,92	7 635,69	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 861,01	2 512,10
авг	7 267,37	7 519,28	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 555,46	2 395,69
июл	7 283,45	7 593,04	384,43	796,11	1 534,91	2 028,39	3 387,81	4 320,61	6,869	2 571,54	2 469,45
июн	7 326,28	7 377,01	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 618,34	2 360,73
май	7 127,04	7 270,61	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 419,10	2 254,33
апр	7 116,07	7 263,84	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 408,13	2 247,56
мар	7 078,57	7 332,80	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 370,63	2 316,52

фев	7 232,13	7 373,11	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 524,19	2 356,83
январь	6 997,76	7 129,13	384,43	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 289,82	2 112,85
<b>2019</b>											
декабрь	7 051,00	7 292,64	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 292,10	2 276,36
ноябрь	6 956,93	7 169,08	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 198,03	2 152,80
октябрь	7 073,55	7 296,13	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 314,65	2 279,85
сентябрь	7 147,77	7 374,06	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 388,87	2 357,78
август	7 001,87	7 219,59	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 242,97	2 203,31
июль	7 024,98	7 306,18	435,39	692,77	1 491,65	1 971,23	3 387,80	4 320,60	2,911	2 266,08	2 289,90
июнь	6 850,83	7 029,40	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 571,65	2 327,67
май	6 745,97	6 962,03	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 466,79	2 260,30
апрель	6 804,66	7 092,23	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 525,48	2 390,50
март	6 592,09	6 954,69	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 312,91	2 252,96
февраль	6 711,60	7 005,22	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 432,42	2 303,49
январь	6 565,89	6 861,39	270,22	692,77	1 361,88	1 791,22	3 083,01	4 006,14	2,817	2 286,71	2 159,66

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Состав конечных цен на электроэнергию за декабрь 2022 г. по ценовым зонам  
*Composition of final electricity prices for December 2022. by price zones*

№ п/п	Регион	Наименование ГП	Цена, руб. без НДС за кВт*ч, Декабрь 2022 (НН)					Структура цены, %			
			Итого вое значение	Стоимо сть передачи э/э (м)	Стоимость производства э/э (м)	Сбытовая надбавка ГП	Инфраструкт урные платежи	Стоимость передачи э/э (м)	Стоимость производства э/э (м)	Сбытова я надбавка ГП	Инфраструктурны е платежи
<b>Первая ценовая зона</b>											
1.	г. Москва	ПАО "Мосэнергосбыт" (Москва)	6,48914	2,70117	3,55977	0,22197	0,00623	0,41626	0,548573	0,034206	0,00096
2.	Московская область	ООО "Русэнергосбыт" (Московская область)	6,50088	3,19104	3,04826	0,25539	0,00619	0,490863	0,4689	0,039285	0,000952
3.	г. Санкт-Петербург	АО "Петербургская сбытовая компания" (г. Санкт-Петербург)	7,73296	2,69847	4,62645	0,40185	0,00619	0,348957	0,598277	0,051966	0,0008
4.	Ленинградская область	ООО "РКС-энерго"	10,53636	2,59646	7,28522	0,64871	0,00597	0,246429	0,691436	0,061569	<b>0,000567</b>
5.	Астраханская область	ПАО "Астраханская энергосбытовая компания"	7,15051	2,5834	3,86153	0,70017	0,00541	0,361289	0,540036	0,097919	0,000757
6.	Республика Башкортостан	ООО "ЭСКБ"	5,97119	2,50822	3,04372	0,41331	0,00594	0,420054	0,509734	0,069217	0,000995
7.	Белгородская область	ОАО "Белгородэнергосбыт"	6,86955	2,6945	3,62689	0,54206	0,0061	0,392238	0,527966	0,078908	0,000888
8.	Брянская область	ООО "Газпром энергосбыт Брянск" (до 01.01.19 ООО "ТЭК-Энерго")	8,68471	2,7161	5,4372	0,52465	0,00676	0,312745	0,626066	0,060411	0,000778
9.	Владимирская область	ООО "Русэнергосбыт" (Владимирская область)	7,69004	2,86362	4,38808	0,43171	0,00663	0,37238	0,570619	0,056139	0,000862
10.	Волгоградская область	ПАО "Волгоградэнергосбыт"	9,61309	3,07579	5,85406	0,67725	0,00599	0,319959	0,608968	0,070451	0,000623
11.	Воронежская область	ПАО "ТНС энерго Воронеж"	8,50417	2,77247	5,01767	0,70767	0,00636	0,326013	0,590025	0,083214	0,000748
12.	Ивановская область	ОАО "ЭнергосбыТ Плюс" (Ивановская область)	8,06849	2,76563	4,99294	0,30363	0,00629	0,342769	0,61882	0,037632	0,00078
13.	Республика Калмыкия	ПАО "Россети Юг" (ранее ПАО "МРСК Юга" (Калмыкия))	8,12159	2,64637	4,29299	1,17684	0,00539	0,325844	0,52859	0,144903	0,000664

14.	Калужская область	ОАО "Калужская сбытовая компания"	7,86559	2,65928	4,60176	0,5982	0,00635	0,33809	0,58505	0,076053	0,000807
15.	Республика Карелия	ООО "Русэнергосбыт" (Республика Карелия)	6,10079	1,0656	4,60203	0,42666	0,0065	0,174666	<b>0,754333</b>	0,069935	0,001065
16.	Кировская область	ОАО "ЭнергосбыТ Плюс" (Кировская область)	8,57468	2,74492	5,21576	0,60763	0,00637	0,320119	0,608275	0,070863	0,000743
17.	Костромская область	ООО "Русэнергосбыт" (Костромская область)	7,12961	2,46804	4,07659	0,57862	0,00636	0,346168	0,571783	0,081157	0,000892
18.	Краснодарский край	ПАО «ТНС энерго Кубань» (Краснодарский край)	9,85334	3,25775	5,93671	0,65295	0,00593	0,330624	0,602507	0,066267	0,000602
19.	Республика Крым	ГУП РК "Крымэнерго"	6,42903	3,35631	2,59591	0,47134	0,00547	<b>0,522055</b>	0,403779	0,073314	0,000851
20.	Курганская область	ОАО "ЭК "Восток" (Курганская область)	7,16999	2,73616	3,51697	0,91082	0,00604	0,381613	0,490513	0,127032	0,000842
21.	Курская область	ООО "РЭК" (Курская область)	9,42301	2,5438	5,5843	1,28823	0,00668	0,269956	0,592624	0,136711	0,000709
22.	Липецкая область	ОАО "ЛЭСК" (г.Липецк)	8,81916	2,65885	5,26191	0,89214	0,00626	0,301486	0,596645	0,101159	0,00071
23.	Республика Марий Эл	ПАО "ТНС энерго Марий Эл"	8,06447	2,88202	4,42104	0,75517	0,00624	0,357373	0,548212	0,093642	0,000774
24.	Республика Мордовия	ПАО "Мордовская энергосбытовая компания"	8,90264	2,84496	5,07422	0,97645	0,00701	0,319564	0,569968	0,109681	0,000787
25.	Мурманская область	ООО "Арктик-энерго"	5,51138	2,22548	3,14875	0,13044	0,00671	0,403797	0,571318	<b>0,023667</b>	0,001217
26.	Нижегородская область	ПАО "ТНС энерго НН"	8,21956	2,94168	4,67101	0,60069	0,00618	0,357888	0,56828	0,073081	0,000752
27.	Новгородская область	ООО "ТНС энерго Великий Новгород"	8,95576	2,5884	5,56392	0,79796	0,00548	0,289021	0,621267	0,0891	0,000612
28.	Орловская область	ООО "ИНТЕР РАО - Орловский энергосбыт"	7,9364	2,82046	4,62739	0,48214	0,00641	0,355383	0,583059	0,06075	0,000808
29.	Пензенская область	ООО "ТНС энерго Пенза"	7,53597	2,78281	3,68823	1,05855	0,00638	0,36927	0,489417	0,140466	0,000847
30.	Пермский край	ПАО "Пермэнергосбыт"	7,1477	2,60714	4,16229	0,37228	0,00599	0,364752	0,582326	0,052084	0,000838
31.	Ростовская область	ПАО "ТНС энерго Ростов-на-Дону"	8,33857	3,04616	4,29299	0,99333	0,00609	0,36531	0,514835	0,119125	0,00073
32.	Рязанская область	ПАО "РЭСК" (г.Рязань)	7,78752	2,83412	3,79319	1,15411	0,0061	0,363931	0,487086	0,1482	0,000783
33.	Самарская область	ОАО "ТЭК" (г.Тольятти)	8,90799	2,79334	5,23037	0,87774	0,00654	0,313577	0,587155	0,098534	0,000734

34.	Саратовская область	ООО "Русэнергосбыт" (Саратовская область)	7,45867	2,28321	4,62441	0,54401	0,00704	0,306115	0,620005	0,072937	0,000944
35.	Свердловская область	ОАО "ЭнергосбыТ Плюс" (Свердловская область)	7,51226	2,48324	4,35526	0,66811	0,00565	0,330558	0,579754	0,088936	0,000752
36.	г. Севастополь	ООО "СЕВЭНЕРГОСБЫТ"	6,41405	3,03373	2,76432	0,61021	0,00579	0,472982	0,430979	0,095136	0,000903
37.	Смоленская область	АО "АтомЭнергоСбыт" (Смоленская область)	8,77708	2,73551	5,23722	0,79783	0,00652	0,311665	0,596693	0,090899	0,000743
38.	Ставропольский край	ПАО "Ставропольэнергосбыт"	8,04116	3,06026	4,4408	0,534	0,0061	0,380574	0,552259	0,066408	0,000759
39.	Тамбовская область	ОАО "ТОСК"	8,06465	2,89621	4,15367	1,00831	0,00646	0,359124	0,515047	0,125028	0,000801
40.	Республика Татарстан	ОАО "Татэнергосбыт"	6,83629	2,72616	3,82809	0,2756	0,00644	0,398778	0,559966	0,040314	0,000942
41.	Тверская область	ПАО «Россети Центр» - «Тверьэнерго»	8,17914	2,88242	4,56198	0,72876	0,00598	0,352411	0,557758	0,0891	0,000731
42.	Тульская область	АО "ТНС энерго Тула"	8,75335	2,73966	5,42481	0,58253	0,00635	0,312984	0,619741	0,066549	0,000725
43.	Тюменская область	ОАО "ЭК "Восток" (Тюменская область)	6,80539	2,19673	3,51697	1,08569	0,006	0,322793	0,516792	0,159534	0,000882
44.	Ульяновская область	ОАО "Ульяновскэнерго"	7,18727	2,66458	3,90426	0,61254	0,00589	0,370736	0,543219	0,085226	0,00082
45.	Челябинская область	ООО "МЭК" (г.Магнитогорск)	6,85474	2,65613	3,62029	0,57028	0,00804	0,387488	0,528144	0,083195	0,001173
46.	Чувашская Республика	АО "Чувашская энергосбытовая компания"	6,58962	2,74879	3,12746	0,7071	0,00627	0,417139	0,474604	0,107305	0,000951
47.	Ярославская область	ПАО "ТНС энерго Ярославль"	7,95017	2,68877	4,64699	0,6086	0,00581	0,338203	0,584515	0,076552	0,000731
<b>Вторая ценовая зона</b>											
48.	Республика Алтай	АО "Алтайэнергосбыт" (Республика Алтай)	6,70261	2,51962	3,4913	0,68606	0,00563	0,375916	0,520887	0,102357	0,00084
49.	Республика Хакасия	ООО "Русэнергосбыт" (Республика Хакасия)	6,47344	2,10462	3,84266	0,51936	0,0068	0,325116	0,593604	0,080229	0,00105
50.	Кемеровская область	ОАО "Кузбассэнергосбыт"	7,19717	2,51435	4,03447	0,6422	0,00615	0,349353	0,560563	0,08923	0,000855
51.	Новосибирская область	ОАО "Новосибирскэнергосбыт"	5,27939	2,31767	2,50034	0,45543	0,00595	0,439003	0,473604	0,086266	0,001127
52.	Омская область	ООО "Омская энергосбытовая компания" (до 01.01.20 АО "ПСК")	6,01765	2,45857	3,00576	0,54741	0,00591	0,40856	0,499491	0,090967	0,000982

