

ISSN 2072-6007



КГЭУ

ВЕСТНИК

КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



KAZAN STATE POWER ENGINEERING
UNIVERSITY BULLETIN

2023, том 15

№ 2 (58)

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
T.15, №2(58)

Периодичность – 4 раза в год

ISSN 2072-6007 (Print)

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:
Казанский государственный энергетический университет

ОСНОВНАЯ РУБРИКА ЖУРНАЛА:

ВАК:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Главный редактор:	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э. Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Зам.главного редактора	STANIMIR VALTCHEV
Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	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.	

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

VESTNIK KAZANSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ENERGETICHESKOGO UNIVERSITETA

Founder:
Kazan State Power Engineering University

2023
Vol.15, №2(58)

Publication Frequency – Quarterly

ISSN 2072-6007 (Print)

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief:

ABDULLAZYANOV EDVARD YUNUSOVICH

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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	

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Tel./fax: +7 (843) 527-92-76

Printing House: Printing House: LLC "FOLIANT"

Address of the printing house: Address of the printing house: 420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Str. Trade Union, 17 V

Email: vkgeu@bk.ru

Site: www.vkgeu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

РОТАЧ Р.Р., ВАНЬКОВ Ю.В., ВАЛИЕВ Р.Н. Методика расчета энергетических показателей энергокомплекса, включающего промышленно-отопительную котельную и винтовую расширительную машину.	3
ВЛАСОВА А.Ю. Сравнительный анализ флокулянтов применяемых для очистки воды хозяйственно-питьевого назначения при различных температурных режимах водоисточника.	16
СНЕГИРЕВ Д.А., ПАЗДЕРИН А.В., САМОЙЛЕНКО В.О., ЕРОХИН П.М. Разработка методики аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции от внешних метеорологических факторов.	29
ДЕРЮГИНА Г.В., ИГНАТЬЕВ Е.В., СЫЧЁВ Н.В. Оптимизация конфигурации ветроэнергетического комплекса в составе ОЭС Средней Волги.	45
ЗВЕРЕВА Э.Р., ЭМИНОВ А.А., ЗВЕРЕВ Л.О., ЛИПАТОВ Д.В. Состав и свойства нефтяных шламов.	58
ЕРМАКОВ А.М., САЛАХОВ Р.Р., ХИСМАТУЛЛИН Р.М., МЕЛИХОВ М.К. Пути повышения эффективности работы климатических установок электробуса при работе в холодное время года.	68
СОЛОВЬЕВА О.В., СОЛОВЬЕВ С.А., ШАКУРОВА Р.З., СИНИЦЫН А.А., ЗАКРЕВСКАЯ Л.В., АНАНЬЕВ М.С. Экспериментальные исследования теплофизических свойств высокопористых композитных пенобетонов с различными наполнителями.	78

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., ИБАТУЛЛИН Э.Э., ПЕТРОВА Р.М., СИНИОКОВАТ.В. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности.	93
ВИНОГРАДОВ А.В., ЮФЕРЕВ Л.Ю., БОЛЬШЕВ В.Е., ГУСАРОВ В.А., БУКРЕЕВ А.В., БОРОДИН М.В. Обзор однопроводных резонансных систем передачи электрической энергии.	109
САБИТОВ Р.В., КИРПИЧНИКОВА И.М., ГОРШКОВ К.Е. Применение погружного компенсирующего устройства в нефтедобыче.	128

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

ПРУСОВ С.Г., ЗОРИНА Т.Г., ЮРКЕВИЧ О.И. Оценка влияния программы цифровизации систем учета электрической энергии на уровень тарифов на электроэнергию в Республике Беларусь.	140
МАЛЁВ Н.А. Исследование цифровых моделей чувствительности следящего электропривода.	157

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

ИВАШКИН Д.С., ЧИРКОВА И.Г. Внутреннее углеродное ценообразование мировых и российских энергокомпаний.	175
--	-----

CONTENTS

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ROTACH RR, VANKOV YUV, VALIEV RN. Methodology for calculation of energy indicators of the energy complex, including industrial heating boiler and screw expansion machine.	3
VLASOVA AY. Comparative analysis of flocculants used for water purification for household and drinking purposes at different temperature conditions of the water source.	16
SNEGIREV DA, PAZDERIN AV, SAMOYLENKO VO, EROKHIN PM. Modern approaches to the organization of power supply of railway lines in remote and isolated territories. Development of an improved wind farm power curve approximation approach.	29
DERYUGINA GV, IGNATIEV EV, SYCHEV NV. Optimization of the configurations of the wind power complex as a part of the IPS of the middle Volga.	45
ZVEREVA ER, EMINOV AA, ZVEREV LO, LIPATOV DV. Composition and properties of oil sludge.	58
ERMAKOV AM, SALAKHOV RR, HISMATULLIN RM, MELIKHOV MK. Ways to increase the efficiency of electric bus climate installations when operating in the cold season.	68
SOLOVEVA OV, SOLOVEV SA, SHAKUROVA RZ, SINITSIN AA, ZAKREVSAYA LV, ANANIEV M.S. Experimental studies of the thermophysical properties of highly porous composite foam concrete with different fillers.	78

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

ABDULLAZYANOV EYU., GRACHEVA EI, IBATULLIN EE, PETROVA P.M., SINYUKOVA TV. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity.	93
VINOGRADOV AV, YUFEREV LYU, BOLSHEV VE, GUSAROV VA, BUKREEV AV, BORODIN MV. Review of single-wire resonant electrical power transmission systems.	109
SABITOV RV, KIRPICHNIKOVA IM, GORSHKOV KE. The use of a submersible compensating device in oil production.	128

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION

PRUSOV SG, ZORINA TG, YURKEVICH OI. Assessment of the impact of the digitalization program of electric energy metering systems on the level of electricity tariffs in the Republic of Belarus.	140
MALEV NA. Research of digital sensitivity models of a servo drive.	157

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

IVASHKIN DS, CHIRKOVA IG. Internal carbon pricing of foreign and Russian energy companies.	175
--	-----

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.93

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНУЮ КОТЕЛЬНУЮ И ВИНТОВУЮ РАСШИРИТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Валиев Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
rita-nurkaeva@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В России имеется потенциал энергосбережения, который достигает примерно третьей части текущего расхода электроэнергии, и есть возможности существенного увеличения финансовой рентабельности проектов в сфере энергетики. *ЦЕЛЬ.* Разработка методики, позволяющей определить энергетические показатели при совместной работе паровых котлов, винтовой расширительной машины (ВРМ) и тепловой сети.

МЕТОДЫ. Для реализации поставленной цели применено последовательное использование методов расчета тепловых схем энергообъектов, систем теплоснабжения, а также режимных и выходных параметров энергетического оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам расчета были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха с учетом ограничений по температурному графику тепловой сети, а также максимальной паропроизводительности котлов.

ВЫВОДЫ. Вариант модернизации промышленно-отопительной котельной с установкой ВРМ после паровых котлов является энергосберегающим решением, поскольку позволяет в период использования покрывать нагрузку на отопление, вентиляцию и ГВС, а также вырабатывать электрическую энергию на покрытие собственных нужд котельной.

Ключевые слова: винтовая расширительная машина; винтовой детандер; тепловая сеть; паровой котел; энергетические показатели.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2023-291 от 16.01.2023 года.

Для цитирования: Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Валиев Р.Н. Методика расчета энергетических показателей энергокомплекса, включающего промышленно-отопительную котельную и винтовую расширительную машину // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2 (58). С.3-15.

METHODOLOGY FOR CALCULATION OF ENERGY INDICATORS OF THE ENERGY COMPLEX, INCLUDING INDUSTRIAL HEATING BOILER AND SCREW EXPANSION MACHINE

RR. Rotach, YuV. Vankov, RN. Valiev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
rita-nurkaeva@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Russia has the potential for energy savings, which reaches about a third of the current electricity consumption, and there are opportunities to significantly increase the financial profitability of projects in the energy sector. *PURPOSE.* Development of a methodology that allows determining energy performance in the joint operation of steam boilers, a screw expansion machine (SEM) and a heating network.

METHODS. To achieve this goal, the consistent use of methods for calculating thermal schemes of power facilities, heat supply systems, as well as regime and output parameters of power equipment was applied.

RESULTS. According to the results of the calculation, the dependences of the steam consumption on the network heaters and the electrical power of the SEM on the outdoor air temperature were obtained. Taking into account the comparison of the obtained dependencies and the imposition of restrictions on the temperature schedule of the heating network, as well as the maximum steam output of the boilers.

CONCLUSIONS. The option of upgrading an industrial heating boiler house with the installation of a SEM after steam boilers is an energy-saving solution, since it allows covering the load for heating, ventilation and hot water during the period of use, as well as generating electricity for the boiler house's own needs

Keywords: screw expansion machine (SEM); screw expander; heating network; steam boiler; energy indicators.

Acknowledgments: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2023-291 from 16.01.2023.

For citation: Rotach RR, Vankov YuV, Valiev RN. Methodology for calculation of energy indicators of the energy complex, including industrial heating boiler and screw expansion machine. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):3-15.

Введение (Introduction)

В России имеется потенциал энергосбережения, который достигает примерно третьей части текущего расхода электроэнергии, и есть возможности существенного увеличения финансовой рентабельности проектов в сфере энергетики [1].

Потребление энергии в России имеет свои особенности [2]:

1. 2/3 территории страны не имеют централизованного снабжения тепловой и электрической энергией. Тарифы на электрическую энергию в удаленных населенных пунктах достигают значений 23- 25 руб./кВт·ч.

2. Более половины регионов испытывают дефицит энергоресурсов и электрической энергии и вынуждены закупать топливо и импортировать электроэнергию.

3. Газифицировано не более 50% населенных пунктов, в сельской местности не более 35%.

Большая часть электрической и тепловой энергии вырабатывается на тепловых и атомных электрических станциях в комбинированном режиме в силовых агрегатах высокой мощности. Это позволяет сделать процесс выработки тепло-и электроэнергии экономичнее.

Вместе с тем, крупные энергетические комплексы имеют следующие недостатки [2]:

1. Тариф на электрическую энергию складывается из четырех составляющих: стоимость непосредственного производства электроэнергии генерирующими компаниями, стоимость передачи электроэнергии электросетевыми компаниями, инфраструктурные платежи системному оператору, сбытовая надбавка гарантирующему поставщику. Из всех четырех составляющих только 50% приходится на первую составляющую, на производство. Порядка 30% стоимости приходится на потери электроэнергии при передаче на дальние расстояния. Таким образом, высокая эффективность оборудования крупных энергопредприятий снижается из-за высоких издержек в процессе энергоснабжения потребителей.

2. Существующие энергосистемы являются высокоинерционными, поэтому им сложно обеспечивать изменения суточных графиков потребления энергии без весомых потерь.

Данные условия создают предпосылки для перехода от единой энергетической системы к малой распределенной энергетике.

В РФ являются действующими примерно 75 тысяч котельных, однако 46% тепловой и 30,6% электрической энергии вырабатывается на теплоэлектроцентралях, то есть в теплофикационном режиме. Поэтому в приоритете на будущее должен стать отказ от строительства новых котельных. Действующие же котельные необходимо достраивать до мини-ТЭЦ с применением схем когенерации [3].

Особый интерес представляют собой промышленно-отопительные котельные с паровыми котлами. Котлы, как правило, вырабатывают пар с давлением 1,3-1,4 МПа. Однако потребителям в основном требуется пар с более низким давлением (0,3-0,4 МПа). Для снижения давления пара используются редукционные устройства (РУ). В процессе дросселирования в РУ пар теряет свою потенциальную энергию, которую можно было бы полезно использовать. Для полезного использования потенциальной энергии пара необходимо установить детандер для выработки электрической энергии, тем самым достроив котельную до энергокомплекса малой распределенной генерации энергии [4].

Целью работы является разработка методики, позволяющей определить энергетические показатели при совместной работе паровых котлов, винтовой расширительной машины (ВРМ) и тепловой сети.

Научная и практическая новизна исследования. При применении разработанной методики были получены зависимости выработки электрической энергии ВРМ, а также расхода пара на сетевые подогреватели при изменении температуры наружного воздуха с учетом температурного графика тепловой сети.

Литературный обзор (Literature review)

Впервые детандеры стали применяться в производстве электрической энергии в середине XX века по предложению М.Д. Миллионщикова. Идея заключалась в использовании в детандере потенциальной энергии избыточного давления транспортируемого природного газа для выработки электроэнергии [5].

В настоящее время наибольшее распространение имеют поршневые детандеры и турбодетандеры, которые успешно эксплуатируются в различных установках на разнообразных газах и весьма широком диапазоне давлений и температур. В связи с расширением области использования детандеров к ним предъявляются специфические требования, например, расширение влажного или запыленного газа, работа на переменных режимах, которые не могут быть выполнены поршневыми детандерами и турбодетандерами без значительного снижения эффективности. Поэтому появилась необходимость в разработках, изготовлении и исследовании новых типов детандеров, которые обеспечили бы выполнение специфических требований при сохранении высокой эффективности, простоте и надежности конструкции [6].

Одним из перспективных типов детандеров является винтовой детандер. По конструкции он аналогичен винтовому компрессору и состоит из тех же основных узлов и деталей, отличаясь лишь отдельными элементами, что обусловлено особенностями рабочего процесса и условиями эксплуатации.

В 1934 году А. Лисхольм запатентовал конструкцию, принцип действия и профиль винтового зацепления сконструированного им винтового компрессора. Однако было обнаружено, что профиль зубьев винтового зацепления, образованный кривыми обкатками двух поверхностей, создавал серьезные затруднения для дальнейшего развития винтовых компрессоров [7].

В 1947 году фирмой SRM (Швеция) была запатентована новая форма профиля зубьев винтового зацепления, кругового симметричного. Использование этого профиля позволило значительно упростить технологический процесс изготовления винтов [7].

Большой вклад в исследование профилей зубьев винтового зацепления было сделано И.А. Сакуном.

И.А. Корнев в своих работах получил экспериментальные характеристики винтового детандера, разработал метод индцирования. Был проведен анализ и оценка степени влияния различных факторов на эффективность винтового детандера. Проведены практические мероприятия по повышению эффективности винтового детандера.

Репин А.Л. разработал математическую модель винтового детандера, на основании которой была также разработана методика расчета рабочих характеристик по водяному пару, которая учитывала непостоянство массы рабочего тела, явление конденсации в парных полостях детандера и образование жидкой фазы в потоке пара. Также Репиным был выполнен анализ работы ВРМ в связке с системой теплоснабжения. Были проанализированы возможности регулирования режима работы ВРМ при подключении и отключении тепловых потребителей.

Березин С.Р., Носков А.Н., Г.А. Щеглов в работе [8] предложили методику определения показателей рабочего процесса винтового детандера, учитывающую теплообмен перегретого и влажного пара со стенками детандера, а также потери рабочего тела, возникающих в результате дросселирования сквозь зазоры рабочих органов детандера.

В начале изучения винтовой машины большая часть исследований по термодинамике и винтовой механике была сосредоточена на винтовом компрессоре, а исследования

винтового расширителя были относительно небольшими. На основании большого количества экспериментальных данных Стосич и Смит в работе [9] исследовали параметры и термодинамическую модель винтового расширителя. Однако точность этой модели была низкой, поскольку они не учитывали влияние утечек, трения, теплового обмена масла и газа и других факторов.

Гуфрида и соавторы в работах [10-12] рассмотрели утечки рабочего тела в процессе расширения винтовом детандере. Также ими была разработана термодинамическая модель процессов, происходящих винтовом расширителе уже с учетом утечек рабочего тела и его теплообмена со стенками ВРМ.

Тиан и соавторы в [13] разработали термодинамическую математическую модель для изучения производительности винтового детандера в изменяющихся условиях эксплуатации. При моделировании учитывались потери давления на всасывании, а также утечки и теплообмен в процессе расширения. Результаты моделирования показывают, что коэффициент заполнения колеблется в пределах 0,82–0,88, а изоэнтропический КПД колеблется в пределах 0,73–0,83, что доказывает, что винтовой детандер является эффективной технологией.

Гуо и соавторы в работе [14] построили математическую модель процесса расширения винтового детандера. На основе математической модели методом численного моделирования изучено влияние площади поперечного сечения впускного и выпускного отверстий и коэффициента лобового сопротивления на эффективность винтового детандера.

Анализ литературы показывает, что множество работ посвящено изучению термодинамических процессов и геометрических параметров ВРМ. Одновременно с этим наблюдается недостаток исследований энергокомплексов с применением винтовых машин, имеющих специфические особенности изменения энергетических характеристик.

Методика (Methodology)

На рис.1 представлена схема методики расчета энергетических показателей энергетического комплекса, состоящего из промышленно- отопительной котельной, ВРМ и тепловой сети.

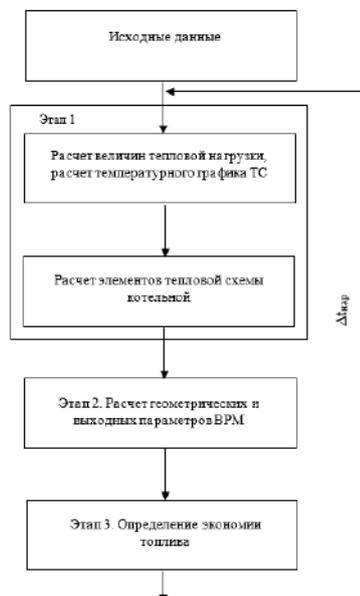


Рис. 1. Методика расчета энергетических показателей.

Fig. 1. Methodology for calculating energy indicators.

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Расчет первого этапа.

На первом этапе определяются максимальная часовая нагрузка на систему отопления. Производится расчет температурного графика тепловой сети. Так же на данном этапе рассчитываются показатели тепловой схемы производственно-отопительной котельной. Как итог данного этапа – определение расхода пара на сетевые подогреватели.

1.Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию в час в зависимости от температуры наружного воздуха, МВт

$$Q_o^u = Q_{Omax} \frac{t_{\epsilon.p} - t_n}{t_{\epsilon.p} - t_{p.o}} \quad (1)$$

$$Q_B^u = Q_{Vmax} \frac{t_{\epsilon.p} - t_n}{t_{\epsilon.p} - t_{p.\epsilon}} \quad (2)$$

где Q_{Omax} – максимальная нагрузка на отопление, МВт; Q_{Vmax} – максимальная нагрузка на вентиляцию, МВт; $t_{\epsilon.p}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы вентиляции, °С; t_n – температура наружного воздуха, °С; $t_{p.o}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления, °С; $t_{p.\epsilon}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы вентиляции, °С.

2. Среднечасовой расход тепла на ГВС, МВт

$$Q_{\epsilon.\epsilon}^u = \frac{m \cdot a \cdot c_p \cdot (t_{\epsilon} - t_x) \cdot 10^{-3}}{T \cdot 3600} \cdot \epsilon \quad (3)$$

где m – количество потребителей горячей воды, чел; a – среднесуточная норма расходов горячей воды на одного потребителя, л/сут.; c_p – массовая теплоемкость воды, кДж/(кг·К); t_{ϵ} – температура горячей воды, по которой устанавливается норма потребления, °С; t_x – температура холодной воды, принимаемая для отопительного периода +5°С, для летнего +15 °С; ϵ – коэффициент, учитывающий снижение среднечасового расхода воды на ГВС в летний период по отношению к отопительному; T – период потребления горячей воды в течение суток, ч.

3. Общая часовая тепловая нагрузка, МВт:

$$Q_{\text{сум}}^u = Q_o^u + Q_{\epsilon}^u + Q_{\epsilon\epsilon}^u \quad (4)$$

4. Расчётные зависимости для построения температурного графика тепловой сети

$$\tau_{10} = t_{\epsilon.p.} + \Delta t \cdot \left(\frac{t_{\epsilon.p.} - t_n}{t_{\epsilon.p.} - t_{p.o}} \right)^{0,8} + (\Delta \tau - 0,5 \cdot \theta) \cdot \left(\frac{t_{\epsilon.p.} - t_n}{t_{\epsilon.p.} - t_{p.o}} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{20} = t_{\epsilon.p.} + \Delta t \cdot \left(\frac{t_{\epsilon.p.} - t_n}{t_{\epsilon.p.} - t_{p.o}} \right)^{0,8} - 0,5 \cdot \theta \cdot \left(\frac{t_{\epsilon.p.} - t_n}{t_{\epsilon.p.} - t_{p.o}} \right) \quad (6)$$

где Δt – расчетная средняя разность температур отопительного прибора, вычисляемая по формуле:

$$\Delta t = \frac{\tau_{03}' + \tau_{02}'}{2} - t_{\epsilon p} \quad (7)$$

где τ_{03}' , τ_{02}' – температуры воды после элеватора и в обратной магистрали тепловой сети, вычисляемые при $t_{p.o}$

где $\Delta \tau$ – расчетный перепад температур в тепловой сети:

$$\Delta \tau = \tau_{01}' - \tau_{02}' \quad (8)$$

где τ_{01}' – температура воды в подающей магистрали тепловой сети, вычисляемая при $t_{p.o}$

где θ – расчетный перепад температур в отопительных приборах:

$$\theta = \tau'_{03} - \tau'_{02} \quad (9)$$

5. Расчетный часовой расход сетевой воды в зимнем режиме, МВт

$$G_{сет} = \frac{Q_{сум}^q \cdot 3600}{(\tau_{1max} - \tau_{2max}) \cdot c_g} \quad (10)$$

где τ_{1max}, τ_{2max} – максимальная температура воды в подающем и обратном трубопроводах соответственно, °С; c_g – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С).

6. Объем сетевой воды в системе теплоснабжения, м³

$$G_{сист} = g_{сист} \cdot Q_{сум}^q \quad (11)$$

где $g_{сист}$ – удельный объем воды в системе теплоснабжения на отопление, вентиляцию и ГВС, принимается 30 м³/МВт.

7. Расход подпиточной воды на восполнение утечек тепловой сети, м³/ч

$$G_{ум} = \frac{0,5}{100} \cdot G_{сист} \quad (12)$$

8. Количество обратной сетевой воды, м³/ч

$$G_{сет.обр} = G_{сет} - G_{ум} \quad (13)$$

9. Температура обратной сетевой воды перед сетевыми насосами, °С

$$t_3 = \frac{\tau'_{02} - G_{сет.обр} + t_d \cdot G_{ум}}{G_{сет}} \quad (14)$$

где t_d – температура воды после деаэратора (в среднем принимается 104 °С).

10. Расход пара на подогреватели сетевой воды, т/ч

$$D_{псв} = G_{сет} \cdot \frac{c_g \cdot (\tau_1 - t_3)}{(h_2 - h_k) \cdot \eta} \quad (15)$$

где η – КПД сетевого подогревателя., для сетевых подогревателей КПД принимается равным 0,98; c_g – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С); τ_1 – температура воды в подающем трубопроводе, °С; h_2 – энтальпия пара после РОУ, кДж/кг; h_k – энтальпия конденсата после пароводяного подогревателя сырой воды, кДж/кг.

Расчет второго этапа

На втором этапе, учитывая результаты расчета этапа 1, производится расчет геометрических и выходных параметров ВРМ. Конечный итог расчета – определение количества ВРМ и электрическая мощность каждого агрегата.

Перед расчетом нужно учесть, что на выходе из ВРМ необходимо получить пар тех же параметров, что и после РОУ. Расход пара после ВРМ равен $D_{псв}$

1. Удельный объём одного рабочего пространства, м³ [15]

$$V_h = 0,1144 \cdot D^2 \cdot L \quad (16)$$

где D – диаметр роторов ВРМ, м; L – длина роторов ВРМ, м

2. Теоретический расход пара через ВРМ, кг/с [15]

$$G_{теор} = \frac{4 \cdot V_h}{\varepsilon} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{\mathcal{G}_1} \quad (17)$$

где $\frac{4 \cdot V_h}{\varepsilon}$ – объем четырех парных полостей в момент отсечки впускного окна за 1 оборот ведущего ротора; n – число оборотов ведущего ротора; \mathcal{G}_1 – удельный объем газа во впускном окне.

3. Внутренняя мощность ВРМ без учета утечек пара, кВт

Расчет ведется для максимально зимнего режима, чтобы оценить максимальную мощность генератора

$$N_i = G_{теор} \cdot (h_n - h_k) \quad (18)$$

где h_n , h_k – энтальпия пара при входе и на выходе из ВРМ, кДж/кг.

Значение электрической мощности винтовой машины определяется за вычетом механических потерь элементов комплекса и электрических потерь в генераторе.

Механические потери складываются из потерь на трение роторов, синхронизирующих шестерен ВРМ и потерь на трение в электрогенераторе.