53.	Томская область	ПАО "Томскэнергобыт"	6,54533	2,36352	3,65545	0,52009	0,00627	0,3611	0,558482	0,07946	0,000958
54.	Иркутская область	АО "Витимэнергобыт"	4,37928	2,25349	1,74313	0,37403	0,00863	0,51458	<b>0,39804</b>	0,085409	<b>0,001971</b>
55.	Иркутская область	ООО "Русэнергобыт" (Иркутская область)	4,2507	2,13348	1,74313	0,36743	0,00666	0,501913	0,410081	0,08644	0,001567
56.	Красноярский край	ПАО "Красноярскэнергобыт"	8,04106	2,22167	5,37447	0,43905	0,00587	0,276291	0,668378	0,054601	0,00073
57.	Республика Бурятия	ОАО "Читаэнергобыт" (Республика Бурятия)	5,62656	1,32811	3,9093	0,38338	0,00577	0,236043	0,694794	0,068138	0,001025
58.	Забайкальский край	ОАО "Читаэнергобыт" (Забайкальский край)	5,80258	2,15689	3,24609	0,39385	0,00575	0,371712	0,559422	0,067875	0,000991
<b>Неценовая зона</b>											
59.	Республика Дагестан	ПАО "Россети Северный Кавказ" (до 01.07.20 ПАО "ДЭК")	5,08962	1,93204	2,83696	0,31516	0,00546	0,379604	0,557401	0,061922	0,001073
60.	Республика Ингушетия	ПАО "Россети Северный Кавказ" - Ингушэнерго	7,37893	1,84388	4,99815	0,531	0,0059	0,249884	0,677354	0,071962	0,0008
61.	Республика Северная Осетия-Алания	ПАО "Россети Северный Кавказ" (до 01.04.20 ПАО "Севкавказэнерго")	7,82565	1,91371	5,32133	0,58512	0,00549	0,244543	0,679986	0,07477	0,000702
62.	Чеченская Республика	ПАО "Россети Северный Кавказ" - АО "Чеченэнерго"	5,74103	1,60141	3,85039	0,28336	0,00587	0,278941	0,670679	0,049357	0,001022
63.	Республика Тыва	АО "Тываэнерго" (до 01.07.22 АО "Тываэнергобыт")	6,3894	0,99086	4,10493	1,28823	0,00538	<b>0,155079</b>	0,642459	<b>0,20162</b>	0,000842
64.	среднее значение (по всем ценовым зонам)		7,506045	2,561208	4,275014	0,663598	0,006225	0,345986	0,564889	0,088272	0,000852
65.	минимум (по всем ценовым зонам)		4,2507	0,99086	1,74313	0,13044	0,00527	0,155079	0,39804	0,023667	0,000567
66.	максимум (по всем ценовым зонам)		10,53636	3,35631	7,28522	1,28823	0,00863	0,522055	0,754333	0,20162	0,001971

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

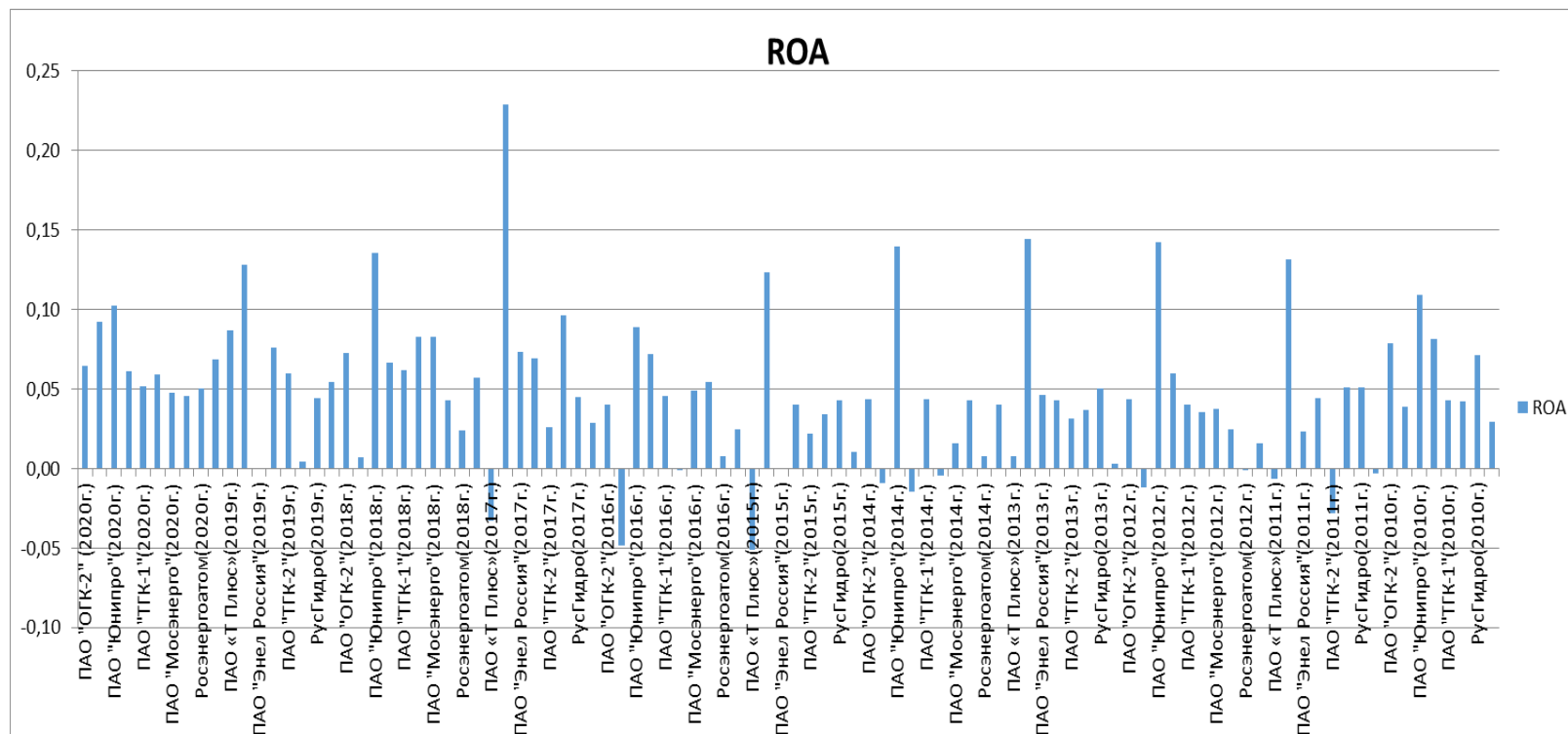


Рис. 2. Динамика показателя ROA энергокомпаний России за 2010-2020 гг.  
 Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Fig. 2. Dynamics of the ROA indicator of Russian energy companies for 2010-2020

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ВСЕОБЩИМ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕМ

Антонов В. С.

Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова,  
г. Казань, Россия

**Резюме:** актуальность представленного исследования обосновывается интенсивным развитием управленческих подходов к обеспечению устойчивого экономического развития. Большое разнообразие таких подходов негативно сказывается на выборе направлений трансформации экономики, что обуславливает необходимость применения системного подхода к формированию моделей устойчивого развития. **ЦЕЛЬ:** решение задач устойчивого территориального развития за счет формирования комплексного подхода к построению системы управления всеобщим ресурсосбережением. **МЕТОДЫ:** в работе использованы методы контент-анализа документов, регламентирующих применение подходов бережливого производства в региональном управлении и фундаментальные категории кибернетики: информация, прямая и обратная связь, оптимизация процессов. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** проведен анализ и предложен научно-методический подход к управлению ресурсосбережением, как фактора повышения конкурентоспособности региона. Оценен опыт применения концепции Бережливое производство, как инструмента инновационного управления ресурсосбережением. Выделены проблемы устойчивого территориального развития и предложены их пути решения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** предложены структура и состав модели бережливого управления на основе всеобщего ресурсосбережения, выбранной в качестве оптимального инструмента устойчивого территориального развития в современных условиях.

**Ключевые слова:** всеобщее ресурсосбережение; бережливое производство; бережливое управление; региональное управление; устойчивое развитие.

**Для цитирования:** Антонов В. С. Разработка структуры формализованной модели управления всеобщим ресурсосбережением // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 173-188.

## CREATION OF THE STRUCTURE FORMALIZED MANAGEMENT MODEL OF TOTAL RESOURCE SAVING

VS. Antonov

Kazan Innovative University named after V. G. Timiryasov, Kazan, Russia

**Abstract:** relevance of present research is substantiated by intensive development of management approaches for providing of sustainable economic development. The large diversity of such approaches is negatively reacted on choice of economy transformation directions, that causes need of using of system approach to creation of sustainable development model. **THE PURPOSE.** Solving of sustainable territorial development tasks by creation of complex way for total resource saving system building. **METHODS.** The work uses methods of content analysis documents, regulating using lean production approaches in regional management and fundamental categories of cybernetics: information, direct and feedback, process optimization. **RESULTS:** the analysis was organized and a scientific and methodological approach to the management of resource saving as a factor of increasing of the competitiveness of the region. The experience of the Lean production concept using was evaluated as an approach of innovative management of resource saving. The problems of sustainable territorial development are identified and their solutions were proposed. **CONCLUSION:** The structure and composition of the aimed subsystems of the lean management model based on total resource saving, chosen as the optimal approach for sustainable territorial development in modern conditions, were proposed.



**Keywords:** total resource saving; lean production; lean management; regional management; sustainable development.

**For citation:** Antonov V. S. Creation of the structure formalized management model of total resource saving. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):173-188.

### Введение

Проблемы устойчивого развития в настоящее время продолжают оставаться актуальными. Одной из важнейших задач повышения качества жизни населения является совершенствование систем территориального управления на основе принципов устойчивого развития. Немаловажным аспектом такого процесса является необходимость повышения эффективности использования ресурсов региона и формирования адекватной современным требованиям систем регионального управления. Опыт реализации концепции Бережливое производство показывает значительные перспективы использования ее подходов к трансформации системы регионального управления с учетом требований ресурсосбережения. Концепция бережливого производства ставит основной своей целью снижение потерь, в первую очередь временных, что свидетельствует о ее нацеленности на повышение эффективности использования человеческих ресурсов. В тоже время рассматриваемая концепция косвенно влияет на сбережение других видов ресурсов: материальных, финансовых и в конечном счете природных. Все это обуславливает возможность применения принципов и подходов концепции Бережливое производство при формировании модели регионального ресурсосбережения и позволяет четко определить целевые подсистемы данной модели.

Научная новизна исследования заключается в разработке, на основе научно-методического подхода, инновационной системы управления всеобщим ресурсосбережением как инструмента обеспечения роста конкурентоспособности региона.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций по применению организационно-управленческих методов организационного и регионального развития на основе повышения эффективности использования всех видов ресурсов, позволяющих повысить результативность управления за счет реализации модели управления всеобщим ресурсосбережением.

### Обзорная часть

В последнее время значимость подходов к реализации ресурсосбережения растет в связи с возникновением и развитием тенденций, направленных на экологизацию бизнеса и повышение его социальной ответственности. Кроме того, ужесточение конкурентной борьбы требует от организаций более эффективного использования имеющихся ресурсов.

В зависимости от сферы применения традиционно выделяют следующие формы ресурсов:

- ресурсы производственного потребления: факторы производства;
- ресурсы непроизводственного потребления: предметы потребления.

В свою очередь к ресурсам производственного потребления, помимо основных факторов производства, таких как средства производства и труд, относят еще 3 формы ресурсов:

- время;
- информация;
- технологии.

Обобщая представленные виды ресурсов, автор предлагает классифицировать их следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Классификация видов ресурсов

Fig.1. Classification of resources types

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Проанализируем основные подходы к определению ресурсосбережения. Сам процесс ресурсосбережения рассматривается различными авторами с различных точек зрения, анализ которых представлен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Основные подходы к определению ресурсосбережения как процесс  
*The main approaches to the definition of resource saving as a process*

Характеристика	Авторы
Ресурсосбережение как процесс оптимизации затрат ресурсов	А. А. Каленюк [1], Т. А. Косович [2], В. И. Омельчишин [3].
Ресурсосбережение как процесс экономии ресурсов	С. В. Волкова [4], Э. М. Лисс [5], С. А. Лоскутов [6], Н. В. Махаева [7], О. М. Пасынкова [8], А. С. Савенко [9], М.Ф. Туренко [10], С. В. Урусова [11].
Ресурсосбережение предполагает, как экономии, так и рациональное использование ресурсов	А. С. Савенко [9], А. С. Попов [12].
Ресурсосбережение как процесс рационального использования ресурсов	И. Л. Воротников [13], И. И. Гизятов [14], С. А. Кузьмин [15], Л. С. Марков [16], Н. В. Махаева [7], А. С. Савенко [9], С. В. Урусова [11], Е. А. Шоколенко [17].
Ресурсосбережение как процесс сокращения затрат	Е. А. Шоколенко [17] и С.А. Рошкетаяев [18].
Ресурсосбережение как процесс сокращения потерь трудовых, финансовых и прочих ресурсов	Н. В. Махаева [7].
Ресурсосбережение как процесс устранения потерь	А. А. Каленюк [1].
Ресурсосбережение как комплексное воздействие на процессы формирования и использования всех видов имеющихся ресурсов	А. М. Мантулин [19].
Ресурсосбережение как процесс формирования ресурсного потенциала как основы экономического развития	С. В. Пантелеев [20], Е. А. Шоколенко [17].

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для того чтобы обосновать необходимость реализации задачи ресурсосбережения необходимо рассмотреть вопрос экономической целесообразности данного процесса и определить сущность ресурсосбережения. Так, В. И. Омельчишин выделяет следующие подходы к определению сущности ресурсосбережения [3]:

- ресурсосбережение как процесс устранения потерь;
- ресурсосбережение как процесс задействования неиспользуемых резервов;
- ресурсосбережение как процесс повышения эффективности использования факторов производства;
- ресурсосбережение как процесс интенсификации использования факторов производства;
- ресурсосбережение как процесс предотвращения ущерба, в т. ч. экологический;
- ресурсосбережение как процесс устранения дефицита факторов производства.

Несмотря на достаточно разнообразные и разносторонние определения ресурсосбережения, существующие в теории и практике, определенная недостаточность проработки отдельных теоретических вопросов ограничивает возможность их практического применения. В частности, не в полной мере рассматриваются вопросы косвенного влияния мероприятий ресурсосбережения, направленных на конкретные ресурсы, на изменение эффективности использования других ресурсов. А такая картина часто встречается на предприятиях, реализующих концепцию бережливого производства.

Кроме того, существующие подходы к ресурсосбережению затрудняют формулирование показателей ресурсосбережения для целей планирования, практическую организацию работы по их улучшению, объективную оценку эффективности принятых программ и планов.

При рассмотрении вопросов ресурсосбережения с точки зрения регионального управления данный аспект управленческой деятельности целесообразно описывать как

целевую подсистему региональной модели управления на основе ресурсосбережения. И в данном контексте ресурсосбережение интересно не только как процесс, но и как результат определенных управленческих воздействий. В связи с этим встает вопрос о выборе адекватных показателей, которые могли бы, с одной стороны, демонстрировать процесс устойчивого развития региона и с другой – свидетельствовать о результативности реализованных управленческих воздействий.

С точки зрения трансформации региональной системы управления на основе ресурсосбережения, интересен опыт построения бережливого государства, который впервые был получен в Великобритании в 2001 году. Зои Раднор и Роберт Джонстон отмечают, что бережливые программы последовательно реализовывались в британской службе здравоохранения и в ряде министерств и департаментов начиная с 2006 года. «Это, в частности, Национальная служба здравоохранения (*National Health Service, NHS*) и ряд министерств и неминистерских департаментов и служб: Департамент доходов и сборов (*HM Revenues and Customs*), Служба судов (*HM Court Services*), министерство труда и пенсий Великобритании (*Department of Work and Pensions*), Национальный офис аудита (*National Audit Office, NAO*)» [21].

В США функционирует Центр бережливого государства (*QPIC, LLC LEAN Government Center*) [22]. Данный центр является первым ресурсным центром «бережливого государства» и глобальной консалтинговой структурой, сфокусированной на исследовании проблем использования бережливых технологий, концепции «шесть сигм», управления изменениями, коучинге высшего менеджмента и прочем. Сама концепция бережливого государства применяется на различных уровнях:

– муниципальном (открытые публикации на официальных сайтах органов власти городов Грэнд-Рэпидс (штат Мичиган) [23], Денвер (штат Колорадо) [24], округа Кинг (штат Вашингтон) [25];

– региональном (уровень штата) (например, в штатах Колорадо [26], Айова [27], Орегон [28], Коннектикут, Мэрилэнд [29], Мэн [30], Миннесота [31], Нью Хэмпшир [32], Огайо [33], Висконсин [34] и иных);

– федеральном: пока лишь отдельными министерствами и ведомствами – министерством обороны (при этом «Руководство по постепенному совершенствованию и – бережливому шести сигмам» издано еще в 2008 году [35]), Агентством по защите окружающей среды (EPA) [36; 37].

Обобщение опыта реализации бережливых подходов в области государственного управления позволило сформулировать ряд определений (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Обобщение опыта реализации бережливых подходов  
*Generalization of the experience of implementing lean approaches*

Организация	Трактовка определения
Консорциум некоммерческих организаций «Глобальная сеть бережливого производства (LGN)»	Бережливое правительство как систематический метод определения и последующего внедрения наиболее эффективного способа предоставления государственных услуг с добавленной стоимостью [38].
LEAN Government Center LLC	«Бережливое правительство» фокусируется на том, каковы ключевые процессы во всех департаментах / агентствах, какие услуги они предоставляют и какая часть того, что делается, имеет добавленную стоимость (то, что действительно нужно налогоплательщику и за что он готов платить) по сравнению с недобавленной стоимостью» [22].

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

В Российской Федерации впервые на государственном уровне задачами реализации концепции бережливого производства стали заниматься в Республике Татарстан, вследствие чего Республика Татарстан имеет успешный опыт по ее реализации. Так, с 2012 г. в рамках выполнения долгосрочной целевой программы «Реализация методики «Бережливое производство» в Республике Татарстан на 2012–2013 годы» были осуществлены мероприятия по преобразованию производственных систем на более чем 160 предприятиях РТ. Помимо промышленных предприятий, в республике имеется успешный опыт внедрения концепции в сфере услуг (учреждения здравоохранения) и органах государственного управления (Министерство труда и занятости РТ) [37].

В Республике Татарстан, в настоящее время активно реализуется национальный

проект «Производительность труда и поддержка занятости» [39]. На сегодняшний день его участниками являются 99 предприятий, а к 2024 году в республике планируют вовлечь в программу 351 предприятие. Завершены более 40 пилотных проектов по внедрению прогрессивных технологий бережливого производства на предприятиях строительства, химической промышленности, металлургии, пищевой промышленности, транспорта, машиностроения и других, среди которых ОАО «Риат», ООО «Елабужский аккумуляторный завод», «АРЗ «Кориб», «АПК «Камский», «Агросила. Челны МПК», «ПК «Полигран», «ПК «Акульчев», ПАО «Нижнекамскшина», АО «КМК «ТЭМПО».

Предполагается, что данная программа должна быть нацелена на экономическую составляющую устойчивого развития региона. Показателями результативности данной программы являются показатели производительности труда, присутствующие в документации к государственной программе, и финансовые показатели, которые в ней отсутствуют.

Основным проблемным вопросом реализации региональных программ, связанных с бережливым производством в Татарстане, является отсутствие системного подхода при формировании и исполнении этих программ. Основной упор в действующих программах делается на стимулирование предприятий к разработке и выполнению отдельных проектов по оптимизации производственных процессов. Однако инфраструктурные вопросы и проблемы сбалансированного развития групп взаимосвязанных отраслей в целях формирования устойчивых экономических цепочек, решающих, в том числе вопросы ресурсосбережения, ни один регламентирующий документ не затрагивает.

Следующим регионом, вплотную занявшимся построением «бережливого региона», стал Ханты-Мансийский автономный округ. В 2016 Правительством Ханты-Мансийского автономного округа – Югры было принято распоряжение № 455-рп «О концепции «Бережливый регион» в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре», в рамках которого определены приоритетные отраслевые направления реализации концепции. Такими направлениями стали: нефтегазовый сектор, строительство, лесопромышленный комплекс, сфера услуг, здравоохранение, образование, социальные услуги, государственное и муниципальное управление.

Было сформулировано понятие Бережливого региона как «системы взаимодействия субъектов бережливого производства, которые совместно и последовательно используют в своей деятельности принципы бережливого производства».

В целях реализации Распоряжения были сформированы 3 базовых научно-образовательных центра на базе ведущих вузов региона (ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», ФГБОУ ВО «Нижневартовский государственный университет», БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет»). Промежуточными результатами построения бережливого региона в ХМАО стали свыше 200 разработанных административных регламентов, повышение доступности государственных услуг до 99,44 % и повышение уровня удовлетворенности граждан качеством государственных и муниципальных услуг до 89 % [40]. К сожалению, после 2018 г. реализация проекта была приостановлена.

Ключевой целью принятия концепции «Бережливый регион» в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре стало формирование культуры бережливого производства у всех участников социально-экономических отношений [41] (рис. 2).



Рис. 2. Цели и задачи реализации концепции «бережливый регион» в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре [41]

Fig. 2 Aims and goals of “lean region” conception realization in Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra [41]

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Проблемы реализации вышеуказанного проекта схожи с проблемами Республики Татарстан и связаны с отсутствием системного подхода. Несмотря на наличие в документации проекта широкого перечня отраслевых направлений применения концепции «Бережливое производство», на практике все реализованные мероприятия касались или образовательных аспектов, или улучшений процессов оказания государственных услуг. В итоге проект сократился до проекта «Бережливое правительство».

В 2018 году государственной корпорацией «Росатом» было принято решение о запуске проекта «Бережливый город». Данную идею было решено тиражировать в рамках федерального проекта «Эффективный регион». ГК «Росатом» планировала распространить имеющийся обширный опыт построения Производственной системы Росатом на уровень регионального управления. Для реализации данного проекта были выбраны регионы, где значительно присутствие предприятий ГК «Росатом»: Нижегородская, Ростовская, Сахалинская, Рязанская, Орловская, Челябинская, Кемеровская, Белгородская, Брянская, Кировская области, Республики Саха (Якутия), Адыгея, Башкортостан, Дагестан, Северная Осетия, Забайкальский и Ставропольский края. Был введено понятие «Эффективный регион»: «Эффективный (бережливый регион) – это система взаимодействия субъектов региона, которые совместно и последовательно используют в своей деятельности принципы бережливого производства». Для реализации проекта были определены 8 направлений реализации: промышленность, сельское хозяйство, министерства, муниципалитеты, здравоохранение, образование, социальная защита, строительство. Кроме того, были сформированы четыре центра компетенций:

- Повышение производительности труда;
- Обеспечение доступности и качества социальной инфраструктуры;
- Эффективное правительство и эффективный муниципалитет;
- Развитие ПСР-инжиниринга.

Работа по направлению «Промышленность» в основном ведется ГК «Росатом» на предприятиях, входящих в состав корпорации или связанных с ними, примеров реализации проекта по направлениям «Строительство», «Сельское хозяйство» до настоящего времени не было. Основные результаты реализации федерального проекта «Эффективный регион» касаются таких направлений, как «Здравоохранение», «Социальная защита», «Образование» и работа министерств и муниципалитетов.