4. Мощность на валу ВРМ, кВт:

$$N_6 = N_i - \Delta N_{мех} \quad (19)$$

где $\Delta N_{мех}$ – механические потери ВРМ

5. Электрическая мощность ВРМ, кВт

$$N_{эл} = N_6 - \Delta N_{эз} \quad (20)$$

где $\Delta N_{эз}$ – механические потери в электрогенераторе

6. Адиабатический КПД ВРМ:

$$\eta_{ад} = \frac{h_n - h_k}{h_n - h_{2ад}} \quad (21)$$

где h_n , h_k – энтальпия пара при входе и на выходе из ВРМ, кДж/кг; $h_{2ад}$ – энтальпия пара при адиабатном процессе.

7. Внешний КПД двигателя:

$$\eta_0 = \eta_{ад} \cdot \eta_{мех} \quad (22)$$

где $\eta_{мех}$ – механический КПД ВРМ, принимаемый 0,95.

8. Абсолютный КПД комплекса, состоящего из котельной установки, ВРМ и электрогенератора

$$\eta_0 = \eta_{ку} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{ген} \quad (23)$$

где $\eta_{ку}$ – КПД котельной установки, $\eta_{ген}$ – КПД генератора

Расчет третьего этапа.

Как правило, ВРМ устанавливается параллельно существующим на предприятии РОУ, поэтому на третьем этапе возможно для сравнения рассчитать экономию условного топлива от использования ВРМ взамен существующих РОУ.

Необратимые потери в РОУ в процессе дросселировании пара вычисляются по формуле, кВт:

$$P_{РОУ} = D_n \cdot (h_n - h_{н'}) - T_{oc} \cdot (s_n - s_{н'}) \quad (24)$$

где h_n – энтальпия пара на входе в РОУ, кДж/кг; $h_{н'}$ – энтальпия пара на выходе из РОУ, кДж/кг; s_n – энтропия пара на входе в РОУ, кДж/К; $s_{н'}$ – энтропия пара на выходе из РОУ, кДж/К; D_n – расход пара через РОУ, кг/ч; T_{oc} – температура окружающей среды.

Потери условного топлива (часовые) в котельной в процессе дросселирования пара в РОУ определяются по формуле, кг.у.т.:

$$\Delta B_{РОУ} = \frac{P_{РОУ}}{Q_y \cdot \eta_{ку} \cdot \eta_{изол}} \quad (25)$$

где Q_y – теплота сгорания условного топлива (равная 29300 кДж/кг); $\eta_{ку}$ – КПД котельной установки; $\eta_{изол}$ – КПД изоляции паропроводов энергетического объекта.

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии составит, кг.у.т/кВт·ч:

$$B_{уд} = \frac{0,123}{\eta_{э}} \quad (26)$$

Результаты расчетов (Calculation results)

По изложенной методике были проведены расчеты энергетических параметров ВРМ на примере котельного цеха (КЦ-2) г. Нефтекамска.

КЦ-2 осуществляет центральное качественное регулирование отпуска тепловой энергии в городские тепловые сети. Количество отпускаемой тепловой энергии для нужд отопления зависит от изменения температуры теплоносителя в тепловой сети, которое, в свою очередь, зависит от изменения температуры наружного воздуха. При этом расход теплоносителя остается постоянным.

Предлагается рассмотреть вариант установки ВРМ после паровых котлов для получения пара необходимых параметров для подогрева воды в сетевых подогревателях для нужд отопления, вентиляции и ГВС. Схема установки ВРМ в тепловую схему котельной представлена в [16]. Выработанная в генераторе ВРМ электроэнергия будет направлена на частичное покрытие собственных нужд котельной.

Все исходные данные для расчета приведены в Таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Исходные данные для КЦ-2, г. Нефтекамск*
Initial data for boiler house No. 2, Neftekamsk

Параметр	Обозначение	Значение
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления	$t_{p.o}$	-38
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования вентиляции	$t_{p.v}$	-21
Температура внутри отапливаемого помещения	$t_{в.п}$	18
Максимальная температура прямой сетевой воды	t_{1max}	130

Максимальная температура обратной сетевой воды	$t_{2\max}$	70
Нагрузка на отопление, МВт	$Q_{o.\max}$	193,2
Нагрузка на вентиляцию, МВт	$Q_{в.\max}$	6,6
Нагрузка на ГВС, МВт	$Q_{гвс}$	13,8
<i>Параметры пара, вырабатываемого котлами</i>		
Температура, °С	t_1	194
Давление, МПа	p_1	1,3
Энтальпия, кДж/кг	h_1	2809,65
<i>Параметры пара после РОУ</i>		
Температура, °С	t_2	133
Давление, МПа	p_2	0,3
Энтальпия, кДж/кг	h_2	2724,9
Энтальпия конденсата после пароводяного подогревателя сырой воды, кДж/кг	h_k	389

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors.

По результатам расчетов был рассчитан температурный график тепловой сети, определена точка излома $t_{изл}$, равная $-3,5^{\circ}\text{C}$.

Также по вышеизложенной методике были проведены расчеты, на основе которых были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и выработки электрической энергии ВРМ от температуры наружного воздуха. Однако важно учесть, что до достижения точки излома, температура в подающем трубопроводе не снижается ниже 70°C . То есть в диапазоне температур от $+8^{\circ}\text{C}$ до $-3,5^{\circ}\text{C}$ температура в подающем трубопроводе будет 70°C . Следовательно, минимальный расход пара на сетевые подогреватели и минимальное значение мощности ВРМ соответствуют значению $t_{изл}$, и составляют соответственно 46,5 т/ч и 784 кВт.

Также, конкретно для случая с КЦ-2, необходимо учитывать еще одно ограничение: максимальная суммарная паропроизводительность паровых котлов составляет 80 т/ч. Без учета утечек, данный расход соответствует температуре наружного воздуха -10°C и определяет максимальную электрическую мощность ВРМ, равную 1234 кВт.

Таким образом, по результатам выполненных расчетов следует вывод о том, что ВРМ может работать в температурном диапазоне наружного воздуха от -10°C до $+8^{\circ}\text{C}$.

Полученные зависимости с учетом всех ограничений представлены на рис.2 и рис.3 соответственно.

Для рассмотренного случая потенциально возможно установить ПВМ-1500 производства фирмы «ВМ-Энергия» или ПВМ-1.5 производства «ВТ Технологии».



Рис. 2. Зависимость расхода пара на сетевые подогреватели от температуры наружного воздуха

Fig. 2. Dependence of steam consumption for network heaters on the outdoor air temperature

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

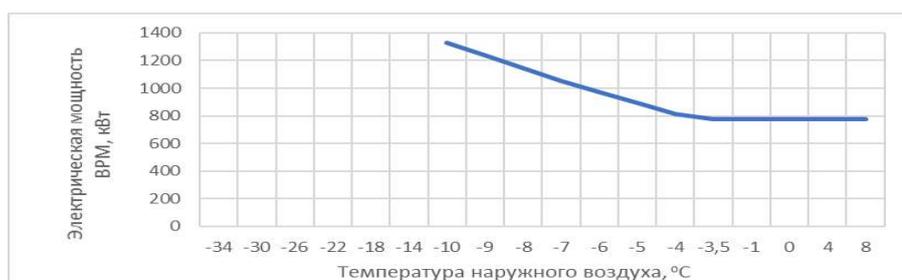


Рис. 3. Зависимость электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха.

Fig. 3. The dependence of the electric power of the SEM on the outdoor temperature.

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors.

По средней продолжительности периода с температурой воздуха различных градаций в СНиП 23-01-99 (2006) было определено число часов работы ВРМ в температурном диапазоне от +8°C до -10°C, равное 3621 час. Также для каждого температурного промежутка была определена электрическая мощность ВРМ. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Периоды работы ВРМ и ее энергетические характеристики*
Periods of SEM operation and its energy characteristics

Диапазон температур, °C	Продолжительность периода, ч	Расчетная электрической мощность ВРМ, кВт	Выработка электроэнергии за период стояния температур, тыс.кВт·ч
6÷7,9	351	784	275,1
4÷5,9	359	784	281,5
2÷3,9	394	784	308,8
0÷-1,9	614	784	481,4
-2÷-0,1	491	784	384,9
-4÷-2,1	421	784	330,1
-6÷-4,1	386	892	344,3
-8÷-6,1	307	1056	324,2
-10÷-8,1	298	1234	367,7
	3621		3098

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Таким образом, включение ВРМ в схему работы паровых котлов КЦ-2 г. Нефтекамска возможно в температурном диапазоне от +8°C до -10°C. При этом в данном диапазоне температур будет покрыты все нужды потребителей на отопление, вентиляцию и ГВС. Время работы ВРМ составит 3621 час. Выработка электроэнергии на собственные нужды котельной составит 3098 тыс.кВт·ч. Дальнейшее понижение температуры наружного воздуха приведет к необходимости переключения на водогрейные котлы или, как вариант, включению одного или нескольких водогрейных котлов для покрытия необходимой нагрузки системы отопления.

Согласно таблице 2 примерное время работы ВРМ в году – с начала октября до конца апреля, т.е. практически весь отопительный период. За этот период среднее потребление электроэнергии КЦ-2 на собственные нужды составит 9100 тыс.кВт·ч. Таким образом, внедрение ВРМ на этом объекте позволит покрывать 34% собственных нужд в электроэнергии в период с октября по апрель.

Также необходимо отметить, что при использовании РОУ за 3621 час было бы потеряно 5056 МВт тепловой энергии (согласно формулам 24-25), что соответствует 904 тоннам условного топлива. При использовании ВРМ потерянное тепло используется на производство электроэнергии.

Заключение (Conclusion)

В России имеется достаточно большой потенциал энергосбережения. На сегодняшний день в нашей стране основными производителями электрической и тепловой энергии являются крупные ТЭЦ, ТЭС и ГЭС с высокой единичной мощностью

энергоагрегатов. Однако при всей эффективности энергооборудования этих комплексов передача электроэнергии на дальние расстояния ведет к большим потерям как в энергетическом, так и в экономическом плане. В таких условиях важное значение приобретает малая распределенная энергетика. Особое внимание следует уделить действующим промышленно-отопительным котельным, которые можно достраивать до мини-ТЭЦ с применением схем когенерации. Для реализации когенерации предлагается использовать детандеры, в особенности винтовые, поскольку они показывают хорошие термодинамические характеристики при работе на влажном паре.

Из обзора литературы следует, что имеется положительный опыт применения ВРМ как в России, так и за рубежом. Большая часть исследований посвящена рассмотрению конструкций и термодинамических процессов, происходящих в детандере. Однако мало исследований направлено на практическое использование ВРМ.

Была разработана методика расчета энергетических показателей энергетического комплекса, состоящего из паровых котлов, ВРМ и тепловой сети. Данная методика позволяет рассчитывать выработку электрической энергии и расход пара на сетевые подогреватели промышленно-отопительной котельной в зависимости от температуры наружного воздуха и с учетом температурного графика тепловой сети. Если ВРМ устанавливается параллельно РОУ, рассчитывается экономия условного топлива.

По результатам расчета были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха. С учетом сопоставления полученных зависимостей и наложения ограничений по температурному графику тепловой сети, а также максимальной паропроизводительности котлов установлено: включение ВРМ после паровых котлов в КЦ-2 г. Нефтекамск для полного покрытия нагрузки на отопление, вентиляцию и ГВС возможно в температурном диапазоне наружного воздуха от $+8^{\circ}\text{C}$ до -10°C . Для дальнейшего полного покрытия нагрузки потребителей необходимо подключение водогрейных котлов. При этом выработанная электроэнергия позволит покрыть 34% собственных нужд котельной.

Литература

1. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г.
2. Ефимов Н.Н., Попель О.С., Балтян В.Н. Перспективы развития малой распределенной энергетики // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. №1 (182).
3. Илюшин П.В. Системный подход к развитию и внедрению распределённой энергетики и возобновляемых источников энергии в России // Open Journal Systems. 2022. №4. с.20-27.
4. Стенников В. А., Воропай Н. И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция. Раздел 4.2. Инновационная электроэнергетика – 21. М., 2015. URL: http://www.energystrategy.ru/projects/energy_21.htm
5. Калинин Н.В., Жигулина Е.В., Мартынов А.В. Эффективность расширительных машин в составе установок и систем// Надежность и безопасность энергетики. 2017. №4 (35). С.46-49.6.
6. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Нетрадиционные источники электроэнергии в составе систем гарантированного электроснабжения. Промышленная энергетика. 2014. №1. С. 88-95.
7. Миникаев А. Ф., Пронин В. А., Жигновская Д. В., Кузнецов Ю. Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 61–66.
8. Березин С.Р., Носков А.Н., Щеглов Г.А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 1. С. 50-56.
9. Smith, I.K.; Stošić, N.; Aldis, C.A. Development of the trilateral flash cycle system. Part 3: The design of high-efficiency two-phase screw expanders. J. Power Energy 2018, 210, 75–93.
10. Giuffrida, A. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles. Appl. Energy 2018, 193, 356–368.
11. Qi, Y.; Yu, Y.; Hooman, K. Thermodynamic Simulation on the Performance of Twin Screw Expander Applied in Geothermal Power Generation. Energies 2018, 9, 694.
12. Tang, H.; Wu, H.; Wang, X.; Xing, Z. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic rankine cycle power generator. Energy 2020, 90, 631–642.

13. Tian, Y.; Xing, Z.; He, Z.; Wu, H. Modeling and performance analysis of twin-screw steam expander under fluctuating operating conditions in steam pipeline pressure energy recovery applications. *Energy* 2019, 141, 692–701.

14. Guo, S.; Ying, Z.; Shi, B.; Zhu, Y.; Pan, L. Effect of inlet vent on screw expander efficiency. *Sci. Technol. Innov. Her.* 2017, 23, 1–4.

15. Березин С.Р. Винтовые детандеры: учебное пособие. Уфа, УГАТУ. 2010. 53 с.

16. Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В. Повышение эффективности котельной при использовании винтовых расширительных машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

Авторы публикации

Ротач Рита Рустемовна – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Валиев Радик Нурттинович – канд. технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035.
2. Efimov NN, Popel OS, Baltyan VN. Prospects for the development of small distributed energy. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Series: Engineering sciences.* 2015;41(182).
3. Ilyushin PV. A systematic approach to the development and implementation of distributed energy and renewable energy sources in Russia. *Open Journal Systems.*2022;4;20-27.
4. Stennikov VA, Voropay NI. Centralized and distributed generation is not an alternative, but integration. Section 4.2. *Innovative power industry – 21.* М., 2015. URL: http://www.energystrategy.ru/projects/energy_21.htm
5. Kalinin NV, Zhigulina EV., Martynov AV. Efficiency of expansion machines in plants and systems. *Reliability and security of energy.* 2017;4(35):46-49.
6. Grigorash OV, Bogatyrev NI, Kurzin NN. Non-traditional sources of electricity as part of uninterrupted power supply systems. *Industrial energy.* 2014;1:88-95.
7. Minikayev AF, Pronin VA, Zhignovskaya DV, et al. The use of computer modelling for the development of the working bodies' profiles for screw single-rotor compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2018;1:61–66.
8. Berezin SR, Noskov AN, Shcheglov GA. Determination of the parameters of the working process of a steam screw engine. *News of higher educational institutions. Engineering.* 2016;1:50-56.
9. Smith, IK, Stošić N, Aldis C.A. Development of the trilateral flash cycle system. Part 3: The design of high-efficiency two-phase screw expanders. *J. Power Energy* 2018, 210, 75–93.
10. Giuffrida, A. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles. *Appl. Energy* 2018;193:356–368.
11. Qi Y, Yu Y, Hooman K. Thermodynamic Simulation on the Performance of Twin Screw Expander Applied in Geothermal Power Generation. *Energies.* 2018, 9, 694.
12. Tang, H, Wu, H, Wang, X, Xing, Z. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic rankine cycle power generator. *Energy.* 2020;90:631–642.
13. Tian, Y, Xing Z, He Z, Wu H. Modeling and performance analysis of twin-screw steam expander under fluctuating operating conditions in steam pipeline pressure energy recovery applications. *Energy.* 2019;141:692–701.
14. Guo S, Ying, Z, Shi B, et al. *Effect of inlet vent on screw expander efficiency.* Sci. Technol. Innov. Her. 2017, 23, 1–4.
15. Berezin SR. Screw expanders: tutorial. Ufa, USATU, 2010. P.53.

16. Rotach RR, Vankov YuV. Increasing the efficiency of the boiler house using screw expansion machines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

Authors of the publication

Rita R. Rotach – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Radik N. Valiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **20.03.2023г.**

Отредактировано **27.03.2023г.**

Принято **09.06.2023г.**

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЛОКУЛЯНТОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ВОДОИСТОЧНИКА

Власова А.Ю.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Резюме: Актуальность данного исследования заключается в определении эффективности флокулянтов различных марок, используемых для подготовки воды хозяйственно-питьевого назначения, а также проведение сравнительного анализа основных характеристик. **ЦЕЛЬ.** Определение эффективности исследуемых флокулянтов в комбинации с коагулянтами: сернокислый алюминий и полиоксихлорид алюминия. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: проведение пробного коагулирования при различных температурных режимах, снятие спектральных зависимостей очищенной воды, а также определение перманганатной окисляемости и концентрации общего органического и неорганического углерода. **МЕТОДЫ.** Пробная коагуляция осуществлялась с помощью флокулятора модель 8800 компании «Экрос». Пробы осветленной воды были проанализированы с помощью: спектрофотометра Shimadzu UV-1800, анализатора общего органического и неорганического углерода Elementar «vario TOC sibe», а также титриметрическим способом определено значение перманганатной окисляемости. **Интерпретация** полученных результатов осуществлялась с помощью программного обеспечения UV Probe. В рамках исследования построены спектры проб воды и построены графические зависимости интенсивности поглощения в диапазоне длин волн 190-800 нм. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Учитывая особенность проведение эксперимента при различных температурах (3 °С и 12 °С) были подобраны оптимальные флокулянты, которые на стадии предварительной очистки (осветления) снижали большее количество органических соединений. Были рассмотрены флокулянты следующих торговых марок: Flopat AN (905 PWG, 934 PWG); Flotax fa (705,720,740); Praestol (2515 TR, 2530 TR, 2540 TR). **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Применение эффективных химических реагентов (коагулянтов и флокулянтов) может существенно улучшить показатели очистки воды. Химические реагенты подбираются не только по количественному и качественному составу воды в водоисточнике, но и по показателям температуры воды на протяжении всего года. Часто станции водоочистки используют «летний» и «зимний» коагулянт. При смене коагулянтов по сезонам необходимо предусмотреть и смену флокулянта, подобные мероприятия позволят эффективно очищать воду в паводковый и летний периоды (июль-август) и избежать негативных последствий в виде ухудшения органолептических и бактериологических характеристик очищенной воды.

Ключевые слова: флокулянт; коагулянт; вода хозяйственно-питьевого назначения; органические соединения; спектрофотометрический анализ.

Для цитирования: Власова А.Ю. Сравнительный анализ флокулянтов применяемых для очистки воды хозяйственно-питьевого назначения при различных температурных режимах водоисточника // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С.16-28.

COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOCCULANTS USED FOR WATER PURIFICATION FOR HOUSEHOLD AND DRINKING PURPOSES AT DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS OF THE WATER SOURCE

A.Y. Vlasova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Abstract: The relevance of this study is to determine the effectiveness of flocculants of various brands used for the preparation of water for household and drinking purposes, as well as to conduct a comparative analysis of the main characteristics. **PURPOSE.** Determination of the quality of the coolant at each stage of purification of the water treatment plant of the thermal power plant. The main emphasis was placed on determining the content of organic substances using the spectral mode. The determination of organic substances at each stage of purification will allow us to characterize the effectiveness of the chosen technology for the organization of the water treatment process. **METHODS** Determination of the effectiveness of the studied flocculants in combination with coagulants: aluminum sulfate and aluminum polyoxychloride. To achieve this goal, the following tasks were set: conducting trial coagulation at various temperature conditions, removing spectral dependencies of purified water, as well as determining permanganate oxidability and concentration of total organic and inorganic carbon. **RESULTS.** Taking into account the peculiarity of conducting the experiment at different temperatures (3 °C and 12 °C), optimal flocculants were selected, which at the stage of preliminary purification (clarification) reduced a greater number of organic compounds. Flocculants of the following brands were considered: Flopam AN (905 PWG, 934 PWG); Flotax fa (705,720,740); Praestol (2515 TR, 2530 TR, 2540 TR). **CONCLUSION.** The use of effective chemical reagents (coagulants and flocculants) can significantly improve the performance of water purification. Chemical reagents are selected not only according to the quantitative and qualitative composition of the water in the water source, but also according to the water temperature throughout the year. Often water treatment plants use "summer" and "winter" coagulant. When changing coagulants by seasons, it is necessary to provide for a change of flocculant, such measures will allow to effectively purify water during the flood and summer periods (July-August) and avoid negative consequences in the form of deterioration of the organoleptic and bacteriological characteristics of purified water.

Keywords: flocculant; coagulant; drinking water; organic compounds; spectrophotometric analysis.

For citation: Vlasova AY. Comparative analysis of flocculants used for water purification for household and drinking purposes at different temperature conditions of the water source. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):16-28.

Введение

Качество подготовки питьевой воды - важный аспект жизни всего человечества. Степень очистки воды влияет не только здоровье человека, но и на надежность системы водоснабжения территории. Для большинства городов и населенных пунктов в качестве водоисточника выступают поверхностные водоемы. Характерными признаками этих источников являются: условно низкая минерализация; большое количество взвешенных частиц; высокие значения по бактериологическим показателям, значительная мутность и цветность; колебания количественного и качественного состава воды от времени года. Очистка воды поверхностных водоисточников всегда сопровождается обработкой химическими реагентами таких как коагулянт и флокулянт.

Процесс коагулирования необходим для снижения таких показателей как мутность, цветность, содержания органических и неорганических соединений. Известно, что значительная часть микроорганизмов удаляется при реагентной обработке воды при очистке от взвешенных и растворенных веществ на стадии осветления. [1,2] На этапе отстаивания содержание вирусов снижается на 50-60%. [3,4] Поэтому при организации коагуляции важно правильно организовать процесс, подобрать тип коагулянта и дозу. При неправильно подобранной реагентной обработке снижается эффективность очистки. Процесс коагуляции может быть очень длительным, поэтому используют интенсификаторы процесса – флокулянты. Сочетание коагуляции и флокуляции позволяет ускорить процесс предварительной очистки и значительно снизить содержание микроорганизмов, в том числе и вирусов. Микроорганизмы и вирусы адсорбируются на взвешенных частицах, поэтому такой показатель как мутность может быть косвенным фактором снижения бактериологического загрязнения воды.

Применение метода осветления воды, с помощью эффективных химических реагентов особенно важно в паводковый период, в летние месяцы цветения сине-зеленых водорослей, а также в момент кратковременных выбросов техногенного характера. Поэтому очень важно корректно подбирать тип и дозу химических реагентов, чтобы предотвратить негативные последствия в виде биологических пленок на поверхности оборудования, а также несоответствие воды по органолептическим

характеристикам. Поэтому тема исследования актуальна.

Новизна исследования заключается в проведении сравнительной характеристики эффективности флокулянтов различных торговых марок. Также флокулянты проверялись в сочетании с «сезонными» коагулянтами: полиоксихлорид алюминия и сернокислый алюминий в соответствии с температурным режимом вод источника.

Литературный обзор

Химические реагенты, применяемые для очистки воды хозяйственно-питьевого назначения, по своему составу образуют две большие группы: органические и неорганические. На станциях водоочистки широкое применение получили коагулянты неорганического типа, к ним относят соли алюминия и железа. Чаще всего используют соли на основе алюминия: сернокислый алюминий и полиоксихлорид алюминия (ПОХА). При выборе коагулянта оцениваются его рабочие характеристики.

Сернокислый алюминий чувствителен к колебаниям pH, резко снижается эффективность коагуляции при снижении температуры воды в вод источнике, в паводковый период необходимо увеличение дозы реагента, поэтому, как следствие, высокое содержание остаточного алюминия в подготовленной осветленной воде.

ПОХА применяется в широком диапазоне pH, возможно применение при низких температурах, требуется меньше доза по сравнению с другими коагулянтами и как следствие меньше остаточного алюминия в подготовленной воде, высокая цена.

Чаще всего подготовка воды организована по сезонам, используются различные коагулянты, в зимний период используют ПОХА, в летний сернокислый алюминий. Использование сернокислого алюминия в зимний период и паводок неудовлетворительно влияет на степень очистки воды, процессы хлопьеобразования и осаждения замедляются, так как образующиеся хлопья очень мелкие. Это объясняется изменением вязкости воды. Согласно литературным данным [5], вязкость воды при 1 °С примерно в 2 раза больше, чем при 30 °С. Во столько же раз замедляется и скорость осаждения взвешенных в ней частиц, так как по закону Стокса эти величины обратно пропорциональны друг другу. [6]

В паводковый период, в летние месяцы (июль-август), а также эпизодически (кратковременно) в течение года происходит резкое ухудшение качества природной воды. Причинами ухудшения качества воды и повышения содержания органических веществ является попадание в воду почвенного гумуса, продуктов жизнедеятельности и разложения растительных и животных организмов, а также техногенные факторы в виде сточных вод промышленных предприятий. Некорректный режим химической обработки в данные периоды приводит к появлению привкуса, запаха в обработанной воде.

Так как коагуляция дополняется процессом флокуляции, то очень важно корректно подбирать тип флокулянта и его дозу.

Тульская Е.А., научный сотрудник лаборатории комплексного эколого-гигиенического нормирования, ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина РАМН, в своих работах писала, что флокулянты условно делят на три группы:

- активная кремниевая кислота;
- синтетические органические полимеры (полиакриламид, полиоксиэтилен, полиакрилат, полиэтиленмин);
- флокулянты на основе природных веществ (крахмал, эфиры целлюлозы, гуаровые смолы, хитозан).

Синтетические высокомолекулярные флокулянты получили гораздо более широкое распространение, чем флокулянты природного происхождения, поскольку они более эффективны, селективны, обходятся дешевле, лучше хранятся. Существует огромная разновидность флокулянтов по функциональным группам, которые определяют специфику их использования. [7]

По мнению авторов Бойковой Т.Е., Багдановича Н.И., Мауричева Т.С наибольшее распространение в России и за рубежом получили сополимеры акриламида с различными зарядами (катионный, анионный, неионогенный) и плотностью заряда, а также молекулярной массой. Это флокулянты марки Praestol Российского производства, и флокулянты *Magnafloc* швейцарской фирмы *Ciba Specialty Chemicals*, *Flopat* компании «SNF FLOERGER», Франция, *Besfloc* - продукция южнокорейской компании «Kolon Life Science, Inc». [8]

На зарубежных станциях очистки широко используются реагенты на основе природных соединений. В качестве этих соединений выступает: растворимый крахмал и производные крахмала при гидролизе (обработка 2,5%-й щелочью); карбоксиметилцеллюлоза - щелочная целлюлоза, обработанная монохлоруксусной кислотой; полиальгинат натрия, который производится из морских водорослей после их щелочной обработки; гуар - полисахарид растительного происхождения. [9-12] Использование флокулянтов органического происхождения имеет неоднозначные

результаты, эффективность использования формируется на основании конкретного водоисточника и его показателей.

По анализу литературных источников можно сделать вывод, что на сегодняшний день существует большое количество различных флокулянтов. Но слишком мало информации о их эффективности в рамках определенного водоисточника. Также мало информации о эффективности использования флокулянтов при различных температурах водоисточника. Поэтому данная работа позволит расширить знания по эффективности флокулянтов, применяемых для очистки воды хозяйственно-питьевого назначения при различных температурных режимах водоисточника. В рамках данной работы поставлена цель: определение эффективности исследуемых флокулянтов в комбинировании с коагулянтами: сернокислый алюминий и полиоксихлорид алюминия. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи: проведение пробного коагулирования при различных температурных режимах, снятие спектральных зависимостей очищенной воды, а также определение перманганатной окисляемости и концентрации общего органического и неорганического углерода.

Материалы и методы

Для оценки эффективности применения флокулянтов различных видов использовалась методика пробного коагулирования. В таблице 1 приведены исследуемые флокулянты и их краткие характеристики.

Таблица 1
Table 1

Характеристика исследуемых флокулянтов
Characteristic of the studied flocculants

Флокулянт	Тип флокулянта	Молекулярная масса	Характеристики
Floпам AN 905 PWG	Анионный	Очень высокая	Анионный полиакриламидный флокулянт, представляющий собой белый порошок, является флокулянтом, подходящим для обработки питьевой воды, т.к. он соответствует требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества», ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно-допустимые концентрации «ПДК» химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
Floпам AN 934 PWG			
Flotax fa 705	Анионный	Высокая	При обработке мутной воды флокулянт должен быть добавлен в воду в точке средней турбулентности для достижения однородной смеси без уменьшения образования флокул. Полимер должен добавляться в нескольких различных точках для достижения наилучшего результатов.
Flotax fa 720			
Flotax fa 740			
Praestol 2515 TR	Анионный	Очень высокая	Анионный флокулянт, представляющий собой белый гранулированный порошок. Марка TR означает флокулянт с пониженным содержанием остаточного мономера (акриламида). находит применение для обработки питьевой воды. Соответствует СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества», ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно-допустимые концентрации «ПДК» химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
Praestol 2530 TR			
Praestol 2540 TR			

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Лабораторный эксперимент заключался в проведении пробной коагуляции с

помощью прибора флокулятора модель 8800 производитель компания «Экрос». (рисунок 1)



Рис 1. Флокулятор модель 8800 компании «Экрос»

Fig 1. Flocculator model 8800 by «Ecross» company

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Объем воды взятый для эксперимента составлял 0,5 л. В качестве исходной воды использовалась природная вода Куйбышевского водохранилища. Отбор проб производился согласно ГОСТ Р 56237-2014 «Вода питьевая. Отбор проб на станциях водоподготовки и в трубопроводных распределительных системах», точка отбора - вход на Казанскую ТЭЦ-1. Перед экспериментом у исходной воды были определены следующие показатели: УФ-спектры при длинах волн от 190 до 800 нм; перманганатная окисляемость, общий органический и неорганический углерод. Определение данных показателей присутствует на каждой стадии эксперимента.

Во время эксперимента устанавливалась скорость перемешивания на флотаторе 9,5 м/ч или 0,05 об/мин, что соответствует реальной скорости течения воды на станции очистки в отстойниках. Коагулянт дозировался с помощью микродозатора. Так как коагуляция проводилась при двух различных температурных режимах (3 °С и 12 °С), то для каждого режима был использован свой тип коагулянта. Очень важно было соблюдать температурный режим воды на протяжении всего эксперимента для достижения условий максимально приближенных к реальным. Для воды с температурой 3 °С использовался ПОХА с дозировкой 50 мг/л. (с массовой долей Al_2O_3 17,5% в товарном продукте), для температуры 12 °С использовался сернокислый алюминий с дозировкой 200 мг/л (с массовой долей Al_2O_3 7,3 %). При использовании сернокислого алюминия необходимо строго выдерживать уровень рН в диапазоне 8-10 ед, поэтому вода подщелачивалась до нужного уровня.

После дозирования необходимой дозы коагулянта через 4 или 8 минут дозировался флокулянт. Чем ниже температура воды, тем длительнее должен быть разрыв по времени между вводами коагулянта и флокулянта, поэтому при температуре воды 12 °С флокулянт дозировался после 4 мин. ввода коагулянта, а при температуре воды 3 °С – после 8 мин. Доза флокулянта составляла 0,1 мг/л. Общее время проведения эксперимента составляло 90 минут. В каждом эксперименте проводилось две параллельных опыта.

Для оценки эффективности процесса коагулирования и флокулирования анализ проб производили по перечню определяемых показателей, указанных выше.

Для определения данных показателей было использовано следующее оборудование: Elementar «vario TOC cube», Shimadzu «UV-1800». Elementar «vario TOC cube» способен производить анализ содержания ТИС, ТС, ТОС методом высокотемпературного окисления в присутствии платинового катализатора. Анализ производится по показаниям ИК-датчика для улавливания концентрации CO_2 . Предел допускаемых значений среднего квадратичного отклонения случайной составляющей погрешности измерений составляет 2%. Образовавшийся диоксид углерода охлаждается, осушается и определяется с помощью NDIR детектора по следующему принципу:

1) Концентрацию ТС (общего углерода) в образце можно рассчитать, пользуясь калибровочной кривой.

2) При условии окисления образца (при помощи окислителя H_2PO_4) с последующей продувкой и определением образовавшегося CO_2 как IC (неорганический углерод)

3) Концентрация ТОС определяется путем вычитания концентрации IC из полученной концентрации ТС. [13-15]

С помощью метода каталитического окисления при $850\text{ }^\circ\text{C}$ достигается полное сгорание образца в каталитической трубке, наполненной платиновым катализатором. Диоксид углерода, образующийся при окислении пробы, определяется с помощью бездисперсионного ИК-детектора.

Прибор Shimadzu «UV-1800» основывается на электронной спектрофотометрии. С помощью прибора можно определить структуру молекул в исследуемом образце и установить связь ее с типом первичной (химической) структуры, стехиометрические особенности сопряженных систем. Метод электронной ультрафиолетовой спектрофотометрии широко используется для определения концентрации, получения количественных характеристик кислотно-основных, таутомерных равновесий, кинетического контроля реакций обнаружения и характеристики интермедиатов в темновых и фотохимических процессах и других.

Определение перманганатной окисляемости проводилось согласно методике ГОСТ 55684-2013 титриметрическим способом.

Экспериментальные исследования

Определение эффективности флокулянтов различных марок совместно с коагулянтом сернокислый алюминий.

Температура исследуемой воды составляла $12\text{ }^\circ\text{C}$. Первая серия экспериментов была направлена на определение эффективности сернокислого алюминия и флокулянтов марки Flotax серия fa номера 705,720,740. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Table 2

Экспериментальные результаты эффективности флокулянтов марки Flotax
Experimental efficiency results of flocculants of Flotax brand

Флокулянт	ТКС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16
Flotax fa 705	9,99	5,44	4,55	6,85
Flotax fa 720	9,75	5,55	4,2	6,80
Flotax fa 740	7,97	5,07	2,9	5,50

*составлено автором

Для точности и расширения полученных данных были проведены дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра и сняты спектры в диапазоне длин волн 190-800 нм. На рисунке 2 приведены графические зависимости.

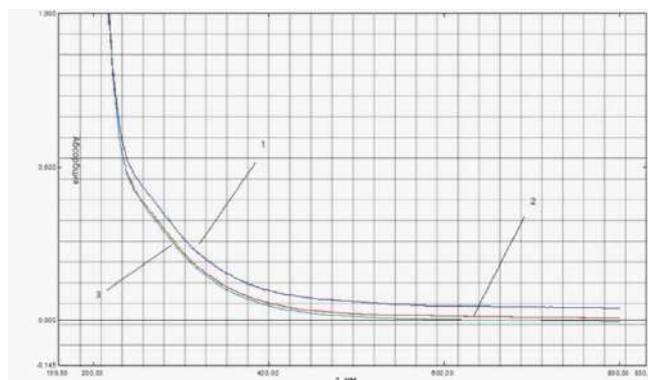


Рис. 2 УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования с Flotax fa 705 и 720, 3- вода после коагулирования и флокулирования с Flotax fa

Fig. 2 UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation with Flotax fa 705 and 720, 3-water after coagulation and flocculation with Flotax fa 740.

740.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Из спектров определили содержание органических веществ (D254), цветность (D400), мутность (D550). По полученным результатам видно, что эффективность флокулянтов Flotax fa 705 и 720 примерно одинаковая по графическим зависимостям видно, что произошло наложение графиков друг на друга. Для флокулянта Flotax fa 740 зафиксировано снижение содержания органических веществ по длине поглощения D254, а также по цветности D400 и мутности D550. Среди флокулянтов марки flotax при температуре воды 12 °С (паводковый период) наилучшие результаты продемонстрировал флокулянт fa 740, это заметно значению перманганатной окисляемости, общего органическому и неорганическому углерода, а также по спектральным зависимостям.

Вторая серия экспериментов была направлена на определение эффективности сернокислого алюминия и флокулянтов марки Flopam серия AN номера 905 PWG, 934 PWG. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3
Table 3

Экспериментальные результаты эффективности флокулянтов марки Flopam
Experimental Flopam flocculant efficiency results

Флокулянт	ТЭС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16
Flopam AN 905 PWG	9,5	5,6	3,9	6,5
Flopam AN 934 PWG	10,2	5,6	4,6	6,9

*составлено автором

Дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра представлены на рисунке 3 в виде УФ-спектров.

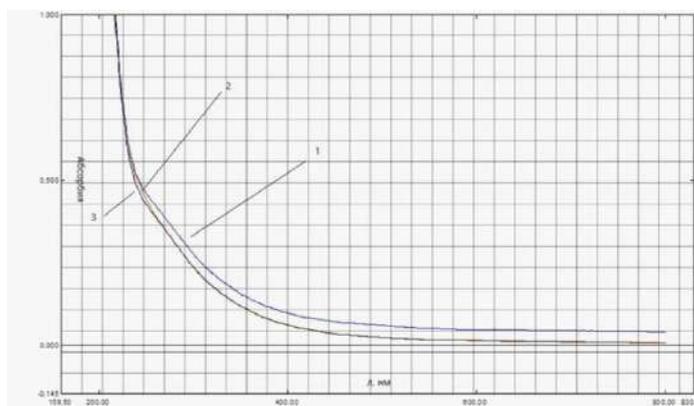


Рис. 3 УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования с Flopam AN 905 PWG и Flopam AN 934 PWG.

Fig. 3 UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation with Flopam AN 905 PWG and Flopam AN 934 PWG.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По полученным данным видно, что флокулянты в данных условиях работают почти одинаково, так как спектры идентичны и перекрывают друг друга. Есть небольшое отличие в области D 250-270 (содержание органических веществ), флокулянт Flopam AN 934 PWG снижает концентрацию органических веществ чуть хуже. Считаем, что среди флокулянтов марки Flopam при температуре воды 12 °С наилучшие результаты продемонстрировал флокулянт AN 905 PWG.

Третья серия экспериментов была направлена на определение эффективности сернокислого алюминия и флокулянтов марки Praestol серия TR номера 2515, 2530, 2540. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 4 и на рисунке 4.

Таблица 4
Table 4

Экспериментальные результаты эффективности флокулянтов марки Praestol
Experimental results of Praestol flocculant efficiency

Флокулянт	ТЭС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16
Praestol 2515 TR	9,2	5,6	3,6	6,3
Praestol 2530 TR	9,35	5,65	3,7	6,45
Praestol 2540 TR	9,4	5,7	3,7	6,45

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра представлены на рисунке 4 в виде УФ-спектров.

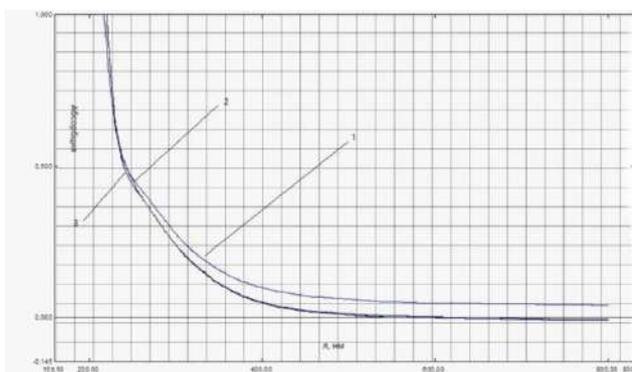


Рис. 4 УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования Praestol 2530, 2540 TR, 3-Praestol 2515 TR
Fig. 4 UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation Praestol 2530, 2540 TR, 3-Praestol 2515 TR

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По полученным данным видно, что существенной разницы между флокулянтами нет, так как происходит наложение спектров. Но при детальной проработке видно, что флокулянт Praestol 2515 TR снижает концентрацию органических веществ (D254) чуть лучше. Считаем, что среди флокулянтов марки Praestol при температуре воды 12 °C наилучшие результаты продемонстрировал флокулянт 2515 TR.

На основании полученных результатов были построены в одной плоскости графические спектральные зависимости флокулянтов различных марок, показавшие наилучший результат. (рисунок 5)

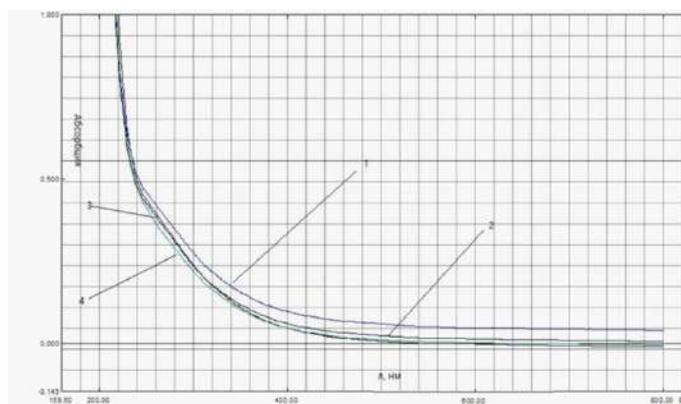


Рис. 5. УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования Flopam AN 905 PWG
Fig. 5. UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation Flopam AN 905 PWG,

AN 905 PWG, 3-Praestol 2515 TR, 4-Flotax fa 3-Praestol 2515 TR, 4-Flotax fa 740.
740.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Определение эффективности флокулянтов различных марок совместно с коагулянтом ПОХА

Температура исследуемой воды составляла 3 °С. Первая серия экспериментов была направлена на определение эффективности ПОХА и флокулянтов марки Flotax серия fa номера 705,720,740. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 6 и на рисунке 6.

Таблица 6
Table 6

Экспериментальные результаты эффективности флокулянтов марки Flotax
Experimental efficiency results of flocculants of Flotax brand

Флокулянт	ТЭС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16
Flotax fa 705	9,1	6,5	2,6	5,0
Flotax fa 720	11,0	6,6	4,4	6,6
Flotax fa 740	10,5	6,6	3,9	6,5

*составлено автором

Дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра представлены на рисунке 6 в виде УФ-спектров.

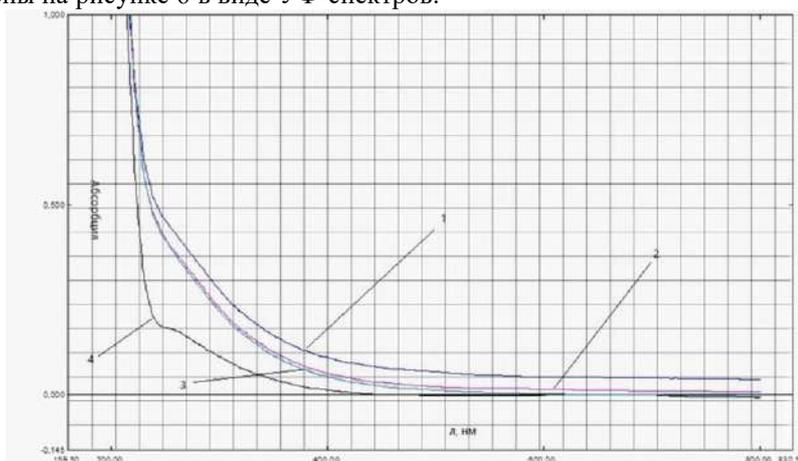


Рис. 6 УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования с Flotax fa 720, 3- вода после коагулирования и флокулирования с Flotax fa 740, 4- вода после коагулирования и флокулирования с Flotax fa 705

Fig. 6 UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation with Flotax fa 720, 3-water after coagulation and flocculation with Flotax fa 740, 4-water after coagulation and flocculation with Tax Flofa 705

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По полученным результатам видно, что наибольшей эффективностью среди флокулянтов марки Flotax серии fa обладает номер 705. Заметно фиксируется снижение содержания органических веществ по поглощению D254, по цветности D400 и мутности D550 спектральный анализ при поглощении становится ниже. Среди флокулянтов марки flotax при температуре воды 3 °С наилучшие результаты продемонстрировал флокулянт fa 705, как по перманганатной окисляемости, так и по содержанию общего органического и неорганического углерода, а также по спектральным зависимостям.

Вторая серия экспериментов была направлена на определение эффективности ПОХА и флокулянтов марки Floram серия AN номера 905 PWG, 934 PWG. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 7 и на рисунке 7.

Таблица 7
Table 7

Экспериментальные результаты по определению эффективности флокулянтов марки Flopam

Experimental results in determining the efficiency of flocculants brand Flopam

Флокулянт	ТЭС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16
Flopam AN 905 PWG	8,0	5,6	2,4	4,9
Flopam AN 934 PWG	7,3	5,5	1,8	4,5

*составлено автором

Дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра представлены на рисунке 7 в виде УФ-спектров.

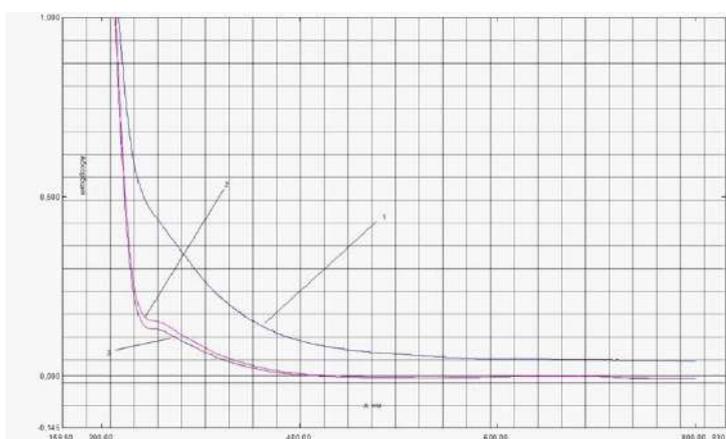


Рис. 7. УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования с Flopam AN 905 PWG, 3- вода после коагулирования и флокулирования с Flopam AN 934 PWG.

Fig. 7. UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation with Flopam AN 905 PWG, 3-water after coagulation and flocculation with Flopam AN 934 PWG.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По полученным результатам видно, что наибольшей эффективностью среди флокулянтов марки Flopam обладает AN 934 PWG. Заметно фиксируется снижение содержания органических веществ по поглощению D254, по цветности D400 и мутности D550 спектральный анализ при поглощении становится ниже. Среди флокулянтов марки Flopam при температуре воды 3 °С наилучшие результаты продемонстрировал флокулянт AN 934 PWG.

Третья серия экспериментов была направлена на определение эффективности ПОХА и флокулянтов марки Praestol серия TR номера 2515, 2530, 2540. После проведения коагуляции верхняя порция о воды очищенной была отобрана и проанализирована. Результаты эксперимента представлены в таблице 8 и на рисунке 8.

Таблица 8
Table 8

Экспериментальные результаты по определению эффективности флокулянтов марки Praestol

Experimental results in determining the efficiency of flocculants of the brand Praestol

Флокулянт	ТЭС, мг/л	ТС, мг/л	ТОС, мг/л	Пер. окисляемость, мг/л
Исходная вода р.Ока	10,7	5,4	5,3	7,16

Praestol 2515 TR	9,5	5,6	3,9	6,5
Praestol 2530 TR	9,0	5,65	3,35	6,2
Praestol 2540 TR	8,4	5,7	2,7	5,2

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Дополнительные исследования с применением УФ-спектрофотометра представлены на рисунке 8 в виде УФ-спектров.

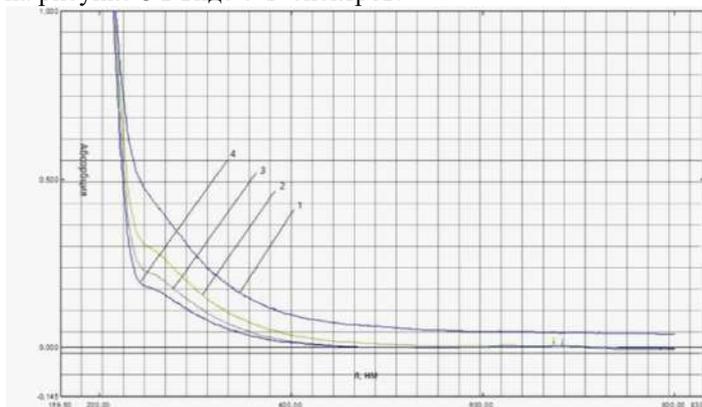


Рис. 8. УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования Praestol 2515 TR, 3- вода после коагулирования и флокулирования Praestol 2530 TR, 4- вода после коагулирования и флокулирования Praestol 2540 TR.

Fig 8. UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation Praestol 2515 TR, 3-water after coagulation and flocculation Praestol 2530 TR, 4-water after coagulation and flocculation Praestol 2540 TR.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По полученным результатам видно, что существенно лучше сработал Praestol 2540 TR. Значительно снизилось содержание органических веществ, а также показатели цветности и мутности ушли вплоть до исчезновения. Считаем, что при данных условиях наибольшей эффективность обладает Praestol 2540 TR.