Органы государственной власти Кемеровской области в 2018 г. при поддержке «Росатома» приступили к реализации программы «Производственная система управления», мероприятия которой применялись не только в промышленности и бизнесе, но и в сфере государственного и муниципального управления.

Постановлением коллегии Администрации Кемеровской области от 28 сентября 2018 г. № 407 утверждена государственная программа «Развитие промышленности Кемеровской области на 2019–2021 годы» [42].

Подпрограммами государственной программы являются:

1. Развитие обрабатывающих производств.
2. Развитие индустриальных парков.
3. Стимулирование инвестиций в основной капитал.

В целях стимулирования развития обрабатывающей промышленности региона органами государственной власти реализуется субсидирование части затрат предприятий, связанных с разработкой и реализацией программ повышения производительности труда, в том числе при внедрении принципов бережливого производства, направленных на повышение эффективности труда и рост конкурентоспособности предприятий.

По официальным данным администрации Кемеровской области, на сегодня на территории региона действует более 165 проектов, при этом 64 проекта реализуются в подразделениях органов государственной власти, 101 проект – в подведомственных государственных учреждениях и организациях. Основными сферами, в которых внедряются проекты, являются: производство, образование, здравоохранение, оказание государственных и муниципальных услуг (рис. 3).

В Белгородской области принято Положение о бережливом управлении в органах исполнительной власти и государственных органах Белгородской области, утвержденное постановлением Правительства Белгородской области от 28 мая 2018 г. № 161-пп.

Положение о бережливом управлении определяет порядок и условия применения принципов бережливого производства. Под бережливым управлением органами государственной власти Белгородской области понимается интегрированная система управления, базирующаяся на повышении эффективности процессов через снижение всех

видов потерь. Основными ценностями бережливого управления при этом являются:

- 1) признание человеческого потенциала в качестве главного источника создания ценности;
- 2) своевременное выявление изменения запросов потребителей социальных услуг с целью улучшения качества процесса или услуги;
- 3) снижение потерь.



Рис. 3. Механизм информирования руководителей, специалистов и населения об инструментах и методах бережливого производства в Кемеровской области [42]

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

В качестве принципов бережливого управления выбраны: принцип стратегической направленности, принцип ориентации на создание ценности для пользователей, принцип непрерывного совершенствования, вытягивание процесса производства, принцип встроенного качества, принцип принятия решений, основанных на фактах, принцип соблюдения стандартов, регламентов, инструкций (рис. 4).



Рис. 4. Организационная структура бережливого управления в Белгородской области [43]

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Основными стратегическими направлениями, по которым работают органы государственной и региональной власти по трем проанализированным областям, являются:

- 1) повышение производительности труда на всей территории региона;
- 2) увеличение уровня конкурентоспособности региональных предприятий на отечественных и международных рынках;
- 3) удовлетворенность населения качеством предоставляемых государственных услуг;
- 4) рост эффективности государственного и муниципального управления.

В свою очередь, анализ результативности предлагаемых, в рамках федерального проекта, подходов должен осуществляться с учетом принципов и философии концепции бережливого производства. Идеи данной концепции направлены на повышение качества продукции при одновременном сокращении издержек производства и невысоком уровне капиталовложений.

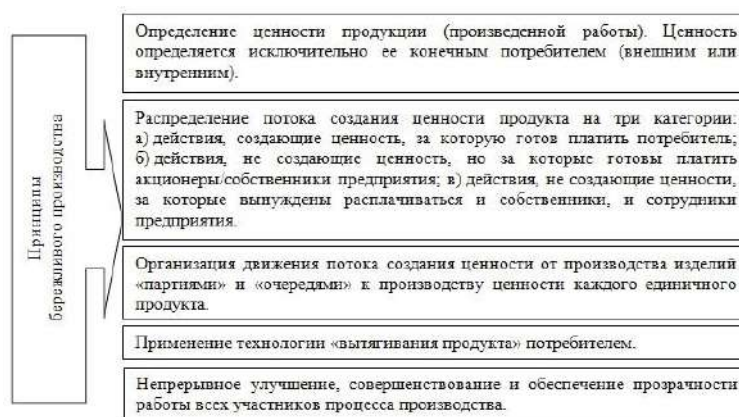


Рис. 5. Принципы бережливого производства [44] Fig. 5. Lean production principles [44]

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Приведенные на рисунке 5 принципы отражают сущность применения концепции бережливого производства. В первую очередь определяется ценность продукта, стоимость его создания, что формируется конечным потребителем данного продукта.

Таким образом, можно говорить о том, что бережливое производство – это непрерывный процесс совершенствования и оптимизации процесса создания продукта. Идеальный процесс при этом – моментальное создание ценности, которая востребована потребителем именно в данный момент времени. Стремясь к такой цели, бережливое производство регулярно исключает из процесса операции, не создающие ценности, так как они отдаляют организацию от идеала.

Промежуточные итоги реализации федерального проекта «Эффективный регион» можно проследить на примере ряда областей. Так, Нижегородская область отчиталась о достижении значительных результатов в компетенции «Эффективное правительство и эффективный муниципалитет» (повышение производительности в 3 раза), направлении «Социальная защита» (повышение производительности до 4 раз), направлении «Здравоохранение» (сокращение временных затрат пациента в 4,3 раза) [45]; Белгородская область в направлении «Министерства» (повышение производительности на 80 %), направлении «ЖКХ» (повышение производительности на 30 %), направлении «Образование» (повышение производительности на 50 %) и направлении «Здравоохранение» (повышение производительности на 70 %) [46]; Кемеровская область в рамках федерального проекта сформировала отдельный проект «ПУСК» (Производственно-управленческая система Кузбасса) с приоритетными направлениями: образование, здравоохранение, ЖКХ, услуги для населения, аппарат управления, автотранспортные предприятия, промышленность.

К сожалению, подтвердить достоверность приведенных отчетных результатов не представляется возможным, так как все перечисленные показатели не являются традиционными для принятой в Российской Федерации статистической отчетности.

Сама методика построения эффективного региона, разработанная корпорацией «Росатом», представляет собой алгоритм реализации проекта перестройки системы регионального управления на основе принципов и подходов бережливого региона. В тоже время данная методика не содержит требований или рекомендаций по процессному функционированию системы менеджмента. Предполагается, что такая система должна быть построена на основе стандартов бережливого производства, в частности ГОСТ Р 56404-2021. Однако данный стандарт разработан в первую очередь для промышленных предприятий, и для адаптации к специфике регионального управления требуется значительная его переработка.

Базовым механизмом преобразования систем регионального управления должны стать процессы выявления и решения проблем, влияющих на доступность и качество государственных услуг для населения, и на эффективность государственного и муниципального управления. При планировании и реализации мероприятий по бережливой оптимизации системы территориального управления необходимо учитывать сложность и кроссфункциональность государственных и муниципальных услуг.

#### **Результаты исследования**

Представленные выше результаты свидетельствуют не столько о достижениях при реализации оптимизационных процессов, а только о сегментарном и изолированном характере этих процессов. Так, исходя из опыта реализации подобных мероприятий в министерствах, ведомствах и учреждениях Республики Татарстан, можно сказать, что

речь, скорее всего, идет не о повышении производительности труда (стоимость произведенного товара на одного работника), а о снижении трудоемкости отдельных операций или процессов. Такое снижение отчасти влияет на эффективность деятельности организации, однако традиционно в бизнес-процессах существует большое количество потерь и данное снижение несущественно влияет на общий уровень производительности труда.

Проведенный анализ различных форм использования в структуре управления субъектов Федерации принципов бережливого производства показал, что в анализируемых регионах не сложилась результативная система управления и отсутствует рациональная структура использования преимуществ бережливого производства.

Кроме того, анализ опыта реализации подходов бережливого производства на региональном уровне позволил обобщить основные проблемы формирования региональной системы бережливого управления:

- не полностью используются местные ресурсы, в том числе вторичные, для расширения товарного производства;
- неудовлетворительно организован дифференцированный (раздельный) сбор коммунальных и промышленных отходов и их вторичное использование;
- не вовлекается в фактор бережливости весь цикл циркулярной экономики, в первую очередь связанный с соблюдением регламентов эксплуатации, профилактики и ремонта изделий для поддержания их в рабочем состоянии в течение всего срока службы;
- не учитывается фактор непредвиденных ситуаций природного и техногенного характера с позиции минимизации потерь путем осуществления предупредительных мероприятий и финансовых затрат на них;
- слабо используются цифровые технологии для реализации сбора и обработки информации по факторам бережливости в целом и в разрезе отраслей;
- формально проводится массовое обучение работающих, учащихся и населения методам и приемам бережливости, организации конкурсов, смотров, постов бережливости, направленных на поиск резервов производства и потребления продукции, экономии всех видов материальных, энергетических и трудовых ресурсов;
- недостаточно изучены и обобщены формы и методы материального и морального стимулирования лиц и организаций, добившихся эффекта в работе по бережливости;
- имеет место формализм в формах и неглубокое содержание пропаганды целей бережливого региона, организации, блеклое освещение хода выполнения намеченных планов и программ в средствах массовой информации и наглядной агитации на городских площадках.

#### ***Предложения по формированию системы всеобщего ресурсосбережения***

Концепция «Бережливое производство», выбранная в качестве базиса системы управления всеобщим ресурсосбережением, в первую очередь обеспечивает эффективность использования трудовых ресурсов и сокращение временных затрат на производство. Кроме того, она косвенно способствует оптимизации использования финансовых ресурсов (за счет увеличения оборачиваемости оборотных средств) и снижению материалоемкости продукции (посредством минимизации межоперационных запасов и запасов готовой продукции и, как следствие, сокращения потерь при модернизации продукции или ее доработки). Подходы к реализации бережливого производства на уровне отдельных организаций рассмотрены в большом количестве публикаций как зарубежных, так и отечественных авторов [47]. В тоже время, как на уровне отдельного предприятия, так и на уровне региона существует ряд других видов ресурсов, значимо влияющих на эффективность деятельности объекта экономики. Это природные ресурсы, актуальность сбережения которых значительно выросла в последние десятилетия, а также редко конкретизируемые в работах экономистов информация и технологии.

Основываясь на вышесказанном, целесообразно сформулировать определение такого понятия, как всеобщее ресурсосбережение. *Всеобщее ресурсосбережение – это системная деятельность экономических и управленческих субъектов по повышению эффективности использования всех видов ресурсов: материальных, трудовых, природных, финансовых, временных, информационных и технологических.*

Одной из задач создания модели управления всеобщим ресурсосбережением является выделение целевых направлений приложения управленческих воздействий, что позволит однозначно сформулировать цели и задачи конкретных мероприятий по ресурсосбережению и сформировать комплекс показателей результативности такой деятельности. С учетом проведенного выше анализа подходов к построению территориальной системы бережливого управления и сложившейся ситуации в



Республике Татарстан с ресурсосбережением автор предложил включить в модель объекта системы всеобщего ресурсосбережения следующие целевые подсистемы:

- материалоемкость;
- энергоэффективность;
- производительность труда;
- финансы;
- циркулярные технологии.

Две последние подсистемы для концепции и практики бережливого производства – инновационные на основе разработок автора.

Проведенный анализ научных публикаций и документов не выявил упоминания в них важнейшей составляющей бережливого региона – предотвращение природных и техногенных катастроф, приводящих к огромному ущербу всей экономики региона, – природные пожары, наводнения, аварии, эпидемии. В предложенной модели перечисленные опасности реализованы через целевую подсистему «финансы»: это и необходимые планируемые средства, и их рациональное использование для предотвращения природных и техногенных катастроф. В структуру модели системы всеобщего ресурсосбережения автором предложено включить целевая подсистема – «циркулярные технологии» – относительно новое направление комплексного использования ресурсов на всех стадиях жизненного цикла продукции. В известных нам региональных программах такая подсистема отсутствует.