На основании полученных результатов были построены в одной плоскости графические спектральные зависимости флокулянтов различных марок, показавшие наилучший результат. (рисунок 9)

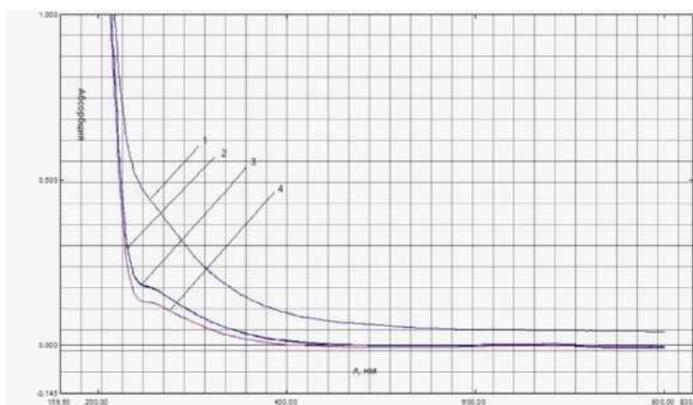


Рис. 9. УФ-спектры: 1-исходная вода, 2-вода после коагулирования и флокулирования Praestol 2540 TR и Flotax fa 705, 3- вода после коагулирования и флокулирования Flopam 934 PWG.

Fig. 9. UV spectra: 1-source water, 2-water after coagulation and flocculation Praestol 2540 TR and Flotax fa 705, 3-water after coagulation and flocculation Flopam 934 PWG.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Выводы

В данной работе представлен анализ эффективности флокулянтов различных торговых марок. Эффективность определялась с помощью пробной коагуляции, максимально приближенной к реальным условиям с последующим анализом на ряд показателей. Флокулянт комбинировался с коагулянтom в зависимости от температуры воды в водоисточнике. При температуре воды 12 °С использовался сернокислый

алюминий, при температуре воды 3 °С - коагулянт ПОХА.

В ходе эксперимента было выявлено, что при температуре 12 °С и коагулянтном сернокислый алюминий наилучшие результаты показал флокулянт Flotax fa 740. По полученным результатам видно, что для показателей: перманганатная окисляемость, общий органический углерод - фиксируется снижение. При анализе поглощения D400 – мутность, показатель снижается, уходит вплоть до исчезновения.

При температуре 3 °С и коагулянтном ПОХА наилучшие результаты были достигнуты при использовании флокулянта Floram, а именно 934 PWG. В рамках данного исследования флокулянты данной марки (905 PGW, 934 PGW) сработали лучше остальных. При проверке флокулянта 934 PGW фиксируется значительное снижение по цветности (D600), мутности (D400) и снижению концентрации органических веществ (D254).

Литература

1. Гончарук, В. В. Современное состояние проблемы обеззараживания воды / В.В. Гончарук, Н.Г. Потапенко - Химия и технология воды. Т. 20. №2. 1998.
2. Харабрин А. В. Экологический мониторинг качества воды и оценка барьерной роли сооружений водоподготовки: Дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2004.
3. Русанова, Н. А. Подготовка воды с учетом микробиологических и паразитологических показателей - Водоснабжение и санитарная техника. 1998. №3, 70
4. Русанова, Н. А. Удаление вирусной микрофлоры при водоподготовке / Н.А. Русанова, Г. Г. Непаридзе, Г. Е. Недачин // Водоснабжение и санитарная техника. 1993, №2.
5. Драгинский В.А. Коагуляция в технологии очистки природных и сточных вод / В.А. Драгинский, Л.П. Алексеева, С.В. Гетманцев.– М.: Науч. изд., 2005. – 576 с.
6. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Сафронов М.А., Титов Е.А. Реагентная обработка поверхностных природных вод алюмосодержащими коагулянтами: моногр. / Б.М. Гришин – Пенза: ПГУАС, 2016. – 140 с.
7. Тульская Е.А., Гигиенические аспекты применения высокомолекулярных флокулянтов для очистки питьевой воды, РЭТ-ИНФО, №1, 2005, С. 28-31.
8. Бойковой Т.Е., Багдановича Н.И., Мауричева Т.С., Применение флокулянтов в процессе водоподготовки, «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение» №1 (57) 2019, С. 91-101.
9. Bratskaya S.YU., Chervoneckij D.V., Perfil'ev A.V., YUdakov A.A., Avramenko V.A. Primenenie hitozana i ego proizvodnyh v pit'evom vodosnabzhenii i pererabotke stochnyh vod razlichnogo sostava // Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnyh bioresursov. Moskva, 2010, №2, s.58-63
10. H. Aylin Devrimci, A. Mete Yuksel, F. Dilek Sanin, Algal alginate: A potential coagulant for drinking water treatment. Desalination. 2012 p.16-21.
11. Prasanna Natesh, Sricharan, Iyankumar, Vishnu Prasanna. A novel method of algal based water treatment by natural coagulant "alginates". International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 6 Issue 9, September 2017, p.769-775
12. Use of calcium alginate as a coagulant during water treatment, ÇORUH, Hale Aylin M.Sc., Environmental Engineering Department Supervisor: Assoc. Prof. Dr. F. Dilek Sanin, September 2005, 185 p.
13. TOC/TNb Analyzer vario TOC cube, Operating instructions (C) ELEMENTAR Analysensysteme GmbH, 2009.
14. Мингазов Р.Р., Власова А.Ю. Программное моделирование модульной единицы установки обратного осмоса, Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы VII Национальной научно-практической конференции. Казань, 2022. С. 317-319.
15. Vlasova A.Y., Akhmetzyanova A.T., Babikov O.E, Analysis of the step-by-step water purification of a combined water treatment plant at a heat and power complex, 4th international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering, reepe 2022.

Автор публикации

Власова Алена Юрьевна – канд. тех. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Goncharuk VV. The current state of the problem of water disinfection / V.V. Goncharuk, Potapenko NG. *Chemistry and technology of water*. 1998;20(2).
2. Kharabrin AV. *Environmental monitoring of water quality and assessment of the barrier role of water treatment facilities*: Dis. Candidate of Technical Sciences. –Ufa, 2004.
3. Rusanova N.A. Water preparation taking into account microbiological and parasitological indicators. *Water supply and sanitary equipment*. 1998;3:70
4. Rusanova NA, Neparidze GG., Nedachin GE. Removal of viral microflora during water treatment. *Water supply and sanitary equipment*. 1993. No.2.
5. Draginsky VA, Alekseeva LP, Getmantsev SV. *Coagulation in the technology of natural and wastewater treatment*. M.: Scientific publishing house, 2005. 576 p.
6. Grishin BM, Bikunova MV, Safronov MA, et al. *Reagent treatment of surface natural waters with aluminum-containing coagulants*: monogr. Penza: PGUAS, 2016. – 140 p.
7. Tulskeya EA. *Hygienic aspects of the use of high-molecular flocculants for drinking water purification*, RET-INFO, No. 1, 2005, pp. 28-31.
8. Boykova TE, Bagdanovich NI, Mauricheva TS. The use of flocculants in the process of water treatment. *Modern high-tech technologies. Regional Appendix*. 2019;1 (57):91-101.
9. Bratskaya SYU, CHervoneckij DV, Perfil'ev A.V, et al. *Primenenie hitozana i ego proizvodnyh v pit'evom vodosnabzhenii i pererabotke stochnyh vod razlichnogo sostava. Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnyh bioresursov*. Moskva, 2010;2:58-63
10. H. Aylin Devrimci, A. Mete Yuksel, F. Dilek Sanin, Algal alginate: A potential coagulant for drinking water treatment. *Desalination*. 2012 p.16-21.
11. Prasanna Natesh, Sricharan, Iyankumar, Vishnu Prasanna. A novel method of algal based water treatment by natural coagulant alginates. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2017; 6(9): 769-775. September 2017.
12. Use of calcium alginate as a coagulant during water treatment, ÇORUH, Hale Aylin M.Sc., Environmental Engineering Department Supervisor: Assoc. Prof. Dr. F. Dilek Sanin, September 2005, 185 p.
13. TOC/TN_b Analyzer vario TOC cube, Operating instructions (C) ELEMENTAR Analysensysteme GmbH, 2009.
14. Mingazov RR, Vlasova AYu. *Software modeling of a modular unit of reverse osmosis installation, instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services*. Materials of the VII National Scientific and Practical Conference. Kazan, 2022. pp. 317-319.
15. Vlasova AY, Akhmetzyanova AT, Babikov OE. *Analysis of the step-by-step water purification of a combined water treatment plant at a heat and power complex*. Th international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering, REEPE 2022.

Author of the publication

Alyona Yu. Vlasova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Nuclear and Thermal Power Plants» (APEC) of Kazan State Energy University (KGEU).

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **20.03.2023г.**

Отредактировано **27.03.2023г.**

Принято **09.06.2023г.**

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ОТ ВНЕШНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Снегирев Д.А., Паздерин А.В., Самойленко В.О., Ерохин П.М.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Прогнозирование мощности и выработки ветроэлектростанций для обеспечения эффективной работы ВЭС на рынках электроэнергии и мощности. Повышение точности прогнозирования мощности ВЭС также повышает и надежность электроснабжения энергорайонов с высокой установленной мощностью ВЭС за счет более эффективного планирования режимов работы этих энергорайонов. *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является разработка различных методик аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции (ВЭС) от внешних метеорологических факторов и определение наиболее эффективной методики, которая будет обеспечивать низкую погрешность аппроксимации зависимости при сохранении невысокой вычислительной сложности, с учетом ограниченности объема ретроспективных данных и ограниченного количества независимых величин (признаков). *МЕТОДЫ.* Для проведения вычислительных экспериментов по аппроксимации зависимости использовался программный комплекс MATLAB. В рамках вычислительных экспериментов было рассмотрено шесть методик получения аппроксимирующих зависимостей. Суть каждого эксперимента сводилась к получению одной или нескольких аппроксимирующих зависимостей по обучающим данным, расчету прогнозов по тестовым данным, сравнению прогнозов с фактическими значениями и оценке показателей погрешности прогнозов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Наиболее эффективной методикой оказалась аппроксимация зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по 16 направлениям ветра с применением метода бинов. Полученная методика аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции может быть использована для краткосрочного и оперативного прогнозирования мощности ВЭС. *ВЫВОДЫ.* В данной статье предложен ряд методик аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов, а также выполнено сравнение этих методик. По результатам сравнения рассмотренных методик аппроксимации оценки точности прогнозов была выявлена наиболее эффективная методика.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция; прогнозирование выработки электроэнергии; характеристика мощности ветроэлектростанции; возобновляемые источники энергии.

Для цитирования: Снегирев Д.А., Паздерин А.В., Самойленко В.О., Ерохин П.М. Разработка методики аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции от внешних метеорологических факторов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С.29-44.

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED WIND FARM POWER CURVE APPROXIMATION APPROACH

DA. Snegirev, AV. Pazderin, VO. Samoylenko, PM. Erokhin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract: *RELEVANCE.* Wind power forecasting ensures efficient operation of wind power plants in the electricity markets. Improving the wind power plants output power forecasting accuracy provides more efficient operation planning of the power regions with high installed capacity wind power capacity operation. As a result, the reliability of power supply to these energy regions is increased. *PURPOSE.* The purpose of this study is to develop an improved power curve approximation technique for fitting the function of the wind power plant output power depending

on meteorological factors. The proposed technique should provide a sufficiently low error while maintaining a small computational complexity in the context of a limited amount of retrospective data and the number of independent values (features). **METHODS.** The MATLAB software package was used to carry out simulation series. Six techniques for obtaining approximation functions were considered during these simulations. Each simulation was carried out in accordance with the following algorithm. First, the parameters of the approximating function were obtained from the training data. Secondly, wind power plant generation forecasts were calculated based on test data. Then the forecasts were compared with the actual values. Finally, the accuracy criteria were estimated. **RESULTS.** Based on the results of the simulations and comparison of the accuracy evaluation criteria, the most effective technique for the wind farm power curve approximation was identified. A distinguishing feature of this technique is the splitting of the training data into subsamples at 16 wind directions, as well as preprocessing the data in each subsample using the bin method. The proposed approximation technique can be used for short-term and operational forecasting of wind farms output power and electrical energy. **CONSLUSTIONS.** this paper a number of wind farm power curve approximation techniques were proposed and a comparison of these techniques was carried out. По результатам сравнения рассмотренных методик аппроксимации оценки точности прогнозов была выявлена наиболее эффективная методика. The most effective approximation technique was identified by comparing the considered techniques by criteria for accuracy estimation.

Key words: wind power plant; electrical energy generation forecasting; wind farm power curve; renewable energy sources.

For citation: Snegirev DA, Pazderin AV, Samoilenko VO, Erokhin PM. Development of an improved wind farm power curve approximation approach. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):29-44.

Введение и литературный обзор

Задача прогноза мощности и выработки ветроэнергетических электростанций и установок – важнейшая часть задачи прогнозов балансов мощности и энергии современных энергосистем. Задача возникает при доле ветровой генерации в балансах мощности более 6 % или более величины вторичных резервов на загрузку и разгрузку частотоведущего оборудования энергосистем [1-4]. Также данная задача актуальна в условиях действия рыночных механизмов, стимулирующих участников к формированию как можно более точных графиков выработки [5, 6].

Толчок для развития статистического моделирования и прогноза мощности ветроэлектрических станций (ВЭС) и ветроэлектрических установок (ВЭУ) дало внедрение в 2006-2007 гг. современных методов численного интегрирования погоды и развитие погодных моделей мезо- и макро- масштабов. Однако, погрешность прогноза мощности ВЭУ в буревых условиях все еще часто достигала 84%, в среднем составляя 35-37 % [7-8]. Дальнейшее совершенствование прогнозирования произошло на рубеже 2010-х гг. в связи с массовым интересом к методам машинного обучения [9-13], позволяющим производить более качественную статистическую обработку информации с меньшими трудозатратами человека-оператора. В настоящее время погрешность прогноза часовой мощности на сутки вперед составляет в разных странах и энергообъединениях от 4 до 22 % в зависимости от природно-климатических условий, требований к погрешности прогноза, применяемым методам и алгоритмам прогноза [7, 8, 13].

Целью данной работы является разработка различных методик аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции от внешних метеорологических факторов и определение наиболее эффективной методики, которая будет обеспечивать низкую погрешность аппроксимации зависимости при сохранении невысокой вычислительной сложности, с учетом ограниченности объема ретроспективных данных и ограниченного количества независимых величин (признаков). Полученная методика аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции может быть использована для краткосрочного и оперативного прогнозирования мощности ВЭС, что позволит обеспечить эффективную работу ВЭС на рынках электроэнергии и мощности. Повышение точности прогнозирования мощности ВЭС также повышает и надежность электроснабжения энергорайонов с высокой

установленной мощностью ВЭС за счет более эффективного планирования режимов работы этих энергорайонов.

Описание объекта исследования и исходных данных

В качестве объекта исследования для разработки методики аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов выступала ВЭС, расположенная в Ростовской области, Россия. На ВЭС установлено 26 ветроэнергетических установок (ВЭУ) *Vestas V126-3.80*, установленная мощность каждой установки составляет 3,8 МВт. Общая установленная мощность ветроэлектростанции составляет 98,8 МВт.

Данные *Производителя* – заводская характеристика мощности отдельной ВЭУ [14]. Этот набор данных включает в себя следующие величины: мощность (кВт), скорость ветра (м/с). Всего – 19 наблюдений.

Данные *SCADA* – усредненные на 1-часовом интервале данные о мощности и метеорологических факторах. Источник данных о мощности – система АИИС КУЭ ВЭС. Источник метеоданных – *SCADA* ВЭС, метеоданные измеряются с помощью метеоприборов, расположенных на ВЭС. Этот набор данных включает в себя следующие величины: мощность (кВт), скорость ветра (м/с), направление ветра (°). Всего – 6563 наблюдений.

Данные *Провайдера* – усредненные на 1-часовом интервале данные о мощности и метеорологических факторах. Источник данных о мощности – система АИИС КУЭ ВЭС. Источник метеоданных – метеопровайдер [15], метеоданные определяются с помощью инструментов *NWP* (численный прогноз погоды). Этот набор данных включает в себя следующие величины: мощность (кВт), скорость ветра (м/с), направление ветра (°). Всего – 6840 наблюдений.

Описание вычислительных экспериментов

Методика проведения вычислительных экспериментов

Для определения методики аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов, которая обладает наименьшей погрешностью, для проверки каждой из разработанных методик было проведено несколько рядов вычислительных экспериментов. Каждый ряд вычислительных экспериментов соответствует определенному набору обучающих данных. А каждый отдельный вычислительный эксперимент в этом ряду соответствует определенной аппроксимирующей функции. По результатам выполнения каждого ряда вычислительных экспериментов определяется пять наилучших аппроксимирующих функций с наименьшей *NMAE*.

Суть каждого эксперимента сводилась к получению параметров аппроксимирующей функции по обучающим данным, расчету прогнозов генерации ВЭС по тестовым данным, сравнению прогнозов с фактическими значениями и оценке показателей погрешности прогнозов. Схема вычислительного эксперимента представлена на Рис. 1.

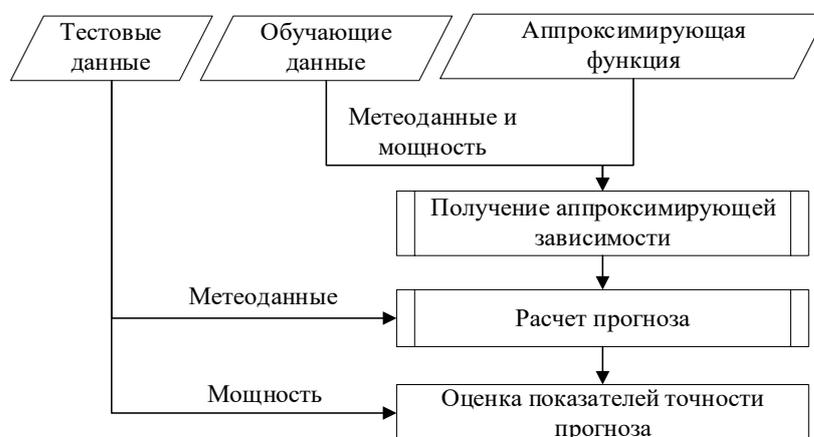


Рис. 1*. Схема вычислительного эксперимента

Fig. 1. Simulation flowchart

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

В качестве обучающих данных для аппроксимации зависимости мощности ветряной электростанции от внешних метеорологических факторов использовались данные Производителя, *SCADA* и Провайдера. В качестве тестовых данных использовались только

данные Провайдера, поскольку именно эти данные могут быть использованы для расчетов прогнозов генерации ВЭС.

Для определения параметров аппроксимирующих функций использовалась функция *fit* ПО MATLAB.

Показатели оценки точности прогнозов

Для оценки точности прогнозов генерации ВЭС используется ряд параметров [8], [16].

Нормализованная средняя абсолютная ошибка прогноза (*NMAE*) представляет собой среднюю сумму модулей ошибок прогноза, отнесенную к суммарной номинальной мощности всех ВЭУ на станции. Данный показатель определяется по формуле:

$$NMAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_{\text{факт}} - P_{\text{прогноз}}|}{P_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $P_{\text{факт}}$ – фактическая мощность, кВт; $P_{\text{прогноз}}$ – прогнозная мощность, кВт; $P_{\text{ном}}$ – суммарная номинальная мощность ВЭУ, кВт; N – количество наблюдений.

Суммарная относительная ошибка прогноза (E_{EE}) представляет собой сумму ошибок прогноза выработки электрической энергии, отнесенную к суммарной фактической выработке электрической энергии. Данный показатель определяется по формуле:

$$E_{EE} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{\text{факт}} - W_{\text{прогноз}})}{\sum_{i=1}^N W_{\text{факт}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $W_{\text{факт}}$ – фактическая выработка электрической энергии, кВт·ч; $W_{\text{прогноз}}$ – прогнозная выработка электрической энергии, кВт·ч; N – количество наблюдений.

Нормализованная средняя сумма квадратов ошибок прогноза (*NSSE*) представляет собой среднюю сумму квадратов ошибок прогноза, отнесенную к суммарной номинальной мощности всех ВЭУ на станции, также в квадрате. Данный показатель определяется по формуле:

$$NSSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(P_{\text{факт}} - P_{\text{прогноз}})^2}{P_{\text{ном}}^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $P_{\text{факт}}$ – фактическая мощность, кВт; $P_{\text{прогноз}}$ – прогнозная мощность, кВт; $P_{\text{ном}}^2$ – суммарная номинальная мощность ВЭУ, кВт; N – количество наблюдений.

Доля прогнозов с модулем ошибки меньше 20 МВт (*CI₂₀*) представляет собой отношение количества прогнозов, для которых абсолютное значение ошибки составляет менее 20 МВт, к общему количеству прогнозов. Данный показатель определяется по формуле:

$$CI_{20} = \frac{N_{20}}{N} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где N – количество наблюдений, N_{20} – количество наблюдений, которые удовлетворяют условию $|P_{\text{факт}} - P_{\text{прогноз}}| < 20 \text{ МВт}$.

Методики аппроксимации зависимости мощности ветроэлектростанции от внешних метеорологических факторов

Описание методик аппроксимации

В рамках вычислительных экспериментов было рассмотрено шесть методик получения аппроксимирующих зависимостей.

Методика 1 представляет собой простую аппроксимацию обучающих данных с помощью заданной аппроксимирующей функции. В качестве независимой переменной выступает скорость ветра V , в качестве зависимой – мощность P .

В методике 2 обучающие данные предварительно обрабатываются с помощью метода бинов [17]. Суть метода бинов заключается в усреднении значений зависимой и независимой величин в заданных интервалах. За счет этого происходит уменьшение количества измеренных данных, в каждом интервале остается только одна точка. Также устраняется значительный разброс между значениями зависимой величины, соответствующим близким по величине значениям независимой величины. Например,

пусть X – независимая величина, а Y – зависимая величина. В результате измерений этих величин могут получиться следующие пары значений: $X = 5$ и $Y = 3$; $X = 5,1$ и $Y = 10$; $X = 4,9$ и $Y = 5$. Наблюдается противоречивость измерений. Чтобы эту противоречивость исключить, можно воспользоваться методом бинов. После применения этого метода для интервала $4,5 \leq X < 5,5$ будет получена одна пара значений – $X = 5$ и $Y = 6$. Такая обработка обучающих данных позволяет использовать кусочно-заданные функции для аппроксимации.

В случае характеристик мощности ВЭС происходит усреднение мощности и скорости ветра в заданных интервалах скорости ветра. При этом используются следующие выражения [1]:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j}, \quad (5)$$

где V_i – значение скорости ветра, соответствующее i -му бину, м/с; N_i – количество наблюдений в i -м бине; $V_{n,i,j}$ – значения наблюдений скорости ветра в i -м бине, м/с.

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j}, \quad (6)$$

где P_i – значение мощности, соответствующее i -му бину, кВт; $P_{n,i,j}$ – значения наблюдений мощности в i -м бине, кВт.

Размер бина, то есть интервала скорости ветра, на котором происходит усреднение, выбран равным 0,5 м/с.

В методике 3 обучающие данные предварительно предлагается разбивать на подвыборки в соответствии с секторами направления ветра. Количество секторов, по которым разбивается исходная выборка, было выбрано равным 16. Каждый сектор – по $22,5^\circ$. Сектора именуются следующим образом: N – север, E – восток, S – юг, W – запад, NE – северо-восток, SE – юго-восток, SW – юго-запад, NW – северо-запад, NNE – северо-северо-восток, ESE – востоко-юго-восток, SSW – юго-юго-запад, WNW – западо-северо-запад, ENE – востоко-северо-восток, SSE – юго-юго-восток, WSW – западо-юго-запад, NNW – северо-северо-запад. Для каждой подвыборки выполняется аппроксимация обучающих данных, аналогично методике 1. Таким образом обеспечивается косвенный учет направления ветра.

В методике 4 также используется разбиение обучающих данных на подвыборки, аналогично методике 3. При этом внутри каждой подвыборки также применяется метод бинов, аналогично методике 2.

В методике 5 используется учет направления ветра в явном виде. При определении аппроксимирующей зависимости независимой переменной выступает скорость ветра V и направление ветра D , а зависимой – мощность P .

В методике 6 используется модифицированный метод бинов. Предложенная модификация позволяет использовать метод бинов при наличии зависимости от двух переменных. К обработке данных в соответствии с выражениями (5) и (6) добавляется также следующее:

$$D_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} D_{n,i,j} \quad (6)$$

где D_i – значение направления ветра, соответствующее i -му бину, $^\circ$; $D_{n,i,j}$ – значения наблюдений направления ветра в i -м бине, $^\circ$.

Описание аппроксимирующих функций

В методиках аппроксимации 1, 2, 3 и 4 использовались аппроксимирующие функции, в которых определялось зависимость от одной переменной. Эти функции обозначаются:

- $polyN$ – полиномы с 1 по 9 степень, где N – степень полинома;
- $exp1$ – экспонента; $exp2$ – сумма двух экспонент;
- $ratNK$ – рациональная функция, где N – степень полинома в числителе, K – степень полинома в знаменателе.