Следующей задаче разработки модели управления всеобщим ресурсосбережением является определение объектов управления, целевые подсистемы которых должны быть трансформированы на основе предлагаемых бережливых подходов. Анализируя опыт регионов при реализации вышеуказанных программ модернизации территориального управления, можно сделать вывод, что основными объектами управления выбираются наиболее развитые отрасли экономики региона и элементы инфраструктуры, значимо влияющие на экономику и качество жизни в регионе. На примере Республики Татарстан, такими объектами управления являются отрасли и элементы инфраструктуры, представленные на рисунке 6.



Рис. 6. Структура объекта по отраслям и сферам деятельности Fig. 6. Structure of object by branches and spheres of activity

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

При формировании модели управления всеобщим ресурсосбережением необходимо определить состав общих и специальных функций управления, которые реализуются в рассмотренных выше целевых подсистемах. Классический состав управляющих воздействий включает в себя общие и специальные функции управления. К общим функциям относятся: планирование, организация, регулирование, контроль (цикл Деминга) [48].

Учитывая специфику и инновационность объекта управления, автор предлагает, во-первых, в дополнение к функциям, представленным в цикле Деминга, ввести в состав функций координацию и бенчмаркинг, во-вторых, определить специальные функции управления, регламентируемые документами по стандартизации, в том числе региональными стандартами.

Взяв за основу аксонометрическую модель представления объекта исследования, и обобщив результаты проведенного анализа, получим следующую визуализацию модели управления всеобщим ресурсосбережением (рис. 7).

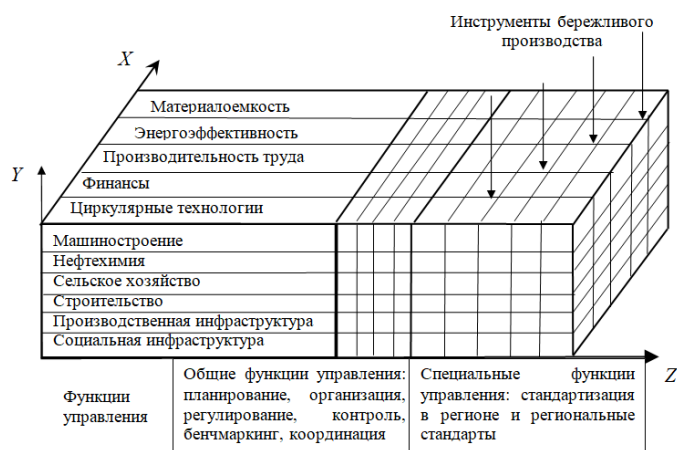


Рис. 7. Формализованная модель управления всеобщим ресурсосбережением *Fig. 7. Formalized model of total resource saving management*

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Применение данной модели при трансформации региональной экономики позволит обеспечить системный подход к преобразованиям, учесть разнообразие и взаимное влияние объектов управления и сформировать адекватную систему оценки результативности перехода к устойчивому территориальному развитию.

### **Заключение**

Результаты проведенного исследования показывают высокую значимость системного подхода к формированию эффективной системы устойчивого территориального развития. Опыт использования концепции Бережливое производство как на микроуровне, так и на мезоуровне обуславливает возможность ее расширенного применения в целях совершенствования регионального управления и позволяет в полном объеме определить целевые подсистемы модели системы такого управления. Модель всеобщего ресурсосбережения предлагается в качестве оптимального алгоритма формирования системы регионального управления основанного на системном подходе и позволяющая учесть все аспекты развития экономики отдельного субъекта Российской Федерации. Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в применении и апробации научно-методического подхода к анализу результативности трансформации систем управления экономических агентов на региональном уровне, идентификации отклонений и недостатков процессов преобразования и выработке системного подхода к реализации изменений в региональном управлении. Практическую ценность результатов исследования представляет комплексное представление взаимосвязей объектов управления, целевых подсистем и управляющих воздействий, основываясь на который может быть сформирован комплекс взаимосвязанных мероприятий по перестройке региональной системы управления на основе методов и подходов всеобщего ресурсосбережения.

### **Литература**

1. Каленюк, А. А. Механизм управления ресурсосбережением в микроэкономической системе промышленного предприятия : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Каленюк Анна Александровна. – Саратов, 2009. – 190 с.
2. Косович, Т. А. Совершенствование организационно-экономического механизма ресурсосбережения на предприятиях топливно-энергетического комплекса : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Косович Татьяна Аркадьевна. – Краснодар, 2002. – 28 с.
3. Омельчишин, В. И. Ресурсосбережение как фактор повышения эффективности общественного производства : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 / Омельчишин Владимир Иванович. – Москва, 1993. – 23 с.
4. Волкова, С. В. Инновационно-инвестиционное обеспечение ресурсосбережения в промышленности : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Волкова Светлана Владимировна. – Белгород, 2010. – 24 с.
5. Лисс, Э. М. Ресурсосбережение как фактор социально-экономической эффективности производства : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 / Лисс Элина Михайловна. – Москва, 1999. – 142 с.

6. Лоскутов, С. А. Формирование механизма ресурсоэффективности на предприятиях хлебопекарной промышленности : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Лоскутов Сергей Анатольевич. – Воронеж, 2015. – 214 с.

7. Махаева, Н. В. Организация ресурсосбережения в сфере жилищно-коммунального хозяйства : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Махаева Наталья Викторовна. – Тольятти, 2005. – 156 с.

8. Пасынкова, О. М. Организационно-экономические аспекты устойчивого развития предприятий на основе ресурсосбережения (на примере масложировых предприятий Воронежской области) : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Пасынкова Ольга Михайловна. – Воронеж, 2004. – 27 с.

9. Савенко, А. С. Управление ресурсосбережением на предприятии на основе анализа резервов энергоэффективности : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Савенко Анна Сергеевна. – Москва, 2012. – 26 с.

10. Туренко, М. Ф. Ресурсосбережение при оказании услуг в снабжении : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 / Туренко Михаил Федорович. – Москва, 1988. – 19 с.

11. Урусова, С. В. Повышение экономической эффективности производства молока на основе интенсификации и ресурсосбережения : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 / Урусова Светлана Валентиновна. – М., 2001. – 176 с.

12. Попов, А. С. Резервы ресурсосбережения на машиностроительных предприятиях : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Попов Александр Сергеевич. – Саратов, 2006. – 145 с.

13. Воротников, И. Л. Формирование и управление ресурсосберегающей агроэкономикой / И. Л. Воротников // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. Выпуск № 4–1. Том 4. – 2004. – С. 185–186.

14. Гизятов, И. И. Формирование и комплексная оценка эффективности политики ресурсосбережения в промышленности : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Гизятов Ильдар Ильгизович. – Казань, 2011. – 24 с.

15. Кузьмин, С. А. Разработка системы ресурсосбережения при проектировании и производстве обуви : автореф. дис. ... канд. технич. Наук : 05.19.05 / Кузьмин Сергей Александрович. – Москва, 2010. – 22 с.

16. Марков, Л. С. Теоретико-методологические основы кластерного подхода : монография / Л. С. Марков ; под ред. Н. И. Сулова ; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Ин-т экономики и организации пром. производства Сибирского отд-ния Российской акад. наук. – Новосибирск : Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2015. – 299 с.

17. Шоколенко, Е. А. Совершенствование процессов ресурсосбережения на машиностроительных предприятиях : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 / Шоколенко Елена Анатольевна. – Омск, 2006. – 16 с.

18. Рощектаев, С. А. Формирование механизма ресурсосбережения в перерабатывающих отраслях АПК Краснодарского края (на примере плодоовощеконсервной промышленности) : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Рощектаев Сергей Александрович. – Краснодар, 2000. – 169 с.

19. Мантулин, А. М. Экономический механизм ресурсосбережения на предприятии (на примере сахарной промышленности) : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Мантулин Александр Михайлович. – Воронеж, 2012. – 24 с.

20. Пантелеев, С. В. Теоретические аспекты ресурсосбережения / С. В. Пантелеев // Молодой ученый. – 2017. – № 45 (179). – С. 196–201.

21. Radnor, Z. and Johnston, R. (2013). Lean in UK Government: internal efficiency or customer service? *Production Planning & Control*, 24(10-11), pp. 903-915.

22. Центр бережливого управления QPIC. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leangovcenter.com/> (дата обращения 03.11.2022 г).

23. City of Grand Rapids' Lean Thinking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://grcity.us/city-manager/Lean-Initiative/Pages/default.aspx> (дата обращения 20.05.2022).

24. Colorado's Peak Performance Initiative // City and County of Denver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.denvergov.org/mayor/MayorsOffice/ProgramsInitiatives/DenverPeakPerformance/PeaKAcademy/tabid/444380/Default.aspx> (дата обращения 17.05.2022).

25. Lean Process Information and Resources for County Employees // King County [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kingcounty.gov/employees/Lean.aspx> (дата обращения 22.09.2022).

26. Colorado Department of Transportation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.coloradodot.info/business/process-improvement> (дата обращения 17.05.2022).

27. Lean Business Process Improvement in the Executive Branch of Iowa State Government As of 05/15/14 // Iowa Department of Management. Office of Lean Enterprise [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lean.iowa.gov/results/index.html> (дата обращения 22.05.2022).

28. Going Lean in State Government // The official Web page for the state of Oregon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oregon.gov/DAS/TRFM/goinglean.shtml> (дата обращения 05.09.2022).

29. The Maryland World Class Consortia and Lean Government // MWCC – Maryland World Class Consortia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mwccmc.org/leangovernment> (дата обращения 17.05.2022).

30. Bend the Curve: Harvard University Recognizes State of Maine Bend the Curve as a Bright Idea in Government // Maine.gov – An Office of the Maine Department of Health and Human Services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.maine.gov/dhhs/btc/index.shtml> (дата обращения 17.05.2022).

31. Lean Online 2010/2011 Results // Minnesota.gov [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.lean.state.mn.us/LEAN\\_pages/results.html](http://www.lean.state.mn.us/LEAN_pages/results.html) (дата обращения 22.09.2022).

32. Department of Administrative Services. Lean Continuous Improvement // An official New Hampshire government website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lean.nh.gov/> (дата обращения 17.05.2022).

33. LeanOhio // Ohio.gov [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lean.ohio.gov/> (дата обращения 22.10.2022).

34. Lean Government // Wisconsin Department of Administration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.doa.state.wi.us/Divisions/Administrative-Services/Lean-Government> (дата обращения 22.09.2022).

35. Continuous Process Improvement / Lean Six Sigma Guidebook. Revision 1. USA Department of Defense, July 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leangovcenter.com/Pdf/DOD%20CPI-LSS%20Handbook,%20July%202008.pdf> (дата обращения 18.05.2022).

36. Lean Government // EPA – United States Environmental Protection Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.epa.gov/lean/government/> (дата обращения 15.05.2022).

37. Целевая программа «Реализация методики «Бережливое производство» в Республике Татарстан на 2012-2013 годы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet.garant.ru/#/document/34580878> (дата обращения: 22.11.2022).

38. Что такое бережливое правительство? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://planet-lean.com/focus/lean-government/> (дата обращения 03.11.2022 г).

39. Паспорт национального проекта (программы) «Производительность труда и поддержка занятости» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам) (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet.garant.ru/#/document/72185994> (дата обращения 22.08.2022).

40. Протокол № 1 заседания совета главных конструкторов по бережливым технологиям Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.surgu.ru/instituty/institut-ekonomiki-i-upravleniya/nauchno-obrazovatelnye-tsentry/berezhlivoe-proizvodstvo/meropriyatiya-po-berezhlivomu-proizvodstvu> (дата обращения 03.11.2020 г).

41. Распоряжение от 19.08.2016 года № 455-рп Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «О концепции «бережливый регион» в Ханты-мансийском автономном округе – Югре» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/429064584> (дата обращения 22.08.2021).