В методиках аппроксимации 5 и 6 использовались функции зависимости от двух переменных:

• $polyNK$ – полиномиальная поверхность с 1 по 5 степень, где N – степень полинома по первой переменной, K – степень полинома по второй переменной.

В методиках 2, 4 и 6 также использовались кусочно-заданные аппроксимирующие функции:

• $nearestinterp$ – аппроксимация методом интерполяции ближайшего соседа (ступенчатая аппроксимация);

• $linearinterp$ – кусочно-линейная аппроксимация;

• $cubicinterp$ – кусочно-кубическая аппроксимация.

Методика аппроксимации 1

Наборы обучающих данных: *Производитель, SCADA, Провайдер*.

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: $poly1, poly2, poly3, poly4, poly5, poly6, poly7, poly8, poly9, exp1, exp2, rat01, rat02, rat03, rat04, rat05, rat11, rat12, rat13, rat14, rat15, rat21, rat22, rat23, rat24, rat25, rat31, rat32, rat33, rat34, rat35, rat41, rat42, rat43, rat44, rat45, rat51, rat52, rat53, rat54, rat55$.

В таблицах 1, 2 и 3 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 1. На рис. 2 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 1.

Таблица 1

Table 1

Методика 1. Обучение по данным *Производителя*
Methodology 1. Training according to the Manufacturer

Функция	Показатели, %			
	$NMAE$	E_{EE}	$NSSE$	CI_{20}
$poly9$	22,30	-33,70	9,33	58,57
$poly8$	22,33	-33,81	9,36	58,66
$nearestinterp$	22,35	-34,24	9,38	58,60
$linearinterp$	22,42	-33,79	9,47	58,45
$cubicinterp$	22,44	-33,75	9,49	58,46

Таблица 2

Table 2

Методика 1. Обучение по данным *SCADA*
Methodology 1. Training based on SCADA data

Функция	Показатели, %			
	$NMAE$	E_{EE}	$NSSE$	CI_{20}
$poly5$	17,49	-9,82	5,25	65,97
$poly6$	17,49	-9,79	5,25	65,97
$poly7$	17,50	-9,82	5,26	66,08
$poly8$	17,50	-9,82	5,26	66,11
$poly9$	17,51	-9,81	5,27	66,09

Таблица 3

Table 3

Методика 1. Обучение по данным *Провайдера*
Methodology 1. Training according to the Provider

Функция	Показатели, %			
	$NMAE$	E_{EE}	$NSSE$	CI_{20}
$poly9$	17,23	0,28	4,77	66,15
$poly8$	17,23	0,25	4,77	66,11
$poly6$	17,24	0,28	4,79	66,26
$poly7$	17,24	0,29	4,79	66,09
$poly5$	17,26	0,29	4,79	66,37

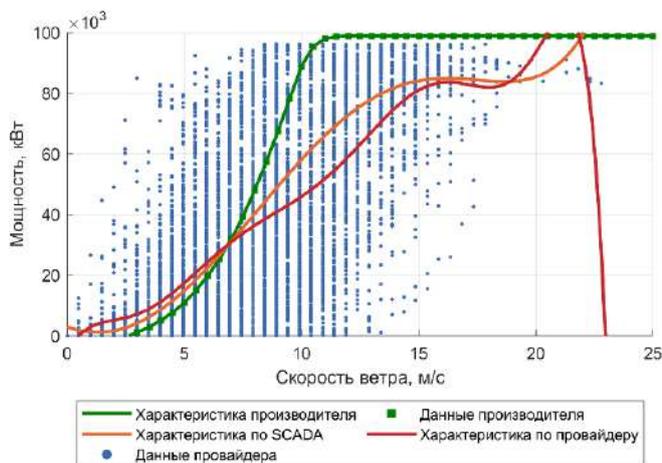


Рис. 2. Аппроксимация по методике 1 No.1.

Fig. 2. Results of approximation by technique No.1.

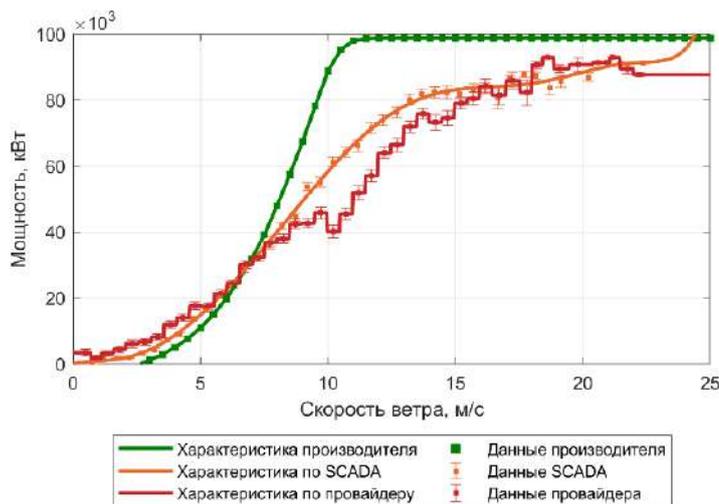


Рис. 3. Аппроксимация по методике 2

Fig. 3. Results of approximation by technique No.2.

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

Методика аппроксимации 2

Наборы обучающих данных: SCADA, Провайдер.

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: *linearinterp*, *nearestinterp*, *cubicinterp*, *poly1*, *poly2*, *poly3*, *poly4*, *poly5*, *poly6*, *poly7*, *poly8*, *poly9*, *exp1*, *exp2*, *rat01*, *rat02*, *rat03*, *rat04*, *rat05*, *rat11*, *rat12*, *rat13*, *rat14*, *rat15*, *rat21*, *rat22*, *rat23*, *rat24*, *rat25*, *rat31*, *rat32*, *rat33*, *rat34*, *rat35*, *rat41*, *rat42*, *rat43*, *rat44*, *rat45*, *rat51*, *rat52*, *rat53*, *rat54*, *rat55*.

В таблицах 4 и 5 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 2. На рис. 3 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 2.

Таблица 4
Table 4

Методика 2. Обучение по данным SCADA
Methodology 2. Training based on SCADA data

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
<i>poly9</i>	17,50	-9,84	5,26	66,06
<i>poly7</i>	17,50	-9,83	5,26	66,08
<i>linearinterp</i>	17,53	-9,83	5,27	66,03
<i>cubicinterp</i>	17,53	-9,79	5,28	65,93
<i>nearestinterp</i>	17,56	-9,53	5,32	66,22

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

Таблица 5
Table5

Методика 2. Обучение по данным Провайдера
Methodology 2. Training according to the Provider

Функция	Показатели, %			
	<i>NMAE</i>	<i>E_EE</i>	<i>NSSE</i>	<i>CI_20</i>
<i>nearestinterp</i>	17,08	0,48	4,74	67,24
<i>cubicinterp</i>	17,09	0,25	4,72	67,62
<i>linearinterp</i>	17,09	0,26	4,72	67,52
<i>poly9</i>	17,25	0,61	4,78	66,00
<i>poly8</i>	17,25	0,64	4,78	66,36

Рис. 3. Аппроксимация по методике 2 *Fig. 3. Results of approximation by technique No.2.*

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

Методика аппроксимации 3

Наборы обучающих данных: *SCADA, Провайдер.*

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: *poly1, poly2, poly3, poly4, poly5, poly6, poly7, poly8, poly9, exp1, exp2, rat01, rat02, rat03, rat04, rat05, rat11, rat12, rat13, rat14, rat15, rat21, rat22, rat23, rat24, rat25, rat31, rat32, rat33, rat34, rat35, rat41, rat42, rat43, rat44, rat45, rat51, rat52, rat53, rat54, rat55* (вид функции для разных направлений ветра в одном вычислительном эксперименте был одинаков).

В таблицах 6 и 7 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 3. На рис. 4 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 3.

Таблица 6
Table 6

Методика 3. Обучение по данным SCADA
Methodology 3. Training according to SCADA data

Функция	Показатели, %			
	<i>NMAE</i>	<i>E_EE</i>	<i>NSSE</i>	<i>CI_20</i>
<i>poly5</i>	17,37	-8,41	5,29	66,82
<i>poly6</i>	17,46	-9,00	5,36	66,50
<i>poly7</i>	17,60	-9,66	5,45	66,51
<i>poly8</i>	17,68	-9,24	5,54	66,17
<i>poly9</i>	17,74	-7,47	5,58	66,29

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

Таблица 7
Table 7

Методика 3. Обучение по данным Провайдера
Methodology 3. Training according to the Provider

Функция	Показатели, %			
	<i>NMAE</i>	<i>E_EE</i>	<i>NSSE</i>	<i>CI_20</i>
<i>poly9</i>	15,24	-0,01	3,91	71,23
<i>poly8</i>	15,31	0,03	3,94	71,03
<i>poly7</i>	15,36	0,03	3,96	70,54
<i>poly6</i>	15,38	0,01	3,97	70,36
<i>poly5</i>	15,44	0,03	4,00	70,25

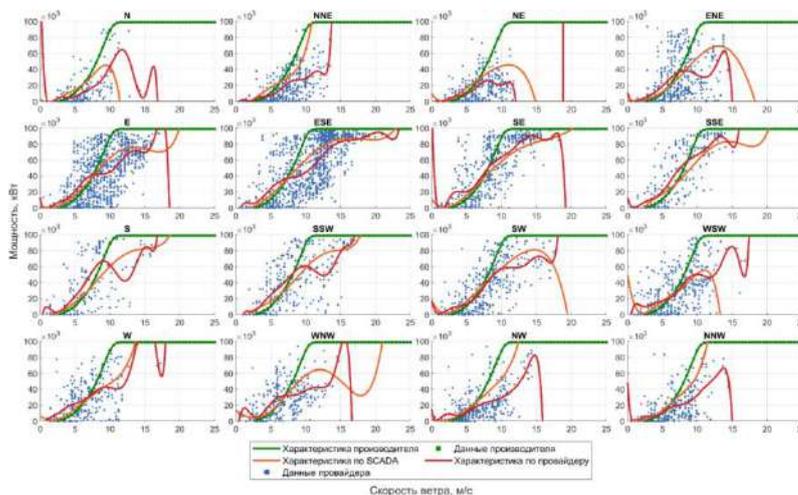


Рис. 4. Аппроксимация по методике 3

Fig. 4. Results of approximation by technique No.3.

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

Методика аппроксимации 4

Наборы обучающих данных: SCADA, Провайдер.

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: *linearinterp*, *nearestinterp*, *cubicinterp*, *poly1*, *poly2*, *poly3*, *poly4*, *poly5*, *poly6*, *poly7*, *poly8*, *poly9*, *exp1*, *exp2*, *rat01*, *rat02*, *rat03*, *rat04*, *rat05*, *rat11*, *rat12*, *rat13*, *rat14*, *rat15*, *rat21*, *rat22*, *rat23*, *rat24*, *rat25*, *rat31*, *rat32*, *rat33*, *rat34*, *rat35*, *rat41*, *rat42*, *rat43*, *rat44*, *rat45*, *rat51*, *rat52*, *rat53*, *rat54*, *rat55* (вид функции для разных направлений ветра в одном вычислительном эксперименте был одинаков).

В таблицах 8 и 9 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 4. На рис. 5 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 4.

Таблица 8
Table 8

Методика 4. Обучение по данным SCADA.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
<i>nearestinterp</i>	17,51	-8,26	5,37	65,76
<i>linearinterp</i>	17,55	-9,16	5,42	65,70
<i>poly9</i>	17,56	-7,76	5,44	66,42
<i>poly8</i>	17,65	-8,57	5,55	66,34
<i>cubicinterp</i>	18,19	-8,55	5,93	64,77

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

Таблица 9
Table 9

Методика 4. Обучение по данным Провайдера.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
<i>nearestinterp</i>	14,56	0,28	3,68	72,51
<i>linearinterp</i>	14,60	-0,01	3,67	72,82
<i>cubicinterp</i>	14,63	-0,10	3,69	72,68
<i>poly9</i>	15,38	0,25	3,95	70,37
<i>poly8</i>	15,39	0,43	3,98	70,17

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

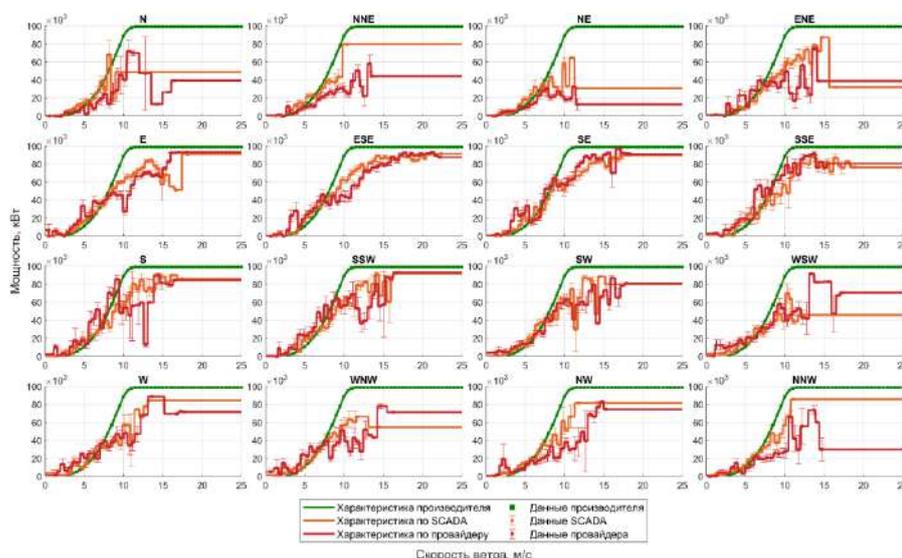


Рис. 5. Аппроксимация по методике 4

Fig. 5. Results of approximation by technique No.4.

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

Методика аппроксимации 5

Наборы обучающих данных: SCADA, Провайдер.

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: poly11, poly12, poly13, poly14, poly15, poly21, poly22, poly23, poly24, poly25, poly31, poly32, poly33, poly34, poly35, poly41, poly42, poly43, poly44, poly45, poly51, poly52, poly53, poly54, poly55.

В таблицах 10 и 11 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 5. На рис. 6 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 5.

Таблица 10

Table 10

Методика 5. Обучение по данным SCADA.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
poly44	16,92	-8,35	4,91	67,68
poly53	16,94	-8,32	4,96	67,60
poly45	16,96	-8,41	4,95	67,66
poly55	16,97	-8,42	4,96	67,59
poly54	16,97	-8,43	4,96	67,62

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

Таблица 11.

Table 11

Методика 5. Обучение по данным Провайдер.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
poly55	15,88	0,05	4,16	69,61
poly54	15,90	0,07	4,17	69,55
poly45	15,91	0,00	4,16	69,80
poly35	15,91	-0,02	4,16	69,91
poly25	15,94	-0,06	4,17	69,42

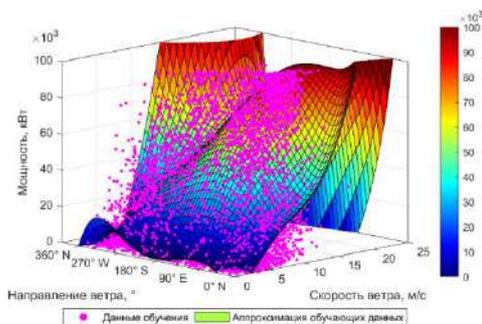


Рис. 6. Аппроксимация по методике 5 Fig. 6. Results of approximation by technique No.5.

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

Методика аппроксимации 6

Наборы обучающих данных: SCADA, Провайдер.

Полный набор аппроксимирующих функций для данной методики: linearinterp, nearestinterp, cubicinterp, poly11, poly12, poly13, poly14, poly15, poly21, poly22, poly23, poly24, poly25, poly31, poly32, poly33, poly34, poly35, poly41, poly42, poly43, poly44, poly45, poly51, poly52, poly53, poly54, poly55.

В таблицах 12 и 13 представлены результаты вычислительных экспериментов по методике аппроксимации 6. На рис. 7 представлена интерпретация аппроксимации зависимости мощности ВЭС от скорости ветра по методике 6.

Таблица 12
Table 12

Методика 6. Обучение по данным SCADA.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
poly45	16,79	-5,98	4,83	67,99
poly55	16,79	-5,99	4,84	68,04
poly54	16,80	-5,96	4,84	68,07
poly44	16,80	-5,88	4,80	67,93
poly53	16,82	-6,21	4,86	68,04

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

Таблица 13
Table 13

Методика 6. Обучение по данным Провайдер.

Функция	Показатели, %			
	NMAE	E_EE	NSSE	CI_20
linearinterp	15,19	0,08	4,01	72,09
cubicinterp	15,28	0,03	4,09	71,86
nearestinterp	15,74	0,27	4,52	69,92
poly45	16,08	1,76	4,21	69,94
poly35	16,09	1,79	4,21	69,87

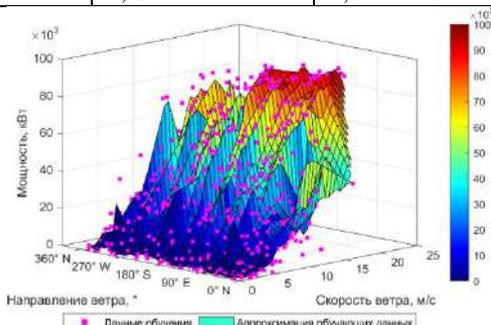


Рис. 7. Аппроксимация по методике 6 Fig. 7. Results of approximation by technique No.6.

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

Сравнение предложенных методик аппроксимации

По результатам проведенных вычислительных экспериментов для каждой методики аппроксимации была определена аппроксимирующая функция, обеспечивающая наименьшее значение *NMAE*. Для определения наиболее эффективной методики аппроксимации было выполнено сравнение показателей оценки погрешности и надежности прогнозов, представленное в таблице 14.

Сравнительный анализ рассмотренных методик аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование данных *Провайдера* в качестве обучающих данных позволило снизить ошибку прогнозирования для всех методик аппроксимации.

2. Методика аппроксимации 2 обладает меньшей погрешностью, чем методика 1. Аналогично для методик 4 и 3, а также методик 6 и 5. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что обработка исходных данных с применением метода бинов позволяет снизить ошибку прогнозирования.

3. Методики аппроксимации 3, 4, 5 и 6 обладают меньшей погрешностью, чем методики 1 и 2, что дает нам возможность судить об эффективности учета направления ветра с точки зрения снижения погрешности прогнозирования генерации ВЭС. Причем ошибка прогнозирования по методике 3 меньше, чем по методике 5, аналогично для методик 4 и 6. Можно сделать вывод о том, что учет направления ветра в неявном виде за счет разбиения обучающих данных на подвыборки по секторам направления ветра более эффективен, чем учет направления ветра в явном виде.

Проведенное сопоставление позволило установить, что наименьшей ошибкой прогнозирования *NMAE* обладает методика аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов под номером 4. В данной методике в качестве обучающих данных используются данные *Провайдера*. Эти данные разбиваются на подвыборки в соответствии с секторами направления ветра, внутри каждой подвыборки применяется метод бинов. Для аппроксимации внутри каждой подвыборки используется ступенчатая интерполяция (*nearestinterp*).

Предложенная методика аппроксимации 4 обеспечивает:

- уменьшение средней ошибки прогноза (*NMAE*) с 17,23 % (методика аппроксимации 1, обучающие данные – *Провайдер*) до 14,56 %, то есть в 1,2 раза (на 20 %);
- уменьшение суммарной квадратичной ошибки прогноза (*NSSE*) с 4,77 % (методика аппроксимации 1, обучающие данные – *Провайдер*) до 3,68 %, то есть в 1,3 раза (на 30 %).

На рис.8 представлены результаты расчетов прогнозов выдачи мощности ВЭС, рассчитанные по методике 4. В качестве тестовых данных для расчетов прогнозов использовались данные *Провайдера*.

Таблица 14

Table 14

Сравнение результатов вычислительных экспериментов по предложенным методикам
Comparison of results of computational experiments according to the proposed methods

№	Данные	Функция	Показатели оценки погрешности и надежности, %			
			<i>NMAE</i>	<i>E_EE</i>	<i>NSSE</i>	<i>CI_20</i>
1	SCADA	<i>poly5</i>	17,49	-9,82	5,25	65,97
	Провайдер	<i>poly9</i>	17,23	0,28	4,77	66,15
	Производитель	<i>poly9</i>	22,30	-33,70	9,33	58,57
2	SCADA	<i>poly9</i>	17,50	-9,84	5,26	66,06
	Провайдер	<i>nearestinterp</i>	17,08	0,48	4,74	67,24
3	SCADA	<i>poly5</i>	17,37	-8,41	5,29	66,82
	Провайдер	<i>poly9</i>	15,24	-0,01	3,91	71,23
4	SCADA	<i>nearestinterp</i>	17,51	-8,26	5,37	65,76
	Провайдер	<i>nearestinterp</i>	14,56	0,28	3,68	72,51
5	SCADA	<i>poly44</i>	16,92	-8,35	4,91	67,68
	Провайдер	<i>poly55</i>	15,88	0,05	4,16	69,61
6	SCADA	<i>poly45</i>	16,79	-5,98	4,83	67,99
	Провайдер	<i>linearinterp</i>	15,19	0,08	4,01	72,09

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

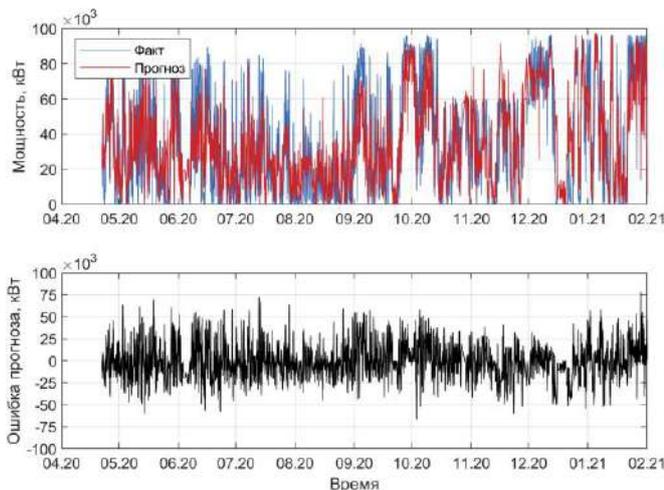


Рис. 8. Факт, прогноз и ошибка прогноза генерации ВЭС по методике 4, обучающие данные Провайдера

Fig. 8. Actual, forecasted and error wind power generation values for the approximation technique No.4 with Provider training data set

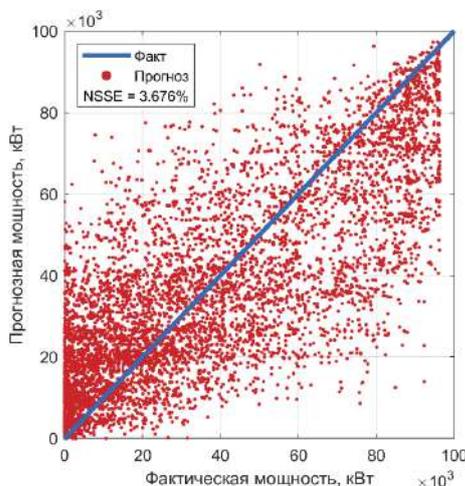


Рис. 9. График разброса прогнозных значений генерации ВЭС относительно фактических

Fig. 9. Scatter diagram of the forecasted wind power generation

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

Выводы

В данной статье был предложен ряд методик аппроксимации зависимости мощности ВЭС от внешних метеофакторов, а также выполнено сравнение этих методик.

По результатам анализа показателей оценки погрешности и надежности прогнозов генерации ВЭС для рассмотренных методик было определено, что на снижение погрешности прогнозирования генерации ВЭС влияют следующие факторы:

- использование данных Провайдера, а не SCADA и Производителя, в качестве обучающих данных;
- применение метода бинов для обработки обучающих данных;
- учет направления ветра как в явном, так и в неявном виде.

Также с помощью сравнения рассмотренных методик аппроксимации по средней ошибке прогнозирования *NMAE* была выявлена наиболее эффективная методика. Ей оказалась методика 4. Это предложенная методика аппроксимации зависимости мощности ВЭС, в которой применяется метод бинов для обработки обучающих данных, а также разбиение исходной выборки на подвыборки по секторам направления ветра. Данная методика обеспечивает наименьшую погрешность прогнозирования генерации ВЭС, а

значит наилучшую аппроксимацию зависимости мощности ветроэлектростанции от внешних метеорологических факторов среди рассмотренных методик.