42. Постановление Коллегии Администрации Кемеровской области от 28.09.2018 № 407 «Об утверждении государственной программы Кемеровской области «Развитие промышленности Кемеровской области» на 2019-2021 годы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/561549356> (дата обращения 03.09.2021).

43. Постановление Правительства Белгородской области от 28.05.2018 года № 161-пп «Об утверждении Положения о бережливом управлении в органах исполнительной власти и государственных органах Белгородской области» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/550110788> (дата обращения 22.08.2021).

44. Вумек, Дж. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании: учебное пособие/ Джеймс Вумек, Дэниел Джонс; пер. с англ. – 7 – е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2013. – 472 с.

45. Проект «Эффективный регион» Челябинская область [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mininform74.ru/Upload/files/Проект%20Эффективный%20регион.pdf> (дата обращения 03.11.2020 г).

46. Официальный сайт межрегионального форума «Бережливое управление 2.0. Энергия действия 2020» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leanforum31.ru/> (дата обращения 22.08.2021).

47. Бережливое производство : учебник / В. В. Глухов, С. Н. Кузьмина, В. А. Левенцов, М. Г. Ливинцова, Е. Е. Абушова, А. В. Черникова, А. А. Яковлев, Т. С. Лебедева, В. В. Терещенко. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 244 с.

48. Горбашко, Е.А. Управление качеством: учебник для бакалавров / Е.А. Горбашко. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство «Юрайт», 2014. – 463 с.

49. Валеева, Ю. С. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории / Ю. С. Валеева, М. В. Калинина, Т. Г. Зорина, И. Г. Ахметова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – С.155–172.

## Авторы публикации

**Антонов Виталий Станиславович** – старший преподаватель кафедры «Цифровая экономика и управление качеством», Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова

## References

1. Kaleniuk, A. A. The mechanism of resource saving management in the microeconomic system of an industrial enterprise: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Kaleniuk Anna Aleksandrovna. - Saratov, 2009. - 190 p.

2. Kosovich, T. A. Improvement of the organizational and economic mechanism of resource saving at the enterprises of the fuel and energy complex: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Kosovich Tatyana Arkadevna. - Krasnodar, 2002. - 28 p.

3. Omelchishin, V. I. Resource saving as a factor in increasing the efficiency of social production: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.06 / Omelchishin Vladimir Ivanovich. - Moscow, 1993. - 23 p.

4. Volkova, S. V. Innovative and investment provision of resource saving in industry: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Volkova Svetlana Vladimirovna. - Belgorod, 2010. - 24 p.

5. Liss, E. M. Resource saving as a factor in the socio-economic efficiency of production: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.06 / Liss Elina Mikhailovna. - Moscow, 1999. - 142 p.

6. Loskutov, S. A. Formation of the mechanism of resource efficiency at the enterprises of the baking industry: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Loskutov Sergey Anatolevich. - Voronezh, 2015. - 214 p.

7. Makhaeva, N. V. Organization of resource saving in the sphere of housing and communal services: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Makhaeva Natalya Viktorovna. - Tolyatti, 2005. - 156 p.

8. Pasyukova, O. M. Organizational and economic aspects of sustainable development of enterprises based on resource saving (on the example of oil and fat enterprises of the Voronezh region): author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Pasyukova Olga Mikhailovna. - Voronezh, 2004. - 27 p.

9. Savenko, A. S. Management of resource saving at the enterprise based on the analysis of energy efficiency reserves: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Savenko Anna Sergeevna. - Moscow, 2012. - 26 p.

10. Turenko, M. F. Resource saving in the provision of services in the supply: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.06 / Turenko Mikhail Fedorovich. - Moscow, 1988. - 19 p.

11. Urusova, S. V. Increasing the economic efficiency of milk production based on intensification and resource saving: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.06 / Urusova Svetlana Valentinovna. - M., 2001. - 176 p.

12. Popov, A. S. Reserves of resource saving at machine-building enterprises: dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Popov Aleksandr Sergeevich. - Saratov, 2006. - 145 p.

13. Vorotnikov, I. L. Formation and management of resource-saving agro-economics / I. L. Vorotnikov // Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. Issue #4–1. Volume 4. - 2004. - S. 185-186.

14. Gizyatov, I. I. Formation and comprehensive assessment of the effectiveness of resource saving policy in industry: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Gizyatov Ildar Ilgizovich. - Kazan, 2011. - 24 p.

15. Kuzmin, S. A. Development of a resource-saving system in the design and production of footwear: author. dis. ... cand. tech. Sciences: 05.19.05 / Kuzmin Sergey Aleksandrovich. - Moscow, 2010. - 22 p.

16. Markov, L. S. Theoretical and methodological foundations of the cluster approach: monograph / L. S. Markov; ed. N. I. Suslova; Russian acad. Sciences, Siberian Department, Federal State. budgetary institution of science Institute of Economics and Organization prom. production of the Siberian branch of the Russian acad. Sciences. - Novosibirsk: Publishing house of the IEOPP SB RAS, 2015. - 299 p.

17. Shokolenko, E. A. Improvement of resource saving processes at machine-building enterprises: author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.06 / Shokolenko Elena Anatolevna. - Omsk, 2006. - 16 p.

18. Roschektaev, S. A. Formation of the resource saving mechanism in the processing industries of the agro-industrial complex of the Krasnodar Territory (on the example of the fruit and vegetable canning industry): dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Roshektaev Sergey Aleksandrovich. - Krasnodar, 2000. - 169 p.

19. Mantulin, A. M. The economic mechanism of resource saving at the enterprise (on the example of the sugar industry): author. dis. ... cand. economy Sciences: 08.00.05 / Mantulin Alexander Mikhailovich. - Voronezh, 2012. - 24 p.

20. Panteleev, S. V. Theoretical aspects of resource saving / S. V. Panteleev // Young scientist. - 2017. - No. 45 (179). - S. 196–201.

21. Radnor, Z. and Johnston, R. (2013). Lean in UK Government: internal efficiency or customer service? *Production Planning & Control*, 24(10-11), pp. 903-915.

22. Lean Management Center QPIC. [Electronic resource]. - Access mode: <https://leangovcenter.com/> (accessed 03.11.2022).

23. City of Grand Rapids' Lean Thinking [Electronic resource]. - Access mode: <http://grcity.us/city-manager/Lean-Initiative/Pages/default.aspx> (Accessed 20.05.2022).

24. Colorado's Peak Performance Initiative // City and County of Denver [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.denvergov.org/mayor/MayorsOffice/ProgramsInitiatives/DenverPeakPerformance/PeakAcademy/tabid/444380/Default.aspx> (Accessed 17.05.2022).

25. Lean Process Information and Resources for County Employees // King County [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.kingcounty.gov/employees/Lean.aspx> (Accessed 22.09.2022).

26. Colorado Department of Transportation [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.coloradodot.info/business/process-improvement> (Accessed 17.05.2022).

27. Lean Business Process Improvement in the Executive Branch of Iowa State Government As of 05/15/14 // Iowa Department of Management. Office of Lean Enterprise [Electronic resource]. - Access mode: <http://lean.iowa.gov/results/index.html> (Accessed 22.05.2022).

28. Going Lean in State Government // The official Web page for the state of Oregon [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.oregon.gov/DAS/TRFM/goinglean.shtml> (Accessed 05.09.2022).

29. The Maryland World Class Consortia and Lean Government // MWCC – Maryland World Class Consortia [Electronic resource]. - Access mode: <http://mwcmc.org/leangovernment> (Accessed 17.05.2022).

30. Bend the Curve: Harvard University Recognizes State of Maine Bend the Curve as a Bright Idea in Government // Maine.gov – An Office of the Maine Department of Health and Human Services [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.maine.gov/dhhs/btc/index.shtml> (Accessed 17.05.2022).

31. Lean Online 2010/2011 Results // Minnesota.gov [Electronic resource]. - Access mode: [http://www.lean.state.mn.us/LEAN\\_pages/results.html](http://www.lean.state.mn.us/LEAN_pages/results.html) (Accessed 22.09.2022).

32. Department of Administrative Services. Lean Continuous Improvement // An official New Hampshire government website [Electronic resource]. - Access mode: <http://lean.nh.gov/> (дата обращения 17.05.2022).

33. LeanOhio // Ohio.gov [Electronic resource]. - Access mode: <http://lean.ohio.gov/> (Accessed 22.10.2022).

34. Lean Government // Wisconsin Department of Administration [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.doa.state.wi.us/Divisions/Administrative-Services/Lean-Government> (Accessed 22.09.2022).

35. Continuous Process Improvement / Lean Six Sigma Guidebook. Revision 1. USA Department of Defense, July 2008 [Electronic resource]. - Access mode: <http://leangovcenter.com/Pdf/DOD%20CPI-LSS%20Handbook,%20July%202008.pdf> (Accessed 18.05.2022).

36. Lean Government // EPA – United States Environmental Protection Agency [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.epa.gov/lean/government/> (Accessed 15.05.2022).
37. Target program "Implementation of the methodology "Lean production" in the Republic of Tatarstan for 2012-2013" [Electronic resource]. – Access mode: <https://internet.garant.ru/#/document/34580878> (date of access: 11/22/2022).
38. What is Lean Government? [Electronic resource]. – Access mode: <https://planet-lean.com/focus/lean-government/> (Accessed 03.11.2022).
39. Passport of the national project (program) "Labor productivity and employment support" (approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for strategic development and national projects) (minutes of December 24, 2018 No. 16) [Electronic resource]. – Access mode: <https://internet.garant.ru/#/document/72185994> (accessed 22.08.2022).
40. Minutes No. 1 of the meeting of the Council of Chief Designers for Lean Technologies of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra [Electronic resource] - Access mode: <http://www.surgu.ru/instituty/institut-ekonomiki-i-upravleniya/nauchno-obrazovatelnye-tseny/berezhlivoe-proizvodstvo/meropriyatiya-po-berezhlivomu-proizvodstvu> (accessed 03.11.2020).
41. Decree No. 455-rp of the Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Ugra dated August 19, 2016 "On the concept of "thrifty region" in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra" [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/429064584> (accessed 22.08.2021).
42. Decree of the Board of the Administration of the Kemerovo Region of September 28, 2018 No. 407 "On Approval of the State Program of the Kemerovo Region "Industry Development of the Kemerovo Region" for 2019-2021" [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/561549356> (accessed 03.09.2021).
43. Decree of the Government of the Belgorod Region dated May 28, 2018 No. 161-pp "On Approval of the Regulations on Lean Management in Executive Authorities and State Bodies of the Belgorod Region" [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/550110788> (accessed 22.08.2021).
44. Womack, J. Lean Manufacturing: How to get rid of waste and make your company prosper: a tutorial / James Womack, Daniel Jones; per. from eng. – 7th ed. – M.: Alpina Publisher, 2013. – 472 p.
45. Project "Effective region" Chelyabinsk region [Electronic resource]. – Access mode: <http://mininform74.ru/Upload/files/Project%20Effective%20region.pdf> (accessed 03.11.2020).
46. Official website of the interregional forum "Lean management 2.0. Energy of Action 2020" [Electronic resource]. – Access mode: <https://leanforum31.ru/> (accessed 22.08.2021).
47. Lean production: textbook / V. V. Glukhov, S. N. Kuzmina, V. A. Leventsov, M. G. Livintsova, E. E. Abushova, A. V. Chernikova, A. A. Yakovlev, T. S. Lebedeva, V. V. Tereshchenko. - St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. - 244 p.
48. Gorbashko, E.A. Quality management: a textbook for bachelors / E.A. Gorbashko. - 2nd ed., Rev. and additional - M. : Yurayt Publishing House, 2014. - 463 p.
49. Valeeva, Yu. S. Stimulating the development of electric transport as a tool for the development of the territory / Yu. S. Valeeva, M. V. Kalinina, T. G. Zorina, I. G. Akhmetova // Bulletin of the Kazan State Energy University. - 2022. – P.155–172.