Литература

1. Renewables 2021 Global Status Report // Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2021.
2. Wind energy in Europe 2020: Statistics and the outlook for 2021-2025 // WindEurope, 2021.
3. The impact of wind energy on jobs and the EU economy // WindEurope, Deloitte Advisory, S.L., 2017.
4. Eroshenko, S.A., Samoilenko, V.O., and Pazderin, A.V. Renewable energy sources for perspective industrial clusters development // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. pp 0-4.
5. C. Croonenbroeck, G. Stadtmann. Minimizing asymmetric loss in medium-term wind power forecasting // Renewable Energy, 2015, vol. 81, pp. 197-208.
6. J. Wang, A. Botterud, and R. Bessa et al. Wind power forecasting uncertainty and unit commitment // Applied Energy, 2011, vol. 88, pp. 4014–4023.
7. M. Santhosh, C. Venkaiah, and D. M. Vinod Kumar. Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: A review // Engineering Reports, 2020; vol. 2, pp. 0-19.
8. B. Yang, L. Zhong, and J. Wang et al. State-of-the-art one-stop handbook on wind forecasting technologies: An overview of classifications, methodologies, and analysis // Journal of Cleaner Production, 2021, vol. 283, pp. 0-24.
9. M. Ahmadi, M. Khashei. Current status of hybrid structures in wind forecasting // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, vol. 99, pp. 0-26.
10. M. S. Nazir, F. Alturise, and S. Alshmrany. Wind Generation Forecasting Methods and Proliferation of Artificial Neural Network: A Review of Five Years Research Trend // Sustainability, 2020, vol. 12, pp. 0-26.
11. Z. Wu, X. Xia, and L. Xiao et al. Combined model with secondary decomposition-model selection and sample selection for multi-step wind power forecasting // Applied Energy, 2020, vol. 261, pp. 0-18.
12. M. Yang, C. Shi, and H. Liu. Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves // Energy, 2021, vol. 218, pp. 0-9.
13. J. Wang, Q. Li, and B. Zeng. Multi-layer cooperative combined forecasting system for short-term wind speed forecasting // Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, vol. 43, pp. 0-18.
14. IEC 61400-12-1:2017. Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines // International Electrotechnical Commission, 2017.
15. Global Weather Provider WorldWeatherOnline, URL: www.worldweatheronline.com (дата обращения 21.02.2021)
16. J.M. González-Sopeña, V. Pakrashi, and B. Ghosh. An overview of performance evaluation metrics for short-term statistical wind power forecasting // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, vol. 138, pp. 0-16
17. IEC 61400-12-2:2013. Wind turbines - Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry // International Electrotechnical Commission, 2013.

Авторы публикации

Снегирев Денис Алексеевич – ассистент кафедры автоматизированных электрических систем Уральского энергетического института имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Email: denis.snegirev@urfu.ru

Паздерин Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского энергетического института имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Email: a.v.pazderin@urfu.ru

Самойленко Владислав Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных электрических систем Уральского энергетического института имени

первого Президента России Б.Н. Ельцина» Email: v.o.samoilenko@urfu.ru

Ерохин Петр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, профессор-исследователь кафедры автоматизированных электрических систем Уральского энергетического института имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Email: petr_erohin@bk.ru

References

1. Renewables 2021 Global Status Report. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2021.
2. Wind energy in Europe 2020: Statistics and the outlook for 2021-2025. *WindEurope*, 2021.
3. The impact of wind energy on jobs and the EU economy. *WindEurope*, Deloitte Advisory, S.L., 2017.
4. Eroshenko, S.A., Samoilenko, V.O., and Pazderin, A.V. Renewable energy sources for perspective industrial clusters development. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, ICIEAM 2016. pp 0-4.
5. C. Croonenbroeck, G. Stadtmann. Minimizing asymmetric loss in medium-term wind power forecasting. *Renewable Energy*, 2015, vol. 81, pp. 197-208.
6. J. Wang, A. Botterud, and R. Bessa et al. Wind power forecasting uncertainty and unit commitment. *Applied Energy*, 2011;88:4014–4023.
7. M. Santhosh, C. Venkaiah, and D. M. Vinod Kumar. Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: A review. *Engineering Reports*, 2020;2,0-19.
8. B. Yang, L. Zhong, and J. Wang et al. State-of-the-art one-stop handbook on wind forecasting technologies: An overview of classifications, methodologies, and analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2021;283:0-24.
9. M. Ahmadi, M. Khashei. Current status of hybrid structures in wind forecasting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021;99:0-26.
10. M. S. Nazir, F. Alturise, and S. Alshmrany. Wind Generation Forecasting Methods and Proliferation of Artificial Neural Network: A Review of Five Years Research Trend. *Sustainability*, 2020;12:0-26.
11. Z. Wu, X. Xia, and L. Xiao et al. Combined model with secondary decomposition-model selection and sample selection for multi-step wind power forecasting. *Applied Energy*, 2020;261:0-18.
12. M. Yang, C. Shi, and H. Liu. Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves. *Energy*, 2021;218:0-9.
13. J. Wang, Q. Li, and B. Zeng. Multi-layer cooperative combined forecasting system for short-term wind speed forecasting. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021;43:0-18.
14. IEC 61400-12-1:2017. Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. *International Electrotechnical Commission*, 2017.
15. Global Weather Provider. *WorldWeatherOnline*, 2021, www.worldweatheronline.com.
16. J.M. González-Sopeña, V. Pakrashi, and B. Ghosh. An overview of performance evaluation metrics for short-term statistical wind power forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021;138:0-16.
17. IEC 61400-12-2:2013. Wind turbines - Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry. *International Electrotechnical Commission*, 2013.

Authors of the publication

Denis A. Snegirev – Assistant, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Email: denis.snegirev@urfu.ru

Andrew V. Pazderin – Head of the Automated Electric Systems Department, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Email: a.v.pazderin@urfu.ru

Vladislav O. Samoilenko – Associate Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Email: v.o.samoilenko@urfu.ru

Petr M. Erokhin – Professor, Research Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Email: petr_erohin@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено

28.04.2023г.

Отредактировано

15.05.2023г.

Принято

29.05.2023г.

УДК 621.311.24

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В СОСТАВЕ ОЭС СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

Дерюгина Г.В., Игнатъев Е.В., Сычѐв Н.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

E-mail: derugina63@mail.ru, jeniya_ig@mail.ru, sychevn@inbox.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* При высокой доле ветровых электростанций (ВЭС), работающих в объединенной энергетической системе (ОЭС), снижается надежность работы энергетической системы в целом, из-за стохастического характера поступления ветровых ресурсов к площадкам ВЭС. Данная проблема может быть решена путем объединения ВЭС в оперативно-диспетчерские ветроэнергетические комплексы (ВЭК) путем создания энергетических, инфраструктурных и информационных связей, что в свою очередь приводит к повышению надежности выработки электрической мощности. Поэтому предлагается разработка методики определения оптимальной конфигурации (количества ВЭС и местоположения их площадок) подобного ветроэнергетического комплекса, которая позволяет наиболее эффективно использовать асинхронность поступления ветрового ресурса к площадкам отдельных ВЭС, в следствие чего происходит снижение суточной и сезонной неравномерности энергоотдачи ВЭК, и у него появляется гарантированная мощность.

ЦЕЛЬ. Целью работы является разработка методики определения оптимальной конфигурации ветроэнергетического комплекса, работающего в объединенной энергетической системе, на основании показателей режима работы комплекса, характеризующих его энергетическую эффективность и эффективность использования асинхронности поступления ветрового ресурса для выравнивания режима его работы.

МЕТОДЫ. В методике применяются статистические методы и методы математического моделирования. Выбор оптимальной конфигурации производится методом многокритериальной оптимизации и решается итерационным методом перебора из всех возможных вариантов, значимость которых оценивается по методу рангов.

РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате была разработана методика и выбраны критерии оптимизации конфигурации ВЭК. Проведено апробирование методики оптимизации конфигурации ВЭК на примере ВЭК в составе пяти ВЭС одинаковой мощности на территории ОЭС Средней Волги. Для рассматриваемого примера мощность ВЭК оптимальной конфигурации при обеспеченности 95% составляет около 11% от установленной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика и проведенные исследования для рассматриваемого региона позволят другим исследователям получить аналогичные результаты для других регионов, что повысит эффективность ВЭК на рассматриваемых территориях.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция; ветроэнергетический комплекс; асинхронность ветра; вертикальный профиль ветра; оптимизация; конфигурация; объединенная энергосистема.

Для цитирования: Дерюгина Г.В., Игнатъев Е.В., Сычѐв Н.В. Оптимизация конфигурации ветроэнергетического комплекса в составе ОЭС Средней Волги // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 45-57.

OPTIMIZATION OF THE CONFIGURATIONS OF THE WIND POWER COMPLEX AS A PART OF THE IPS OF THE MIDDLE VOLGA

GV. Deryugina, EV. Ignatiev, NV. Sychev

National Research University «MPEI», Moscow, Russia

E-mail: derugina63@mail.ru, jeniya_ig@mail.ru, sychevn@inbox.ru

Abstract: THE RELEVANCE. With a high proportion of wind farms operating in the energy system, the reliability of the energy system decreases due to the stochastic nature of wind resources. This problem can be solved by integrating wind farms into operational-dispatching wind energy complex with energy, infrastructure and information links. It will increase in the reliability of electric power generation.

It is proposed to develop a methodology for determining the optimal configuration (the number of wind farms and the location of their sites) of a wind energy complex, which allows the most efficient use of the asynchrony of the wind resource supply to the sites of individual wind farm. As a result the daily and seasonal unevenness of wind energy complex energy output decreases, and it has a firm capacity.

THE PURPOSE. Developing a methodology for determining the optimal configuration of the wind energy complex, which allows using the asynchronous supply of the wind resource to the sites of individual wind farms with the greatest efficiency.

METHODS. The methodology uses statistical methods and methods of mathematical modeling. The problem of determining the optimal configuration of the wind energy complex is the problems of multicriteria optimization and solve by enumeration of all possible options, the value of which is estimated by the rank method.

RESULTS. As a result, a methodology was developed and criteria for optimizing the VEC configuration were selected. Approbation of the methodology was carried out using the example of a wind energy complex consisting of five wind farms of the same capacity on the territory of the Energy system of the Middle Volga. For the example, the power of the wind energy complex of the optimal configuration with a 95% of wind resources completeness is about 11% of the installed power capacity.

CONCLUSION. The methodology and researches will allow other researchers to obtain similar results for other regions, which will increase the efficiency of wind energy complex in the territories under consideration.

Key words: wind farm; wind energy complex; asynchronous supply of the wind resource; wind gradient model; optimization; configuration; integrated power system.

For citation: Deryugina GV, Ignatiev EV, Sychev NV. Optimization of the configurations of the wind power complex as a part of the IPS of the middle Volga. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):45-57.

Введение

Ветроэнергетика является одной из динамично развивающихся отраслей энергетики в мире. На начало 2023 года суммарная установленная мощность ВЭС в мире составила 908 ГВт, увеличившись за предыдущий год на 77,6 ГВт, что на 17% меньше по сравнению с 2022 г. [1]. Программа поддержки ВИЭ (программа ДПМ ВИЭ в соответствии с Постановлением Правительства РФ №449 от 28 мая 2013 г) способствовала появлению в России нового сектора электроэнергетики. В соответствии с программой ДПМ ВИЭ до 2024 года были выделены квоты на строительство 3,6 ГВт сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) наземного размещения. Основной способ повышения маневренности и надежности энергоснабжения при строительстве и эксплуатации сетевых ВЭС – это объединение управления отдельных ветроэлектростанций в единый энергокомплекс. Этот способ повышения надежности позволяет значительно снизить колебания мощности для часовых и суточных интервалов [2-6]. Объединение ВЭС в ветроэнергетические комплексы (ВЭК) позволяет, в силу наличия асинхронности поступления ветрового ресурса к отдельным ВЭС комплекса, добиться сокращения неравномерности выработки энергии по времени, сглаживания колебаний мощности, вызванных краткосрочными вариациями скорости ветра, и увеличения мощности, генерируемой комплексом с высокими значениями обеспеченности по ветровому ресурсу [7]. Входящие в состав ОЭС ВЭС работают параллельно с объединенной энергетической системой по вынужденному режиму в соответствии с графиком прихода ветрового ресурса. При этом за счет асинхронности поступления ветрового ресурса к ВЭС происходит дополнение выработки от всех ВЭС, на площадках которых в определенный момент времени наблюдается низкая ветровая активность, за счет выработки ВЭС, на площадках которых в тот же момент времени наблюдается высокая ветровая активность.

Научная и практическая новизна исследования

Ранее авторами были выполнены аналогичные исследования для ВЭК на базе оффшорных ВЭС, расположенных в акватории Белого и Баренцева морей и в акватории западного побережья Мьянмы [8,9,10]. В результате проведенных исследований было выявлено, что из-за асинхронности поступления ветрового ресурса можно получить мощность от 5% до 12% от установленной мощности ВЭК при обеспеченности от 80% до 95%. Окончательно величина мощности, генерируемой ВЭК при высокой обеспеченности существенно зависит от удаленности выбранных площадок ВЭС и различий их геофизических условий (удаление от берега, форма береговой линии, тип моря, близость островов и т.д.) [8,9,10]. При размещении ВЭК на берегу, геофизические условия (рельеф, близость водных поверхностей и т.д.) площадок ВЭС могут иметь большее расхождение по сравнению с площадками оффшорных ВЭС, что также повлияет на особенности формирования ветра и ее асинхронность, и в ранее проведенных работах не учитывалось.

В работе проводится исследование величины мощности, генерируемой комплексом ВЭС, состоящего из пяти станций одинаковой мощности, располагающихся на территории ОЭС Средней Волги.

Методика определения оптимальной конфигурации ВЭК

Методика определения оптимальной конфигурации ВЭК, работающего в ОЭС, строится на основе предположения о зависимости эффективности ВЭК от количества ВЭС, входящих в состав ВЭК, различия геофизических условий площадок ВЭС и их удаленности. В качестве допущений принимаются:

-рассматриваются ВЭС одинаковой мощности и одинаковых моделей ветроэлектрических установок (ВЭУ);

-рассматриваются все возможные варианты конфигурации ВЭК путем последовательного изменения числа ВЭС при $k=\{0; K\}$, где k – количество ВЭС в составе ВЭК, K – максимальное количество ВЭС.

Определение оптимальной конфигурации ВЭК строится на расчете показателей режима ее работы для различных вариантов конфигурации. Первоначально производится расчет режима работы каждой i -ой ВЭС. Результатом расчета является график изменения рабочей мощности за расчетный период (1 год), с интервалом времени $t - N_i^{ВЭС}(t)$. На следующем этапе производится расчёт суммарной мощности для всех возможных вариантов конфигурации ВЭК, состоящего из нескольких ВЭС одинаковой мощности, расположенных на k площадках, по формуле (1):

$$N_j^{ВЭК}(t) = \sum_1^k N_i^{ВЭС}(t), \quad (1)$$

где j – номер варианта конфигурации ВЭК, i – номер площадки ВЭС, $N_i^{ВЭС}(t)$ – график изменения мощности i -й ВЭС за каждый интервал времени t расчетного периода; k – максимальное количество ВЭС, входящих в состав ВЭК, которое меняется от 1 до k . Далее производится определение энергетических и статистических показателей режима работы ВЭК для каждой j -й конфигурации.

При оптимизации конфигурации ВЭК рассматриваются различные критерии оптимальности, которые могут противоречить друг другу и количество которых может меняться в зависимости от основной цели интеграции ВЭК в ОЭС. В связи с этим в работе оптимизация конфигурации ВЭК производится по интегральному критерию из всех возможных вариантов [10]. Интегральный критерий принимает оптимальное значение – E^{opt} в соответствии с соотношением (2)::

$$E^{opt} = \min \{ E_j \}, \quad (2)$$

$$E_j = \sum_{i=1}^n v_i \cdot f_i, \quad (3)$$

где E^{opt} – значение оптимального критерия состава ВЭК по рассматриваемым критериям; E_j – среднее значение критерия j -ого варианта состава ВЭК по n критериям f – значение

критерия (ранг); v_i – весовой коэффициент по i -му критерию; n – число рассматриваемых критериев [10].

Для оптимизации конфигурации ВЭК были выбраны 4 критерия:

– критерий энергетической эффективности: $\max\{k_{\text{ИУМ}}\}$, о.е. – максимум коэффициента использования установленной мощности ВЭК, о.е., определяемого по формуле (4):

$$k_{\text{ИУМ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВЭК}}}{(N_{\text{уст}}^{\text{ВЭК}} \cdot 8760)}, \quad (4)$$

– критерии эффективности за счет асинхронности поступления ветровых ресурсов на разных площадках ВЭС, такие как:

• $\min\{C_N\}$, о.е. – минимум коэффициента вариации значений мощности ВЭК, определяемого по формуле (5):

$$C_N = \frac{\sigma_N}{\bar{N}^{\text{ВЭК}}}, \quad (5)$$

где σ_N , о.е. – среднеквадратическое отклонение значений мощности ВЭК, определяемое по формуле (6):

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{(N_i^{\text{ВЭК}} - \bar{N}^{\text{ВЭК}})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

где $\bar{N}^{\text{ВЭК}}$, МВт – среднее значение мощности, генерируемой ВЭК за расчетный период; n – общее число значений мощности, генерируемой ВЭК за расчетный период.

• $\max\{N_p\}$, % – максимум значений мощности ВЭК с расчетной обеспеченностью ветра 75% и 95%, который определяется по эмпирической кривой обеспеченности (см. формулу (7)):

$$P(m) = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где m – порядковый номер члена ряда часовых значений мощности, вырабатываемой ВЭК за расчетный период, расположенного в убывающем порядке; n – общее число членов ряда.

Показатели, на основании которых назначаются ранги критериев, определяются на основании графика изменения мощности ВЭК, определяемого для каждого j -го варианта его состава - $N_i^{\text{ВЭС}}(t)$

Расчет режима совместной работы нескольких ВЭС в рамках ВЭК проводится на основании исходных данных по ветровому ресурсу для каждой i -й ВЭС, входящей в состав ВЭК. Выполняется следующая последовательность расчетов для каждого интервала времени расчетного года:

- Пересчет значения скорости ветра на площадке i -й ВЭС в момент времени t на высоту башни ВЭУ расчетной модели;
- Определение мощности ВЭУ в момент времени t по рабочей характеристике ВЭУ расчетной модели при пересчитанном на высоту башни ВЭУ значении скорости ветра;
- Определение мощности i -й ВЭС в момент времени t .

При расчете показателей режима работы ВЭК принимаются следующие допущения:

• Пересчет скорости ветра на высоту башни расчетной модели ВЭУ производится по степенной зависимости вертикального профиля ветра (ВПВ) по формуле (8):

$$V_i^h = V_i^{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{m_l(\bar{v}_i)}, \quad (8)$$

где l – номер месяца, V_i^{10} , V_i^h скорости ветра на высоте 10 и h метров; \bar{v}_i – среднемесячная скорость ветра на высоте 10 м; m_l – среднемесячный показатель степени; $m_l(\bar{v}_i)$ – модель вертикального профиля ветра (ВПВ) разрабатывается по методике кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ» по данным аэрологической МС (АМС) из БД «Вертикальный профиль ветра [11].

• Определение рабочей мощности ВЭУ на k -й площадке производится по характеристике $N_{\text{ВЭУ}}(V)$ для стандартных условий;

• Различные виды потерь ВЭУ (на гистерезис, аэродинамическое затенение и т.д.) не учитываются.

Выбор площадок ВЭС

Выбор площадок ВЭС производился в соответствии с критериями: интенсивность ветрового ресурса; возможность технического присоединения к электрическим сетям; транспортная доступность площадки, отсутствие социальных и экологических ограничений согласно карте особо охраняемых природных территорий [12].

Оценка ветровых ресурсов на территории ОЭС Средней Волги проводилась по информации с сайта «Расписание Погоды» [13]. Были рассчитаны основные среднеголетние характеристики ветра на площадках 96 наземных метеостанций (МС), расположенных на территории ОЭС Средней Волги. По результатам расчета построены карты распределения ветровых ресурсов по территории ОЭС Средней Волги на высоте 10 м (рис. 1) с использованием программы *Surfer 15* [14].

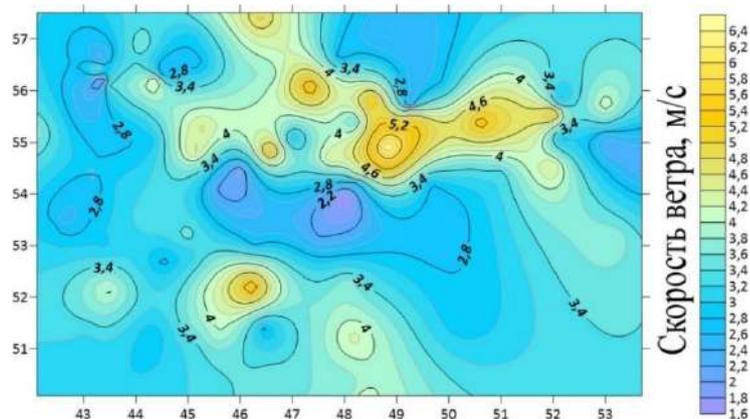


Рис.1. Карты распределения среднеголетней скорости ветра на территории ОЭС Средней Волги на высоте 10 м

Fig.1. Distribution map of the average annual wind speed at the height of 10 m on the territory of the energy system of the Middle Volga

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для оптимизации конфигурации ВЭК выбрано пять наиболее перспективных вариантов площадок, подходящих под строительство ВЭС мощностью 35 МВт на территории ОЭС Средней Волги (рис. 2) и расположенных в разных частях рассматриваемой территории, что позволяет максимально использовать эффект асинхронности ветра. Общая информация о площадках представлена в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Общая информация о вариантах площадок ВЭС
General information on WEC site options

Регион	Ближайшая МС	Местоположение	\bar{V}_{10} , м/с	C_V , о.е.
Республика Татарстан	Чистополь	55,370 с.ш., 50,650 в.д.	4,0	0,57
Нижегородская обл.	Шахунья	57,72 ⁰ с.ш., 46,27 ⁰ в.д.	3,25	0,56
Саратовская обл.	Ершов	51,41 ⁰ с.ш., 48,25 ⁰ в.д.	3,85	0,57
Республика Чувашия	Канаш	54,43 ⁰ с.ш., 47,14 ⁰ в.д.	3,7	0,55
Пензенская обл.	Каменка	53,13 ⁰ с.ш., 43,98 ⁰ в.д.	3,36	0,66

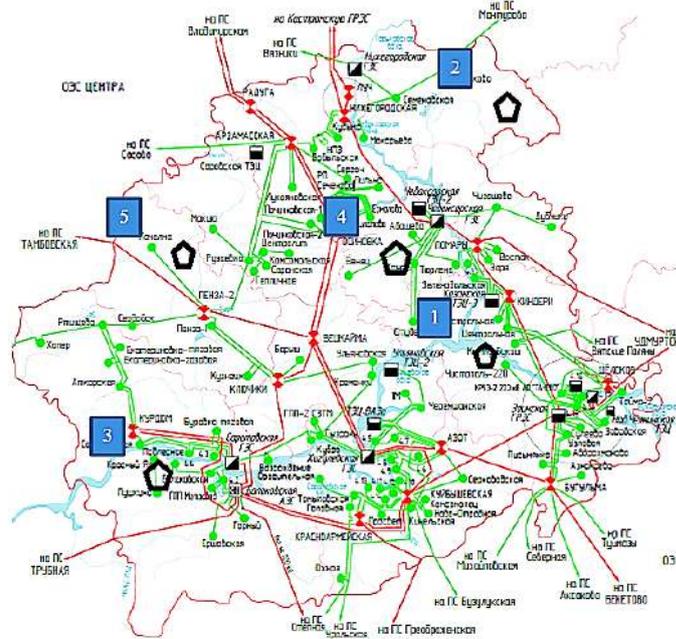


Рис. 2. Расположение перспективных площадок ВЭС на схеме электрических сетей ОЭС Средней Волги

Fig.2. Wind farm sites locations on the territory of the energy system of the Middle Volga

*Источник: [15] Source compiled by [15]

Модель вертикального профиля ветра

Разработка модели ВПВ для 5-и площадок ВЭС на территории ОЭС Средней Волги проводилась по базе данных (БД) «Вертикальный профиль ветра (ВПВ)», в которой представлены данные аэрологических МС в виде среднемноголетних среднемесячных значений скорости ветра на 2-х высотах (10 м и 100 м). На территории ОЭС Средней Волги расположено 5 аэрологических МС (АМС): Казань, Куйбышев (Самара), Нижний Новгород, Пенза, Саратов, расположение которых представлено на рисунке 3.

По многолетним среднемесячным значениям скорости ветра на двух высотах (10 м и 100 м) на площадках АМС были определены среднемесячные показатели степени m_l , и по полученным результатам по методике кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ» была разработана модель ВПВ в виде зависимости: $m_l = 1,248 \cdot (V_l^{10})^{-1,126}$ с коэффициентом детерминированности 0,86 (рис. 4).