#### **Authors of the publication**

*Vitaliy S. Antonov* – Senior lecturer of «Digital economy and quality management», Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov.

*Получено*

*03.03.2023г*

*Отредактировано*

*10.03.2023г*

*Принято*

*14.03.2023г*

## РОССИЯ В СИГРЭ: ИСТОРИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА

Воденников<sup>1</sup> Д.А., Жилкина<sup>2</sup> Ю.В., Ахметшин<sup>3</sup> А.Р.

<sup>1</sup>Филиал «Московские кабельные сети», Москва

<sup>2</sup>Филиал ПАО «Россети» - МЭС Центра, Москва

<sup>3</sup>Казанский государственный энергетический университет

[zhilkina.yulia@gmail.com](mailto:zhilkina.yulia@gmail.com)

17 ноября 1923 года это официальная дата присоединения России к Международному Совету по большим энергетическим системам высокого напряжения (СИГРЭ). Во второй сессии Совета, проходившей в ноябре-декабре 1923 года, приняли участие семеро делегатов от РСФСР.

Днем основания Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) официально считается 21 ноября 1921 года. Именно в этот день в Париже начала работу первая конференция СИГРЭ. Тогда аббревиатура CIGRE расшифровывалась как *Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension* — Международная конференция по большим электрическим системам высокого напряжения. Современное название (с сохранением аббревиатуры) — *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения) — этот совещательный орган получил только в 2000 году.

В первой конференции СИГРЭ, состоявшейся в 1921 году, приняли участие инженеры в области техники высоких напряжений из 12 стран. Основную массу участников составили французские специалисты (187 представителей).

В годы Второй мировой войны деятельность СИГРЭ, как и многих других международных организаций, была приостановлена. Первая послевоенная сессия (11-я по счету) прошла летом 1946 года. В ней приняли участие 950 делегатов из 27 стран. СССР на этой сессии представляли четыре специалиста. В их числе был и выдающийся ученый, инженер, первый в России профессор электротехники, основатель отечественной электротехнической науки, один из разработчиков плана ГОЭЛРО, академик Михаил Андреевич Шателен. Он стал первым представителем Советского Союза в Административном совете СИГРЭ.

В 1950-е годы участие советских специалистов в работе СИГРЭ стало еще более активным. Во-первых, расширилось представительство СССР в Административном совете и других руководящих органах СИГРЭ. Во-вторых, возросла роль советских специалистов в работе исследовательских комитетов. В-третьих, значительно увеличилось количество докладов делегатов из СССР на сессиях.

Одним из наиболее ярких событий этого периода стал представленный в 1956 году на сессии СИГРЭ профессором Вениковым доклад «Экспериментальные и аналитические исследования устойчивости энергосистем при автоматическом регулировании возбуждения генераторов». Доклад был сделан с демонстрацией осциллограмм (записанных на работающей воздушной линии 400 кВ и на модели), а также практических результатов исследований и экспериментов, в том числе, по внедрению многочисленных типов релейных защит и автоматических регуляторов возбуждения сильного действия. Доклад вызвал настоящую сенсацию в мировом энергетическом сообществе. Под его влиянием во Франции, Австралии и других странах началось создание электродинамических моделей энергосистем с использованием научных разработок В.А. Веникова.

Другим важным достижением десятилетия стало создание в 1957 году Советского национального комитета СИГРЭ. Это стало окончательным подтверждением лидирующих мировых позиций советской энергетики в части разработок по актуальным направлениям. Первым председателем Советского НК стал профессор Лев Гразданович Мамиконянц, его заместителем — председатель Советского комитета по участию в международных энергетических организациях (СовМЭК) Борис Павлович Лебедев.

В 1970-х советская энергетика вновь оказалась на лидирующих мировых позициях. На этот раз — в части реформирования систем оперативно-диспетчерского управления. К этому времени ведущие державы мира (в том числе и СССР) завершили начатый в 50-е годы процесс формирования крупнейших национальных энергообъединений. Такие системы показали высокую устойчивость при единичных нарушениях электроэнергетического режима. Однако обнаружилась новая проблема — системные аварии с развитием каскадных отключений. Уязвимость энергосистем того периода



продемонстрировали масштабные системные аварии в США и Франции. Соответственно одним из главных направлений работы СИГРЭ стало формирование комплексных систем управления в аварийных режимах. Отечественная энергетика, в которой первые элементы автоматического противоаварийного управления появились еще в 1940-х, трехуровневая структура оперативно-диспетчерского управления — в конце 1950-х, а ЭВМ при расчетах электроэнергетических режимов применялись с конца 1960-х, закономерно вошла в число лидеров.

К началу 1980-х годов в мире сформировались три больших международных энергообъединения с установленной мощностью более 250 млн кВт. Это североамериканское объединение энергосистем США и Канады, западноевропейский Союз по координации производства и передачи электроэнергии (UCPTE) и энергообъединение стран Восточной Европы и СССР (СЭВ «Мир»). Ответом на этот вызов со стороны СИГРЭ стало создание трех новых исследовательских комитетов: ИК-37 — Планирование и развитие энергосистем; ИК-38 — Анализ и технология энергосистем; ИК-39 — Работа энергосистем и управление.

В работе новых комитетов приняли активное участие и советские энергетики. В этот период СССР (наряду с США, Францией, Великобританией, ФРГ, Бразилией, Японией, Швецией, Австралией и Швейцарией) входил в первую десятку по количеству индивидуальных и коллективных членов СИГРЭ. А в 1989 году в Советском Союзе прошло заседание исполнительного комитета СИГРЭ. В его рамках отечественные ученые представили доклады о проектировании ЛЭП и подстанций 1150 кВ, о новых изоляционных материалах, о концепциях ограничения токов короткого замыкания на линиях высокого напряжения, поделились опытом создания в СССР системы противоаварийного управления, а также опытом использования вычислительной техники для управления устойчивостью энергосистем.

Еще одним трендом работы СИГРЭ в 1980-е стала «зеленая» повестка. Большое внимание начало уделяться экологической составляющей работы больших энергосистем. В этот период обобщается опыт проводимых в разных странах масштабных исследований влияния электромагнитного поля линий высокого напряжения и радиопомех на окружающую среду. По итогам этих исследований были сформированы единые рекомендации по параметрам строительства высоковольтных ЛЭП.

Итоговым событием десятилетия стало создание в 1989 году специальной экспертной группы СИГРЭ-2000. Ее основной задачей стала разработка предложений по модернизации самого Совета. Необходимость реформ в СИГРЭ была продиктована временем. Рубеж 80-х и 90-х годов XX века отметился быстрой сменой технологий, замедлением темпов роста потребления электроэнергии, ростом обеспокоенности общества состоянием окружающей среды, повышением требований к качеству электроэнергии. Соответственно стремительно менялись условия существования всей мировой энергетике, а экспертной группе требовалась понять, как существовать в новых условиях. Исследование, проведенное экспертной группой, и представленный по его итогам доклад определили основные векторы развития СИГРЭ, которым организация следовала в последнее десятилетие XX века. Среди таких трендов: укрепление взаимоотношений с властями и общественностью, повышение статуса СИГРЭ и привлечение в ее ряды молодых специалистов, пересмотр основных организационных принципов работы и тематики обсуждений и исследований.

В целом в мировой энергетике 1990-е годы стали эпохой глобальной трансформации. Например, благодаря развитию компьютерных технологий отрасль вышла на принципиально новый виток развития в части управления режимами энергосистем. Возник устойчивый тренд освоения возобновляемых источников энергии. Изменилась модель управления отраслью — электроэнергетика многих стран перешла на рыночную основу с разделением генерирующей, сетевой и энергосбытовой составляющих. Возникли новые правила регулирования рынка, особую роль в котором получили системные операторы. На этом этапе СИГРЭ становится по-настоящему влиятельной международной организацией. Растет и интерес энергетиков разных стран к деятельности Совета. В 33-й сессии, состоявшейся в августе-сентябре 1990 года в Париже, приняли участие более двух с половиной тысяч делегатов.

Российская делегация на выставке СИГРЭ-ЭКСПО 1996 года

В этот же период в рамках сессий СИГРЭ начали проводиться международные технические выставки, на которых демонстрировались новые решения в области производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Первая выставка СИГРЭ-ЭКСПО прошла в 1994 году. Выставка в очередной раз подтвердила статус электроэнергетики как одной из самых высокотехнологичных отраслей экономики. Именно

в 1990-е появились вакуумные и элегазовые выключатели, начали широко применяться полимерные изолирующие материалы.

Соответствующим образом изменилась и тематика исследований СИГРЭ. Среди наиболее актуальных тем 1990-х можно назвать применение в высоковольтных сетях оборудования на базе силовой электроники на основе тиристоров, позволяющего обеспечить эффективное преобразование электроэнергии, быстродействие коммутации и управления энергообъектами, и организацию систем мониторинга состояния энергооборудования с применением цифровых систем, мобильной связи и оптоволоконных технологий.

Российская энергетика в 90-е годы, как и вся страна, переживала не лучшие времена. После ликвидации СССР в 1991 году электросетевой комплекс бывшего Союза некоторое время продолжал функционировать как единая централизованно управляемая система. Однако из-за образования независимых государств на территории бывшего СССР произошел раздел электроэнергетической собственности между ними. Это деление вызвало коренные изменения в структуре управления электросетевым комплексом и поставило перед отраслью принципиально новые вызовы. Ответом на них стал Электроэнергетический Совет СНГ, созданный в 1992 году. В него вошли 11 государств-членов СНГ, заключивших соглашение «О координации межгосударственных отношений в области электроэнергетики СНГ».

Распад Советского Союза не мог не отразиться на организационном и технологическом развитии отрасли. Модернизацию, которую страны-участницы СИГРЭ проводили в начале десятилетия, Россия смогла реализовать только на рубеже веков. И здесь важную роль сыграл накопленный и обобщенный СИГРЭ мировой опыт перехода на рыночное регулирование. Именно он стал основой российской модели реформирования электроэнергетики, разработанной по инициативе ОАО РАО «ЕЭС России».

Несмотря на непростую ситуацию и экономический кризис в стране, российские ученые и энергетики-практики в 90-е годы продолжали участвовать в работе СИГРЭ. Многие проекты в этот период были остановлены, многие исследования прекратились. Доклады российских ученых этого периода касались преимущественно новых методов диагностики износа оборудования, продления сроков его эксплуатации, повышения системной устойчивости крупных энергосистем. Кроме того, именно ситуация в России 90-х создала новую тему для исследований — перспективы создания общеевропейского объединения Восток-Запад. Попытки обсуждения различных аспектов этой темы в рамках СИГРЭ, предпринятые российскими энергетиками 90-х, буквально опередили время и стали базой для международного проекта, реализованного десятилетием позже — во второй половине 2000-х.

Начало XXI века ознаменовалось в СИГРЭ принятием стратегического документа — «Мастер-плана», определяющего цели, задачи и основы деятельности организации в новом тысячелетии. На этот момент Совет имел статус авторитетной и уникальной по своей роли международной ассоциации энергетиков и активно работающего профессионального сообщества. Дальнейшие цели СИГРЭ «Мастер-план» формулировал так: «Сохранить позицию ведущего мирового эксперта по всем проблемам функционирования и развития энергосистем, быть авторитетом для руководителей энергокомпаний, фирм-производителей оборудования, инжиниринговых центров, регулирующих органов при принятии им решений по различным техническим, экономическим, экологическим и организационным вопросам в сфере электроэнергетики». Кроме этого, «Мастер-план» предполагал расширение сферы интересов СИГРЭ на смежные с электроэнергетикой области и специальные вопросы отрасли (капитальные вложения, затраты, тарифное регулирование и др.). Также планировалось расширять сотрудничество с другими международными организациями: Мировым энергетическим советом (МИРЭС), Международным конгрессом по электрическим распределительным системам (СИРЭД) и другими.