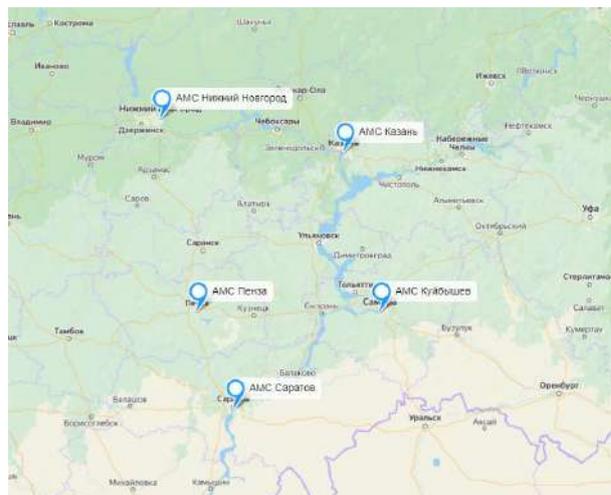


Рис.3. Расположение АМС на территории ОЭС Средней Волги

Fig.3. Aerological weather stations location on the territory of the energy system of the Middle Volga

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

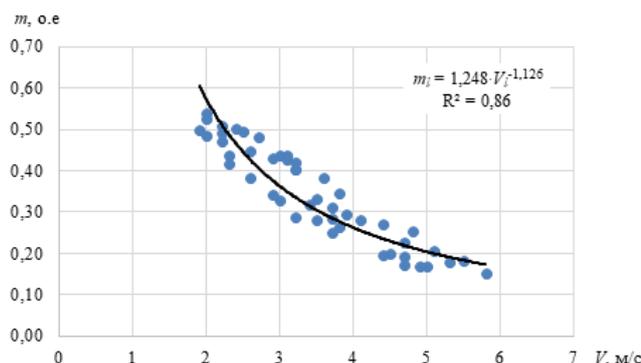


Рис.4. Эмпирическая и аппроксимирующая зависимости $m_i(\bar{V}_i)$ по данным группы АМС на территории ОЭС Средней Волги

Fig.4. Empirical and approximating dependencies $m_i(\bar{V}_i)$ according to the group of aerological weather stations on the territory of the energy system of the Middle Volga

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Выбор модели ВЭУ

Выбор расчетной модели ВЭУ для размещения в составе ВЭК осуществлялся из трех вариантов с одинаковой высотой башни, единичной мощности от 2,5 до 4,2 МВт, производство которых было частично локализовано на территории РФ. В настоящее время из моделей, представленных в таблице 2 в России выпускается только модель L100-2.5 [16]. Предварительно все варианты ВЭУ были проверены на соответствие классу безопасности по ГОСТ и климатическому исполнению для ветровых и климатических условий 5-и выбранных площадок ВЭС. Расчет выработки вариантов ВЭУ на площадках ВЭС производился по ряду наблюдений расчетного года, пересчитанного на высоту 100 м по разработанной модели ВПВ. В качестве примера в таблице 2 приведены показатели энергетической эффективности вариантов ВЭУ в ветровых условиях площадки ВЭС рядом с МС Чистополь.

Таблица 2
Table 2

Показатели энергетической эффективности вариантов ВЭУ с высотой башни 100 м в ветровых условиях площадки ВЭС рядом с МС Чистополь
Energy efficiency indicators of wind turbines options with a tower height of 100 m in the wind conditions of the wind farm near MS Chistopol

№	Производитель	Модель	N , МВт	H_b , м	V_p^N , м/с	$k_{\text{вэу}}^{\text{исп.}}$	$\mathcal{E}_{\text{год.}}$, млн. кВт·ч	$\mathcal{E}_{\text{уд.}}$, кВт·ч/м ² в год
1	Lagerway	L100-2,5	2,5	100	14	0,35	7,644	973,3
2	Vestas	V126-4,2	4,2	100	14	0,33	12,217	980
3	Siemens-Gamesa	SG132-3,4	3,465	100	15	0,36	10,944	800

По критериям энергетической эффективности была выбрана модель SG132-3,4 производителя Siemens-Gamesa мощностью 3,465 МВт с высотой башни 100 м.

Показатели эффективности вариантов конфигурации ВЭК

Выбор оптимальной конфигурации ветроэнергетического комплекса (ВЭК) производился методом перебора из 31-го варианта. В таблице 3 представлены рассматриваемые варианты конфигурации ВЭК, номера ВЭС, входящих в состав ВЭК обозначены через «+». Для всех вариантов конфигурации ВЭК были определены значения критериев: коэффициента использования установленной мощности $k_{\text{иум}}$, о.е.; коэффициента вариации рабочей мощности C_N , о.е.; максимальные мощности, соответствующие обеспеченности 75% и 95%, в процентах от установленной мощности ВЭК – $N_{P=75\%}$, $N_{P=95\%}$, % (табл. 3). Определение мощности при заданной обеспеченности производилось по эмпирическим кривым обеспеченности (рис. 5).

На рисунке 6 приведены графики изменения среднемесячной рабочей мощности разных вариантов конфигурации ВЭК. Поскольку установленная мощность вариантов ВЭК

меняется, так как зависит от количества ВЭС в составе ВЭК, то значения среднемесячной рабочей мощности ВЭК были нормированы относительно его установленной мощности (см. формулу (9)):

$$\bar{N}_l^{ВЭК} = \frac{N_l^{ВЭК}}{N_{уст}^{ВЭК}}, \quad (9)$$

где $N_l^{ВЭК}$ – среднемесячная рабочая мощность ВЭК, $N_{уст}^{ВЭК}$ – установленная мощность ВЭК

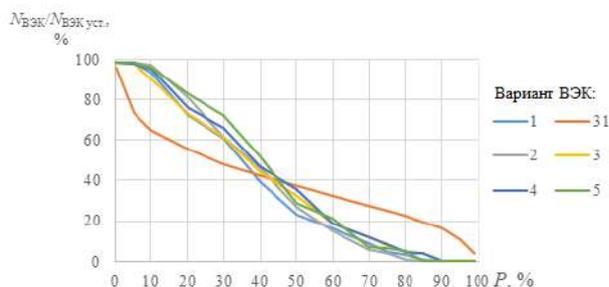


Рис.5. Эмпирические кривые обеспеченности для шести вариантов конфигурации ВЭК

Fig.5. Empirical wind probability curve of 6 variants for the configuration of the wind farms complex

Таблица 3
Table 3

Показатели эффективности вариантов состава ВЭК
Performance indicators of WEC options

№ вар.	Конфигурация ВЭК					$k_{иум}$, о.е.	C_N , о.е.	$N_{P=75\%}$, %	$N_{P=95\%}$, %
	ВЭС ₁	ВЭС ₂	ВЭС ₃	ВЭС ₄	ВЭС ₅				
1	+					0,36	0,93	4,7	0,0
2		+				0,4	0,93	3,9	0,0
3			+			0,39	0,85	7,9	0,0
4				+		0,41	0,84	8,6	0,0
5					+	0,41	0,87	6,1	0,0
6	+	+				0,38	0,67	15,9	1,8
7	+		+			0,38	0,62	18,5	3,4
8	+			+		0,38	0,62	18,7	2,5
9	+				+	0,39	0,65	16,5	2,4
10		+	+			0,39	0,68	16,2	2,0
11		+		+		0,4	0,67	17,6	2,0
12		+			+	0,41	0,67	16,2	1,8
13			+	+		0,4	0,69	16,1	2,1
14			+		+	0,4	0,65	18,6	2,4
15				+	+	0,41	0,66	17,8	2,4
16	+	+	+			0,38	0,56	21,8	6,5
17	+		+	+		0,39	0,55	21,8	6,3
18	+			+	+	0,39	0,55	22,6	6,4
19	+	+		+		0,39	0,55	22,5	6,0
20	+	+			+	0,39	0,56	22,5	5,2
21	+		+		+	0,39	0,54	23,6	6,5
22		+	+	+		0,4	0,60	20,8	4,1
23			+	+	+	0,4	0,59	21,5	5,7
24		+		+	+	0,41	0,58	23,0	5,7
25		+	+		+	0,4	0,58	22,1	5,3
26	+	+	+	+		0,39	0,51	23,2	8,8
27	+	+	+		+	0,39	0,50	24,8	8,7
28	+	+		+	+	0,39	0,50	24,9	9,1
29	+		+	+	+	0,39	0,50	24,8	9,1
30		+	+	+	+	0,4	0,54	24,1	8,0
31	+	+	+	+	+	0,39	0,48	25,3	11,0

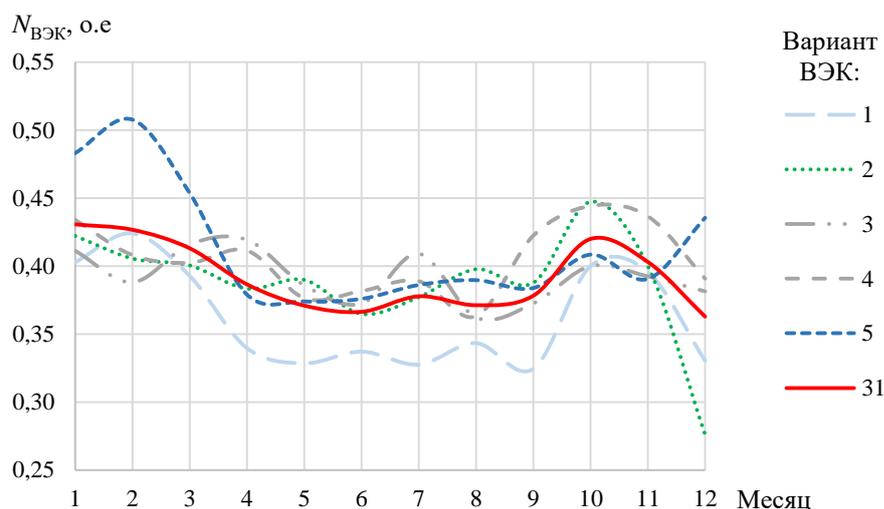


Рис.6. Изменение среднемесячной рабочей мощности разных вариантов конфигурации ВЭК

Fig.6. changes in the average monthly operating power of different wind farms complex configuration variants

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В результате проведенных расчетов (табл. 3, рис. 5-6), выявлено, что в зависимости от конфигурации ВЭК:

- коэффициент вариации рабочей мощности ВЭК может меняться от 0,48 до 0,93;
- максимальная мощность при обеспеченности 75% от 3,9% до 25,3%, а при обеспеченности 95% соответственно от 0,0% до 11,0%;
- коэффициент использования установленной мощности ВЭК меняется не существенно от 0,36 до 0,41, что свидетельствует о равнозначной интенсивности ветра на всех площадках;
- сезонная неравномерность выдачи ВЭК существенно зависит от состава ВЭС.

Для оптимизации конфигурации ВЭК было выбрано четыре критерия: $f_1 - \max \{k_{\text{ИУМ}}\}$; $f_2 - \min \{C_N\}$; $f_3 - \max \{N_{P=95\%}\}$; $f_4 - \max \{N_{P=75\%}\}$ и проведено их ранжирование (см. табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Значения критериев оптимизации вариантов конфигурации ВЭК
Optimization Criteria Values for WEC Configuration Options

№ вар.	f_1	f_2	f_3	f_4	№ вар.	f_1	f_2	f_3	f_4
1	31	30	27	30	16	27	11	8	13
2	13	31	28	31	17	26	9	10	14
3	19	28	29	28	18	17	8	9	9
4	5	27	30	27	19	25	10	11	11
5	1	29	31	29	20	21	12	15	10
6	29	24	25	26	21	22	6	7	6
7	30	17	17	19	22	12	16	16	16
8	28	18	18	17	23	6	15	12	15
9	24	20	19	22	24	4	14	13	8
10	14	25	23	24	25	9	13	14	12
11	10	23	24	21	26	23	5	4	7
12	3	22	26	23	27	20	2	5	4
13	11	26	22	25	28	15	3	2	2
14	7	19	20	18	29	18	4	3	3
15	2	21	21	20	30	8	7	6	5
					31	16	1	1	1

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Выбор оптимальной конфигурации ВЭК производился по четырем критериям четырьмя вариантами оптимизации, в которых менялись основные критерии и

соответственно им весовые коэффициенты оптимальности (табл. 5). В качестве примера в таблице 6 представлены результаты определения среднего ранга по интегральному критерию при оптимизации конфигурации ВЭК по варианту №1.

Таблица 5

Table 5

Основные критерии оптимальности и весовые коэффициенты для критериев для вариантов оптимизации конфигурации ВЭК

Main optimality criteria and weights for criteria for WEC optimization options

Вариант оптимизации	Основные критерии	Весовые коэффициенты v_i			
		$k_{ИУМ}$	C_N	$N_{P=75\%}$	$N_{P=95\%}$
1	$\max \{k_{ИУМ}\}$	0,4	0,2	0,2	0,2
2	$\min \{C_N\}$	0,2	0,4	0,2	0,2
3	$\max\{N_{P=95\%}\},$ $\max\{N_{P=75\%}\}$	0,167	0,167	0,333	0,333
4	Все критерии равнозначны	0,25	0,25	0,25	0,25

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Таблица 6

Table 6

Определение среднего ранга вариантов конфигурации ВЭК с учетом весовой доли ранга (вариант оптимизации №1)

Determination of average rank of WEC configuration options based on rank weight (optimization option 1)

№ вар.	$v_1 \cdot f_1$	$v_2 \cdot f_2$	$v_3 \cdot f_3$	$v_4 \cdot f_4$	E	№ вар.	$v_1 \cdot f_1$	$v_2 \cdot f_2$	$v_3 \cdot f_3$	$v_4 \cdot f_4$	E
1	12,4	6	5,4	6	29,8	16	10,8	2,2	1,6	2,6	17,2
2	5,2	6,2	5,6	6,2	23,2	17	10,4	1,8	2	2,8	17
3	7,6	5,6	5,8	5,6	24,6	18	6,8	1,6	1,8	1,8	12
4	2	5,4	6	5,4	18,8	19	10	2	2,2	2,2	16,4
5	0,4	5,8	6,2	5,8	18,2	20	8,4	2,4	3	2	15,8
6	11,6	4,8	5	5,2	26,6	21	8,8	1,2	1,4	1,2	12,6
7	12	3,4	3,4	3,8	22,6	22	4,8	3,2	3,2	3,2	14,4
8	11,2	3,6	3,6	3,4	21,8	23	2,4	3	2,4	3	10,8
9	9,6	4	3,8	4,4	21,8	24	1,6	2,8	2,6	1,6	8,6
10	5,6	5	4,6	4,8	20	25	3,6	2,6	2,8	2,4	11,4
11	4	4,6	4,8	4,2	17,6	26	9,2	1	0,8	1,4	12,4
12	1,2	4,4	5,2	4,6	15,4	27	8	0,4	1	0,8	10,2
13	4,4	5,2	4,4	5	19	28	6	0,6	0,4	0,4	7,4
14	2,8	3,8	4	3,6	14,2	29	7,2	0,8	0,6	0,6	9,2
15	0,8	4,2	4,2	4	13,2	30	3,2	1,4	1,2	1	6,8
						31	6,4	0,2	0,2	0,2	7

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Наиболее оптимальные варианты конфигурации ВЭК по четырем вариантам оптимизации представлены в таблице 7, они приведены в порядке убывания степени оптимальности.

Наиболее оптимальным вариантом состава ВЭК для четырех вариантов оптимизации является вариант №31: ВЭК в составе пяти ВЭС мощностью 35 МВт.

Таблица 7

Table 7

Наиболее оптимальные варианты конфигурации ВЭК по 4-м вариантам оптимизации

The most optimal variants of configuration of WEC on 4 options of optimization

Вариант оптимизации	Основные критерии	Наиболее оптимальные варианты ВЭК			
1	$\max \{k_{ИУМ}\}$	30	31	28	24
2	$\min \{C_N\}$	31	28	29	27
3	$\max \{N_{P=95\%}\},$ $\max \{N_{P=75\%}\}$	31	28	29	30
4	Все критерии равнозначны	31	28	30	29

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Заключение

1. Разработана методика и выбраны критерии оптимизации конфигурации ВЭК в составе нескольких ВЭС на территории ОЭС. Разработанная методика позволяет изменять состав критериев, их количество и значимость. Методика применима, как для оптимизации конфигурации существующих ВЭК при интеграции новых ВЭС, так и для проектируемых ВЭК.

2. Проведено апробирование методики оптимизации конфигурации ВЭК на примере ВЭК в составе пяти ВЭС одинаковой мощности на территории ОЭС Средней Волги. Предварительно проведено техническое обоснование пяти ВЭС. Результаты исследования:

– выявлено противоречие между выбранными критериями оптимизации, при условии проведения оптимизации только по одному критерию, что еще раз подтвердило необходимость проведения многокритериальной оптимизации;

– выявлена асинхронность ветровых ресурсов на площадках пяти ВЭС, что позволяет получить рабочую мощность для оптимальной конфигурации ВЭК около 11% от установленной мощности ВЭК при обеспеченности 95%. Наличие асинхронности поступления ветрового ресурса оказывает позитивное влияние на показатели качества и прогнозирования выработки электроэнергии, а также управление энергетической системой.

– объединение ВЭС в ВЭК приводит к значительному снижению сезонной неравномерности выдачи электроэнергии, коэффициент вариации рабочей мощности снижается с 0,98 (при условии размещения ВЭК на одной площадке) до 0,48 (ВЭК в составе пяти ВЭС).

В перспективе планируется развитие методики определения оптимальной конфигурации ВЭК с добавлением определения оптимального состава ВЭК, т.е. в составе ВЭК могут рассматриваться ВЭС неодинаковой мощности и разного состава оборудования (в составе ВЭС могут быть рассмотрены ВЭУ разных моделей).

Литература

1. Отчет Global Wind Report 2022. – [Электронный ресурс] URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2022>.

2. Solomon A. A., Michel Child, Upeksha Caldera, Christian Breyer. Exploiting wind-solar resource complementarity to reduce energy storage need. AIMS Energy, 2020, 8(5): 749-770. doi: 10.3934/energy.2020.5.749.

3. Kroposki B. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2017;5(6).

4. Holttinen H. et al. Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation: Final summary report, IEA Wind TCP Task 25. Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation: Final summary report, IEA Wind TCP Task 25. – 2021.

5. Child M. et al. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable energy*. 2019.
6. Cui M. et al. An optimized swinging door algorithm for wind power ramp event detection // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – IEEE, 2015.
7. Ernst B., Wan Y. H., Kirby B. Short-term power fluctuation of wind turbines: analyzing data from the German 250-MW measurement program from the ancillary services viewpoint. – National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 1999. – №. NREL/CP-500-26722.
8. Игнатъев Е.В. Определение оптимального состава оффшорного ветроэнергетического комплекса // Новое в российской электроэнергетике. – 2020. – №. 6. – С. 6-16.
9. Ignatev E. et al. Wind Energy Perspectives in Myanmar. Handbook of Research on Smart Technology Models for Business and Industry. IGI Global, 2020. pp. 181-210.
10. Дерюгина Г. В. и др. Перспективы оффшорной ветровой энергетики в Республике Союз Мьянма // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2020. – №. 5. – С. 35-46.
11. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Вертикальный профиль ветра» // Правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» - №2012620870; опубл. 28.06.2012.
12. Российский информационный сайт «Особо охраняемые природные территории России». [Электрон. ресурс] URL: http://oopt.aari.ru/oopt_map.
13. Российский метеорологический сайт «Расписание погоды». - [Электрон. ресурс] URL: <http://www.rp5.ru>.
14. GOLDEN SOFTWARE, LLC «Surfer15». - [Электрон. ресурс] URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>.
15. Российский информационный сайт «energybase.ru». - [Электрон. ресурс] URL: <https://energybase.ru/map/map-substations-powerplants-volga>.
16. Ассоциация Развития Возобновляемой энергетики «АРВЭ». - [Электрон. ресурс] URL: <https://rreda.ru/information-bulletini-rreda>.

Авторы публикации

Дерюгина Галина Владимировна – Старший преподаватель каф. Гидроэнергетики и Возобновляемых Источников Энергии (ГВИЭ) НИУ «МЭИ».

Игнатъев Евгений Витальевич – к.т.н., Доцент каф. Гидроэнергетики и Возобновляемых Источников Энергии (ГВИЭ) НИУ «МЭИ».

Сычёв Никита Валерьевич – Магистрант каф. Гидроэнергетики и Возобновляемых Источников Энергии (ГВИЭ) НИУ «МЭИ».

References

1. *Global Wind Report 2022*. – [Электронный ресурс] URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2022>
2. Solomon A. A., Michel Child, Upeksha Caldera, Christian Breyer. *Exploiting wind-solar resource complementarity to reduce energy storage need*. AIMS Energy, 2020, 8(5): 749-770. doi: 10.3934/energy.2020.5.749
3. Kroposki B. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2017;5:6.
4. Holttinen H. et al. *Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation: Final summary report, IEA Wind TCP Task 25*. Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation: Final summary report, IEA Wind TCP Task 25. 2021.
5. Child M. et al. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable energy*. 2019.
6. Cui M. et al. *An optimized swinging door algorithm for wind power ramp event detection*. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015.

7. Ernst B, Wan Y. H, Kirby B. *Short-term power fluctuation of wind turbines: analyzing data from the German 250-MW measurement program from the ancillary services viewpoint*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 1999. №. NREL/CP-500-26722.

8. Ignatev EV. *Determination of the best structure of an offshore wind energy complex*. New in the Russian electric power industry, Moscow, pp. 6, 6-16, June 2020.

9. Ignatev E. et al. *Wind Energy Perspectives in Myanmar*. Handbook of Research on Smart Technology Models for Business and Industry. IGI Global, 2020. C. 181-210.

10. Evgenii Ignatev, Galina Deryugina, Htet Myat Htoon, Mikhail Tyagunov. *Wind Energy Perspectives in Myanmar*. *Vestnik MPEI*. 2020;5:35-46.

11. A. Vas'kov, G. Deryugina, M. Tyagunov, D. Chernov. *Certificate of state registration of the database «Vertical wind profile»*. Copyright holder: Moscow Power Engineering Institute. No. 2012620870, Moscow, 2012.

12. «Special Protected Area in Russia». Available at: URL: http://oopt.aari.ru/oopt_map.

13. Reliable prognosis official website. Available at: URL: <http://www.rp5.ru>.

14. GOLDEN SOFTWARE, LLC «Surfer15». Available at: URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>.

15. «Energybase.ru». Available at: URL: <https://energybase.ru/map/map-substations-powerplants-Volga>.

16. Russia Renewable Energy Development Association. Available at: URL: <https://rreda.ru/information-bulletini-rreda>.

Authors of the publication

Galina V. Deriugina – Senior Lecturer, MPEI, Department of Hydro and renewable energy.

Evgenii V. Ignatev – Associate Professor, Csc. (Engineering sciences), MPEI, Department of Hydro and renewable energy.

Nikita V. Sychev – Student, MPEI, Department of Hydro and renewable energy.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **09.05.2023г.**

Отредактировано **30.05.2023г.**

Принято **09.06.2023г.**

УДК 620.92

СОСТАВ И СВОЙСТВА НЕФТЯНЫХ ШЛАМОВ

Зверева Э.Р.¹, Эминов А.А.¹, Зверев Л.О.², Липатов Д.В.¹

¹Казанский государственный энергетический университет

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

belvira6@list.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Предприятия топливно-энергетического комплекса по уровню воздействия на окружающую среду занимают ведущее место ввиду образования большого количества гетерогенных отходов. В результате деятельности нефтедобывающих предприятий регулярно образуются нефтяные шламы, которые подлежат захоронению или дальнейшей переработке. Хранение нефтешлама вызывает сложные экологические проблемы, в то же время нефтяная часть его является ценным органическим сырьем для переработки и вовлечения во вторичное использование, при условии предварительного анализа исходного сырья и подбора оптимальной технологии.

ЦЕЛЬ. В настоящей работе приводятся результаты исследований отходов нефтяных шламов из резервуаров нефтехранилищ. Для установления способа утилизации нефтешламов, в первую очередь необходимо определить их состав и основные физико-химические свойства. **МЕТОДЫ.** В работе рассмотрены результаты химических, физико-химических исследований нефтешлама, согласно следующим стандартам: ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей; ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей; ГОСТ 11851-85 Нефть. Метод определения парафина; ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Метод определения кинематической вязкости; ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности; ГОСТ 2517-2012 Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб; ГОСТ 2177-99 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава; ГОСТ 2477-65 Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды и др. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложены новые результаты определения в нефтешламе доли нефтепродукта, содержания механических примесей, воды, хлористых солей, массовой доли серы, низшей теплоты сгорания. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные исследования показали, что отходы нефтяных шламов из резервуаров нефтехранилищ обладают рядом ценных свойств, и их можно использовать для получения ценных нефтепродуктов, дополнительной энергии при совместном сжигании с топливом.