Что касается российской энергетики, для нее начало столетия стало периодом восстановления позиций на международном уровне, прежде всего — именно в СИГРЭ. Коренная реформа отрасли, прошедшая в 2000-е, позволила создать новую структуру российской энергетики. Ученые и практики отрасли смогли вернуться к исследованиям и разработкам. Основными направлениями научной и инженерной работы этого периода стали вопросы планирования развития энергосистем и обеспечения международных связей между специалистами. Представительство России на сессиях СИГРЭ вновь вернулось на высокий уровень. Доклады российских делегатов на сессиях 2000-х годов касались вопросов реформирования энергетики, мониторинга надежности энергосистем, продления сроков эксплуатации подстанционного оборудования сверхвысокого напряжения, создания

интегрированных систем управления такими подстанциями, повышения эффективности систем технологического управления энергообъединениями, освоения новейших методов мониторинга переходных режимов работы энергосистем на базе технологий векторных измерений и многих других.

Отдельного упоминания заслуживает проект, реализованный в 2005–2008 годах международной группой специалистов. Консорциум составили представители РНК СИГРЭ, Системного оператора и ряда отечественных и европейских компаний. В основу масштабного исследования легла озвученная еще в 90-е годы российскими делегатами идея создания общеевропейского объединения Восток-Запад. В рамках проекта специалисты изучили возможности совместной синхронной работы двух крупнейших электроэнергетических систем Евразийского континента: энергосистем стран СНГ и Балтии (ЕЭС/ОЭС) и стран, входивших в европейское объединение УСТЕ. Итогом работы стало технико-экономическое обоснование, описывающее технические, организационные и юридические аспекты возможного синхронного объединения. Исследование вошло в число стратегических интересов СИГРЭ, поскольку Совет давно рассматривал возможность создания ГЭЭС — глобальной электроэнергетической системы.

Еще одним плодом сотрудничества РНК СИГРЭ и Системного оператора стала международная конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». Третьим организатором конференции выступило ОАО «ВНИИР». Форум впервые состоялся в 2007 году и стал проводиться на регулярной основе раз в два года. Впоследствии конференция была объединена с другим отраслевым мероприятием — Международной выставкой и научно-практической конференцией «Релейная защита и автоматика энергосистем».

Также во втором десятилетии XXI века Россия впервые в своей современной истории стала местом проведения Административного совета СИГРЭ. Главный руководящий орган СИГРЭ собирался в нашей стране в 2013 году. А незадолго до этого — в 2012-м — была создана молодежная секция Российского НК СИГРЭ — специализированная программа для студентов, бакалавров и магистрантов российских технических вузов, обучающихся по электроэнергетическим специальностям, а также аспирантов и молодых ученых, занимающихся научными исследованиями. На сегодняшний день деятельность молодежной секции РНК СИГРЭ признана одной из самых активных и эффективных в мире.

В 2022 году, уже 49-я Сессия СИГРЭ состоялась в Париже в период с 28 августа по 2 сентября 2022 года. Торжественное открытие 49-й сессии СИГРЭ (CIGRE 2022) состоялось 28 августа в парижском Дворце Конгрессов (Palais des Congres). В мероприятии приняли участие более 2300 делегатов и представителей мировых энергетических компаний, научно-исследовательских организаций, регулирующих структур, производителей оборудования и материалов для электроэнергетики, проектных институтов и высших учебных заведений из 80 стран мира. Впервые с 2018 года Сессии СИГРЭ вновь прошла в очном формате.

Но в связи с действующими в ряде стран ограничениями на перемещения, связанные с пандемией коронавируса, некоторые делегаты и гости СИГРЭ 2022 не смогли присутствовать на 49-й Сессии очно.

Делегацию НИК ВЗ «Подстанции и электроустановки» РНК СИГРЭ на 49-й Сессии СИГРЭ в Париже очно представляли: руководитель комитета Дмитрий Александрович Воденников (с 2018 г. представитель РНК СИГРЭ в SC ВЗ СИГРЭ), российские специалисты: А.В. Селиханович, Л.М. Поспеев (ООО «МТК Бизнес.Оптим») и др. Дистанционно участие принимали секретарь НИК ВЗ Ю.В. Жилкина, представитель России в CIGRE WiE («Женщины в энергетике»).

Работа исследовательского комитета ВЗ СИГРЭ (SC ВЗ СИГРЭ) на 49-й Сессии предусматривала:

- заслушивание докладчиков представленных докладов на постер – сессии;
- участие в обсуждении представленных докладов и ответы на вопросы к докладам от специальных корреспондентов SC ВЗ СИГРЭ на «Group Discussion Meeting ВЗ»;
- участие в работе представителей международных рабочих групп;
- заслушивание докладов молодых специалистов из национальных молодежных секций;
- участие руководства национальных комитетов и членов SC ВЗ СИГРЭ в стратегическом планировании деятельности SC ВЗ СИГРЭ.

На 49-ю Сессию СИГРЭ от России было отобрано около 50 докладов, которые вызвали живой интерес у участников и посетителей постер-сессии.

29 августа 2022 года в рамках постер-сессии Исследовательского комитета ВЗ «Подстанции и электроустановки» представлено 2 доклада:

Комплексная интеллектуальная автоматизированная система мониторинга, диагностирования и управления техническим состоянием парка силовых трансформаторов, авторы: Д.А. Воденников, И.В. Давыденко, А.В. Селиханович, Л.М. Поспеев.

Автономный программно-технический комплекс предупреждения технологических нарушений основного оборудования подстанций на основе данных дистанционного наблюдения, авторы: Г.К. Гладковский, И.Л. Архипов, Д.С. Капустин, Э.В. Магадеев, А.В. Селиханович, О.Г. Шагмуратов.

В четверг, 1 сентября 2022 года началась активная работа профильных секций СИГРЭ. В одном из залов совещаний прошло 60-е заседание Исследовательского комитета ВЗ «Подстанции и электроустановки» под председательством Koji Kawakita. Заседание объединило большое число экспертов электроэнергетики из разных стран, которые имели возможность не только представить коллегам результаты своих научных изысканий, но и получить от них конструктивные предложения по дальнейшей проработке актуальных тем, а также узнать о результатах аналогичных исследований в других странах. На заседании были подведены итоги деятельности за последние два года, а также определены приоритетные темы для рассмотрения на 50-й Сессии СИГРЭ в 2024 году и новые международные рабочие группы по актуальным направлениям исследований «Подстанции и электроустановки».

Руководитель НИК ВЗ РНК СИГРЭ Д.А. Воденников принял участие в тренинге на тему: «Индексы состояния активов для оборудования существующих подстанций» и совместном семинаре ИК АЗ и ВЗ «Варианты элегазового оборудования для передающих и распределительных подстанций, и их распределительных устройств».

На полях Сессии СИГРЭ директор «Московские кабельные сети», Руководитель НИК ВЗ РНК СИГРЭ Дмитрий Александрович Воденников награжден Медалью «20 лет «РОССЕТИ ФСК ЕЭС».

Подробная информация об итогах работы российской делегации на 49-й Сессии СИГРЭ представлена в техническом отчете комитета ВЗ РНК СИГРЭ.

Принимая во внимание глобальный тренд на увеличение роли женщин во всех сферах профессиональной и управленческой деятельности, с учетом достижений России в области обеспечения недискриминационного доступа к техническим профессиям, РНК СИГРЭ в 2019 году присоединился к международному движению «Женщины в энергетике» (SIGRE WiE). Форум «Женщины в энергетике» проводится в рамках Сессий СИГРЭ с 2016 года.

SIGRE WiE — это форум, на котором женщины-инженеры могут взаимодействовать, развивать свою карьеру, повышать свои профессиональные навыки и воплощать в жизнь свои достижения.

Это прекрасная возможность для женщин, уже активно работающих в СИГРЭ, и тех, кто активно участвует в энергетике, встретиться друг с другом и с представителями руководящих органов СИГРЭ и обсудить практические решения, обеспечивающие расширенное и устойчивое участие женщин в области энергетики.

К формированию повестки форумов активно привлекаются национальные комитеты СИГРЭ, действующие в странах — членах ассоциации.

В рамках 49-й Сессии СИГРЭ 1 сентября 2022 года состоялся VI международный Форум «Женщины в энергетике».

Всем участникам форума было предложено ответить на вопрос о том, каким образом должен осуществляться энергетический переход на протяжении следующего столетия и какова роль женщин в этом глобальном процессе. При этом, по мнению организаторов форума, СИГРЭ здесь отводится центральная роль, поскольку организация объединяет не только техническую мысль, но и специалистов из различных стран, их способности, компетенции, мнения и ожидания.

Перед началом дискуссии перед участниками форума выступила Председатель объединения СИГРЭ «Женщины в энергетике» Хаякази Диока (Khayakazi Dioka). Спикер в очень эмоциональной форме рассказала о роли форума и основных его достижениях за период 2018-2022 гг. Также спикер сделала акцент на целях глобального энергетического перехода и отметила возрастающую роль женщин в процессах управления энергетическими компаниями и в работе научно-исследовательских комитетов.

С докладом о роли участия женщин в деятельности СИГРЭ и национальных комитетов выступил Генеральный секретарь организации Филипп Адам (Philippe Adam).

О важности вовлечения женщин в деятельность СИГРЭ говорили и другие спикеры. Отмечена высокая активность женщин в различных направлениях деятельности энергокомпаний, в том числе и технической, а также такие важные личностные характеристики.

На форуме были обсуждены перспективы для женщин в сфере энергетики СИГРЭ перспектива на будущее. Онлайн-участие на форуме приняла Юлия Жилкина к.э.н., представитель России в форуме «Женщины в энергетике».

Всем желающим присоединиться к Форуму можно по ссылке <http://cigre.ru/wie/join/>

На сегодняшний день члены РНК СИГРЭ осуществляют свою деятельность в рамках всех 16 исследовательских комитетов, существующих в СИГРЭ:

A1 Вращающиеся электрические машины: Турбогенераторы, гидрогенераторы, конвекционные машины и большие двигатели.

A2 Силовые трансформаторы и реакторы: Проектирование, производство и эксплуатация всех типов трансформаторов, их компонентов и стабилизаторов.

A3 Оборудование для магистральных и распределительных электрических сетей: Устройства переключения, прерывания и ограничения тока, конденсаторы и т.д.

V1 Изолированные кабели: Подземные и подводные изолированные кабельные системы постоянного и переменного тока.

V2 Воздушные линии: Воздушные линии электропередачи и их компоненты, включая провода, опоры, системы фундамента и т.д.

V3 Подстанции и электроустановки: Строительство, эксплуатация и управление подстанций и электроустановок, исключая генераторы.

V4 Системы постоянного тока и силовая электроника: Высоковольтные вставки постоянного тока, силовая электроника и т.д.

V5 Релейная защита и автоматика: Проектирование, эксплуатация и управление систем РЗА, технические средства, технологии векторных измерений и т.д.

C1 Планирование развития энергосистем и экономика: Экономические показатели, методы системного анализа, стратегии управления активами.

C2 Функционирование и управление энергосистем: Аспекты управления техническими и иными ресурсами при эксплуатации энергосистем.

C3 Влияние энергетики на окружающую среду: Определение и оценка влияния энергосистем на окружающую среду.

C4 Технические характеристики энергосистем: Методы и инструменты анализа технических характеристик, оценка надежности.

C5 Рынки электроэнергии и регулирование: Анализ подходов к организации энергоснабжения, структуры рынка и т.д.

C6 Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергоресурсы: Внедрение распределенной генерации, оценка влияния и технических требований и т.д.

D1 Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики: Материалы для электротехнического оборудования, методы диагностики и др.

D2 Информационные системы и телекоммуникации: Перспективные технологии, принципы стандартизации, технические характеристики и т.д.

Сдано в набор 15.03.2023 г  
Бумага офсет 80 г. Печать  
ризографическая  
Тираж 45 экз.

Подписано к печати  
Усл. печ. л. 16,62  
Заказ №  
Дата выхода в свет

Формат 60x90/8.  
Уч.изд. л. 14,75.  
Цена свободная