Ключевые слова: нефтяной шлам; утилизация; состав; теплота сгорания; вязкость; влажность; механические примеси; доля нефтепродуктов.

Для цитирования: Зверева Э.Р., Эминов А.А., Зверев Л.О., Липатов Д.В. Состав и свойства нефтяных шламов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 58-67.

COMPOSITION AND PROPERTIES OF OIL SLUDGE

ER. Zvereva¹, AA. Eminov¹, LO. Zverev², DV. Lipatov¹

¹ Kazan State Power Engineering University

² Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

belvira6@list.ru

Abstract. RELEVANCE. Assumptions of the fuel and energy complex on the increased impact on the environment take the lead in relation to a large amount of heterogeneous waste. As a result of oil production activities, there are captures of oil sludge, which are subject to disposal or further development. The storage of oil sludge causes complex environmental problems, while the oil part

of its own valuable organic raw materials for processing and sale in secondary use, while waiting for the analysis of the initial composition and the selection of complex technology.

THE GOAL. This paper presents the results of studies of oil sludge waste from oil storage tanks. To establish a method for the disposal of oil sludge, first of all, it is necessary to determine their composition and basic physical and chemical properties. METHODS. The paper considers the results of chemical, physico-chemical studies of oil sludge, according to the following standards: GOST 6370-83. Oil, petroleum products and additives. Method of determination of mechanical impurities; GOST 6370-83. Oil, petroleum products and additives. Method of determination of mechanical impurities; GOST 11851- 85 Oil. Method of paraffin determination; GOST 33-2000. Petroleum products. Method for determining kinematic viscosity; GOST 3900-85. Oil and petroleum products. Density determination methods; GOST 2517-2012 Oil and petroleum products. Sampling methods; GOST 2177-99 Nefteproducts. Methods for determining the fractional composition; GOST 2477-65 Oil and petroleum products. Method for determining the water content and other RESULTS. New results are proposed for determining the proportion of petroleum products in oil sludge, the content of mechanical impurities, water, chloride salts, the mass fraction of sulfur, and the lowest heat of combustion. CONCLUSION. The conducted studies have shown that oil sludge waste from oil storage tanks has a number of valuable properties, and they can be used to obtain valuable petroleum products, additional energy when co-incinerated with fuel.

Keywords: *oil sludge; utilization; composition; heat of combustion; viscosity; humidity; mechanical impurities; proportion of petroleum products.*

For citation: Zvereva ER., Eminov AA., Zverev LO., Lipatov DV. Composition and properties of oil sludge. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):58-67.

Введение

Нефтяная промышленность по уровню воздействия на окружающую среду занимает одно из первых мест среди ведущих отраслей ввиду образования большого количества гетерогенных отходов. В результате деятельности нефтедобывающих предприятий регулярно образуются отходы со значительным содержанием нефти: нефтяные шламы и нефтезагрязненные грунты. Это отходы 3-2-го классов опасности в твердом или пластичном состоянии, требующие специальных методов обращения. При этом темпы образования отходов данного вида заметно превышают темпы их утилизации. Это свидетельствует об актуальности создания эффективных, экономичных и экологически чистых технологий переработки нефтесодержащих отходов [1-2].

Шламы образуются при строительстве нефтяных и газовых скважин, при промышленной эксплуатации месторождений переработки нефти, обезвреживании сточных вод, а также при чистке резервуаров и другого оборудования. Различного вида нефтешламы являются распространенными отходами и для объектов энергетического комплекса, транспортных, машиностроительных, химических, металлургических предприятий. Природа их образования в вышеперечисленных отраслях большей частью аналогична отходообразующим процессам в нефтяной отрасли. Наиболее значительные количества нефтесодержащих отходов формируются при зачистке резервуарных парков ТЭЦ, аэропортов, железнодорожных станций, металлургических комбинатов. Пропарочные станции железнодорожных цистерн и очистные сооружения также являются источниками крупнотоннажных углеводородсодержащих шламов различного фазового и химического состава [3-4].

Нефтяные шламы являются наиболее весомыми отходами нефтедобычи и нефтепереработки. Из одной тонны сырой нефти в процессе её переработки выход нефтешламов составляет около 7 килограммов. В ходе добычи, переработки и транспортировки сырой нефти образуется нефтешлам, который подлежит захоронению или дальнейшей переработке. Вторичная переработка нефтешлама является одной из важнейших задач промышленности, так как являются ценнейшим сырьем для переработки

и вовлечения во вторичное использование, при условии предварительного анализа исходного сырья и подбора оптимальной технологии.

Хранение нефтешлама вызывают сложные экологические проблемы, в то же время нефтяная часть его является ценным органическим сырьем. В результате их утилизации можно получить такие товарные продукты, как углеводородный газ, компоненты товарных топлив, смазочные вещества, битум, а также продукты утилизации - некультивированный грунт, зола, сажа, газообразные компоненты [5].

Различают термические, химические, физико-химические, биологические и другие способы утилизации нефтешламов.

1. Термический метод. Основным термическим методом утилизации является сжигание. Условия осуществления технологического процесса: $t = 800-1200^{\circ}\text{C}$, избыток кислорода. В качестве соответствующего оборудования используют камерные, барботажные, шахтные установки с кипящим слоем и вращающиеся печи.

2. Химический метод основан на использовании растворителей. Для диспергирования нефтешламов применяют низкокипящие парафиновые углеводороды, например, *n*-гексан, широкую фракцию легких углеводородов, газовый конденсат и некоторые другие.

3. Биологический метод (биоразложение) осуществляют путём использованием специальных штаммов бактерий, биогенных добавок и подачи воздуха. Процесс характеризуется достаточно простым аппаратным оформлением и экологически безопасен.

4. Физико-химические методы. При переработке нефтешлам предварительно разогревают, разрушают водонефтяную эмульсию и утилизируют каждый полученный компонент. Для повышения эффективности разделения на углеводородную и водную фазы в нефтяной шлам добавляют деэмульгаторы. Обработанный нефтешлам поступает далее на двухфазную центрифугу, где происходит дополнительная очистка от взвеси механических примесей [6-7].

В настоящее время наиболее распространенным в производстве способом переработки отходов данной группы является термические методы утилизации. Отличительной особенностью процессов термического крекинга, пиролиза является получение из сырья газообразной, жидкой - смолы и твердой фазы – кокса. Пиролизом твердых и полужидких нефтяных отходов можно получить топливный газ низкой калорийности $6000-9000 \text{ ккал/м}^3$ и смол. Процесс низкотемпературного пиролиза обычно проводят при температуре $500-550^{\circ}\text{C}$ с получением горючих газов и твердого остатка. Пиролиз целесообразно использовать при утилизации твердых нефтяных шламов с малым содержанием воды (менее 3%) [4,8].

Таким образом, задача для предприятий топливно-энергетического комплекса по сокращению негативного воздействия отходов производства на окружающую среду за счет утилизации и переработки нефтешламов является *актуальной и обладает научной и практической ценностью*.

В Туркменистане Государственной программой развития нефтегазовой промышленности Туркменистана до 2030 года предусматривается наращивание в стране объемов нефтепродуктов и повышение их качества в результате переработки углеводородного сырья. По состоянию на начало 2020 года доказанные запасы нефти в Туркменистане составляли 82 млн тонн. Оценки прогнозных запасов нефти туркменского сектора Каспийского моря (разделен на 32 лицензионных блока) существенно разнятся и составляют, по заявлениям властей Туркменистана, около 8 млрд тонн. По данным Государственного концерна «Туркменгеология», в Туркменистане открыто 38 нефтяных и 82 газоконденсатных месторождения. Все нефтегазовые активы Туркменистана находятся в собственности государства. В разработке находятся около 30 месторождений. Наиболее крупные из них — Готурдепе, Барсагельмес, Челекенский блок, Кумдаг, Корпедже, Махтумкули, Окарем и блок Небитдаг. По итогам 2021 года объем добычи нефти и газового конденсата в Туркменистане составил 8,9 млн т (-7,3% к 2020 году.). Основной объем добычи нефти в стране обеспечивается Государственной компанией «Туркменнефть» (месторождения Готурдепе — 2 млн т в год, Кумдаг-Гогерендаг — 0,3 млн т в год и др.). Правительством Туркменистана рассматривается проект строительства

нового НПЗ в районе порта Окарем мощность 3–5 млн т в год и остановки «Сейдинского» НПЗ вследствие недостатка нефтяных ресурсов и отсутствия нефтепроводной инфраструктуры на востоке страны. Нефтешламы, как известно, образуются в процессе добычи, перекачки, хранения нефти и нефтепродуктов, эксплуатации очистных сооружений и др. В связи с этим проблема утилизации нефтешламных остатков, в Туркменистане стоит достаточно остро.

Для установления способа утилизации нефтешламов, в первую очередь необходимо определить их состав и основные физико-химические свойства.

По внешнему виду нефтешлам - это густая, вязкая пастообразная масса, достаточно сильно обводненная (содержание воды 20-70 %). Она также содержит в среднем 20-75 % нефтепродуктов и 5-10 % механических примесей в виде абразивной или металлической пыли, песка. Состав нефтешлама, который хранится долгое время, со временем изменяется из-за накопления атмосферных осадков, развития микроорганизмов, окислительных и других процессов [9-10].

Мы исследовали образцы резервуарного нефтешлама, отобранные из нефтяных резервуаров в Казахстане, который накапливается в емкостях в результате хранения и перевозки Мангышлакской нефти и нефтепродуктов, согласно следующим стандартам: ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей; ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей; ГОСТ 11851- 85 Нефть. Метод определения парафина; ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Метод определения кинематической вязкости; ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности; ГОСТ 2517-2012 Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб; ГОСТ 2177-99 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава; ГОСТ 2477-65 Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды и др. [11-13].

Материалы и методы.

Определение доли нефтепродуктов.

Для определения доли нефтепродуктов отобрали пробу образцов нефтешлама и просушили до воздушно-сухого состояния. Поместили навески в конические колбы, вместимостью 150 см³, смачивают хлороформом. Затем несколько раз проводят экстракцию путём добавления 10-15 см³ хлороформа до получения в последней порции бесцветного экстракта. Время проведения каждой экстракции - 5-10 минут. Экстракты фильтруют в коническую колбу через фильтр «синяя лента». Остаток в колбе, где проводилась экстракция, промывают 5 мл хлороформа. Объединенный хлороформный экстракт выпаривали в вытяжном шкафу на водяной бане. Оставшийся в стаканчике после испарения хлороформа осадок растворяют в 5-10 мл гексана. Полученный раствор пропускали через хроматографическую колонку. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты определения доли нефтепродуктов
Results of determining the share of petroleum products

Измерение	Масса навески образца нефтошлама, г	Масса пустого стаканчика, г	Масса стаканчика с осадком, г
Первое	10,0250	27,1921	31,8047
Второе	10,0118	29,8494	34,4528

В ходе работы определена массовая доля нефтепродуктов в нефтешламе; результат удовлетворяет условию приемлемости результатов, и представлен в виде доверительного интервала $X_{ср} = 46,0 \pm 14,7 \%$.

Определение содержания механических примесей

Исследование проводили согласно ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей.

Присутствие в нефти механических примесей затрудняет ее транспортирование по трубопроводам и переработку, вызывает эрозию внутренних поверхностей труб нефтепроводов и образование отложений в теплообменниках, печах и холодильниках, что приводит к снижению коэффициента теплопередачи, повышает

зольность остатков от перегонки нефти (мазутов и гудронов), содействует образованию стойких эмульсий.

Для анализа взвесили сухие фильтры в химических стаканчиках на аналитических весах. Отобрали навеску нефтешлама, растворили в 100 мл толуола. Полученный раствор отфильтровали. Осуществляли два параллельных измерения. По окончании фильтрования, фильтры перенесли в соответствующие химические стаканчики. Фильтры поместили в сушильный шкаф на 30 минут. Затем охладили в эксикаторе, взвесили. Повторно сушили 30 минут, охладили в эксикаторе, взвесили на аналитических весах.

Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты определения содержания механических примесей
The results of determining the content of mechanical impurities

Измерение	Масса навески, г	Масса подготовленного фильтра в стаканчике, г	Масса стаканчика с осадком, г
Первое	10,0095	30,2380	32,8406
Второе	10,0056	46,4507	49,0519

В ходе работы определена массовая доля механических примесей в нефтешламе $X_{ср} = 26,0 \%$; результат удовлетворяет условию приемлемости результатов.

Определение содержания воды

Исследование проводилось согласно ГОСТ 2477 – 2014 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды». Настоящий стандарт устанавливает метод определения содержания воды в нефтепродуктах (в том числе пластичных смазках, парафинах, церезинах, восках, гудронах и битумах), нефти и присадках.

При содержании воды в нефти и нефтепродуктах увеличивается расход топлива на подогрев нефти, забиваются трубы, что приводит к частым остановкам и трудоемкой очистке. При перегонке, соли и механические примеси накапливаются в остаточных нефтяных продуктах - мазутах, гудронах ухудшая их качества. Даже при небольшом содержании воды в нефти удорожается транспортировка ее по трубопроводам. При этом расходы растут не только за счет перекачки воды, но и за счет увеличения вязкости при образовании эмульсии.

Испытуемые нефтепродукт или нефть нагревают в колбе с холодильником в присутствии не смешивающегося с водой растворителя, который перегоняется вместе с водой, находящейся в образце. Конденсированный растворитель и вода постоянно разделяются в ловушке, причем вода остается в градуированном отсеке ловушки, а растворитель возвращается в дистилляционный сосуд. Исследуемый нефтешлам обладает высокой вязкостью, поэтому перед проведением анализа его предварительно нагрели до 50 °С.

Продолжительности перегонки составила 30 минут. Капли воды, оставшиеся на стенках холодильника, стаскивали в приемник-ловушку при помощи стеклянной палочки. В делительной воронке разделили воду и эфир, определили объем воды. Измерения проводили дважды, результаты измерений представили в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Результаты определения содержания воды
Water content results

Измерение	Масса навески, г	Объем воды, мл
Первое	50,01	14,00
Второе	50,00	14,00

В ходе работы определена массовая доля воды в нефтешламе $X_{ср} = 27,994 \%$; результат удовлетворяет условию приемлемости результатов.

Определение содержания хлористых солей.

Исследование проводили согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.28-02 «Методика выполнения измерений содержания хлоридов в твердых и жидких отходах производства и

потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях меркурометрическим методом». Метод основан на взаимодействии хлорид-ионов с ионами ртути (II) с образованием малодиссоциирующего соединения - хлорида ртути.

После окончания титрования избыток ионов ртути (II) образует с индикатором дифенилкарбазоном в кислой среде при $pH = (2,5 \pm 0,2)$ окрашенное в фиолетовый цвет комплексное соединение.

Неорганические хлориды щелочных и щелочноземельных металлов всегда присутствуют в пластовых флюидах, сопровождающих нефть, и извлекаются вместе с ней при добыче. При подготовке к транспортировке и переработке их содержание снижают до приемлемого уровня. Присутствие неорганических хлоридов в совокупности с влагой в трубе – негативный фактор, вызывающий медленную коррозию стенок труб. Из-за этого трубы требуют регулярной диагностики, ремонта и замены. При переработке нефти хлористые соли вредны как сами по себе (склонны к образованию твердых отложений), так и в производной форме: при их гидролизе в присутствии водорода и воды образуется хлористый водород (соляная кислота). Для борьбы с этой проблемой нефть перед переработкой тщательно обессоливают, а при перегонке добавляют нейтрализаторы хлористого водорода – щелочи и амины. Также присутствие хлоридов приводит к коррозии перегонной аппаратуры. Против коррозии используют смеси каустической и кальцинированной соды, но они ухудшают качество мазутов (повышается зольность).

Приготовили водную вытяжку, для чего к 100 граммам нефтешлама прилили 720 мл дистиллированной воды, перемешивали в течение 6 часов. Отфильтровали через обеззоленный фильтр «Белая лента». Отобрали 10 мл фильтрата в коническую колбу, прилили 90 мл дистиллированной воды, добавили 0,3 мл спиртового смешанного индикатора. Раствор приобрел синюю окраску. После этого по каплям добавляли раствор 12,6 процентной азотной кислоты до желтого окрашивания, дополнительно внесли избыток 1 мл раствора кислоты. Далее титровали раствором ртути азотнокислой (II) с молярной концентрацией 0,1 моль/л до перехода окраски исследуемой пробы в фиолетовый цвет. В качестве холостой пробы анализировали 100 мл дистиллированной воды. Выполнили два параллельных определения. На титрование холостой пробы израсходовано 0,1 мл, в первом измерении 0,8 мл, во втором – 0,8 мл.

В ходе работы определено содержание хлорид – иона в нефтешламе $X_{ср} = 1840 \pm 184,0$ мг/кг, результат удовлетворяет условию приемлемости результатов, представлен в виде доверительного интервала.

Полученные результаты исследований представлены в итоговой таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Состав нефтешлама
Oil sludge composition

Параметр	Итоговое значение
Массовая доля нефтепродуктов	46,0±14,7 %
Массовая доля механических примесей	26,0 %
Массовая доля воды	28,0 %
Содержание хлорид-иона	1840 ±184,0 мг/кг

Исследования условной вязкости нефтепродукта

Определение условной вязкости нефтешлама (в градусах Энглера, °E) проводилось в вискозиметре Энглера ВУ-М-ПХП, согласно ГОСТ 6258-85. Вязкость является важным эксплуатационным параметром, обуславливающим ход протекания различных технологических процессов на различных производствах, включая производство тепловой и электрической энергии. Увеличение вязкости может говорить об упрочняющем модифицировании материалов, увеличению энергозатрат, связанных с перекачкой, транспортировкой и распылом в форсуно-горелочных устройствах, что приводит к удорожанию транспортировки и хранения топлива и оказывает существенное влияние на работу основного и вспомогательного оборудования ТЭС и котельных, а также на объем выбрасываемых в атмосферу вредных веществ.

Метод определения заключается в измерении времени истечения из вискозиметра 200 см³ испытуемого нефтепродукта при температуре испытания 50-90 °С. Для каждой концентрации при заданной температуре измерялись три значения, и находилось их среднее арифметическое. Далее определялось отношение найденного среднего времени истечения к

времени истечения 200 мл дистиллированной воды при 20 °С. Результаты исследований условной вязкости образцов нефтешлама представлены на рис.1.

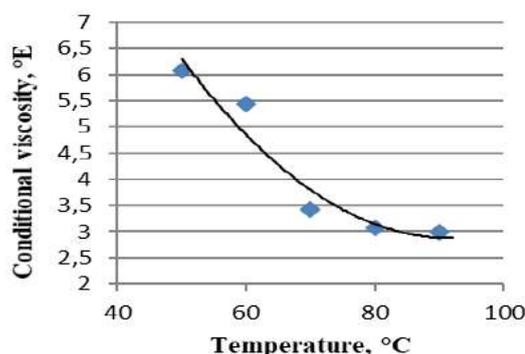


Рис. 1. Зависимость условной вязкости нефтешлама от температуры:

◆ – экспериментальные значения, линия – расчетная кривая: $y(x)=0,002x^2-0,3636x+19,523$ (1), $R^2=0,9366$

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig. 1. The dependence of the conditional viscosity of oil sludge on temperature:

◆ – experimental values, line – calculated curve: $y(x)=0,002x^2-0,3636x+19,523$ (1), $R^2=0,9366$

Проверка значимости расчетных уравнений определялась с помощью коэффициента детерминации R^2 . Так как $R \approx 1$, то между величинами имеется функциональная (детерминированная) связь. Сходимость экспериментальных данных и данных, полученных с помощью расчетных уравнений, оценивалась по доверительному интервалу Δ . Анализируя полученные данные, можно судить об адекватности полученных расчетных уравнений, описывающих динамику изменения показателей качества нефтешлама в зависимости от температуры [14-15].

Определение нижней рабочей теплоты сгорания нефтепродукта

Исследования нижней рабочей теплоты сгорания нефтешлама проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 21261-91. Метод определения заключается в полном сжигании массы испытуемого жидкого топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода и измерении количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива и вспомогательных веществ, а также при образовании водных растворов азотной и серной кислот в условиях испытания.

Исследования нижней рабочей теплоты сгорания нефтешлама Q , проведенное с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В, позволило определить значение $Q = 41,272$ МДж/кг. Отметим, что полученные значения нижней теплоты сгорания соответствуют теплоте сгорания мазута М100 Нижнекамского НПЗ.

Определение массовой доли серы в нефтепродукте

Определение массовой доли серы в исследуемом образце нефтешлама также проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 3877-88. Настоящий стандарт устанавливает метод определения массовой доли серы (не менее 0,1 %) в нефтепродуктах, включая смазочные масла с присадками, пластичные смазки, присадки. Сущность метода заключается в сжигании продукта в калориметрической бомбе в среде кислорода под давлением с последующим определением серы гравиметрически в виде сульфата бария.

Исследования содержания количества серы S в продуктах сгорания чистого нефтешлама, проведенное с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В, позволило определить значение $S = 0,20$ мас. %, что соответствует показателям низкосернистого топлива.

Заключение. Проведенные исследование показали, что отходы нефтяных шламов из резервуаров нефтехранилищ обладают рядом ценных свойств, и их можно использовать для получения ценных нефтепродуктов, дополнительной энергии при совместном сжигании с топливом. Наши исследования показали, что образцы изученного нефтешлама по своим свойствам очень близки к мазуту марки М100, что позволяет предполагать возможность

его использования как отдельного топлива или в смеси с топочным мазутом для судовых двигателей, паровых котлов и промышленных печей [15].

Литература

1. Крапивский Е.И. Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация: монография / Е.И. Крапивский // Москва: Инфра-Инженерия. 2021. 432 с.
2. Ахметов А.Ф. Методы утилизации нефтешламов различного происхождения // А.Ф. Ахметов, А.Р. Гайсина, И.А. Мустафин // Нефтегазовое дело. 2011. № 3. С. 98 – 101.
3. Шрам В.Г. Технология переработки нефтешлама / В.Г. Шрам, О.Н. Петров, А.Н. Сокольников, П.Э. Иванов, Д.В. Агровиченко // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. № 8(3). С. 121-125.
4. Хуснутдинов И.Ш. Методы утилизации нефтяных шламов / И.Ш. Хуснутдинов, А.Г. Сафиулина, Р.Р. Заббаров, С.И. Хуснутдинов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2015. Т.58 (10).С.3-20.
5. Медведев А.В. исследование возможности применения метода пиролиза для утилизации нефтяных отходов / А.В. Медведев // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 5 (24). 10 с.
6. Петровский Э.А. Современные технологии переработки нефтешламов / Э.А. Петровский, Е.А. Соловьёв, О.А. Коленчуков // Вестник БГТУ.2018.№4. С. 126-132.
7. Боранбаева А.Н., Серикбаева А.К., Иманбаев Е.И., Бусурманова А.Ч., Аккенжеева А.Ш. Снижение нагрузки на окружающую среду с утилизацией нефтешламов на дорожный битум // А.Н. Боранбаева, А.К. Серикбаева Е.И. Иманбаев, Е.И. Бусурманова, А.Ш. Аккенжеева // Экология промышленного производства. 2022. № 1 (117). С. 13-17.
8. Huseynova, L.V. The environmentally friendly technologies for oil sludge utilizing / L.V.Huseynova, M.A. Huseynova // Modern Science. 2018. № 3. С. 143-147.
9. Бурнашев Р.А. Оптимизация работы технологического процесса канализационно-очистных сооружений нефтеперерабатывающего завода для сокращения объемов хранения нефтешламов / Р.А. Бурнашев, Н.Н. Артемьева Ю.А. Максименко // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2017. № 2 (64). С. 16-20.
10. Казаков А.В. оптимизация процессов работы печи псевдосжиженного слоя при термическом обезвреживании нефте- и бишламов // АВ. Казаков, Н.А. Марцулевич // Естественные и технические науки. 2023. № 3 (178). С. 270-275.
11. Cheng W. Исследование характеристик диспергированного нефтесодержащего шлама и его тампонирующих свойств / W. Cheng, Zh.Liguo, Zh.Wei, H. Xiaodong, W.Qiuxia, W.Hongyu // Нефтехимия. 2022. Т. 62. № 6. С. 870-883.
12. Umereshova S.G. Analysis of the properties of ground concretes using oil sludges / S.G. Umereshova, A.B. Shinguzhieva, K.R. Tukhbatullin // Science and Education. 2022. № 1-2 (66). С. 201-204.
13. Гришин Р.С. Рассмотрение путей решения проблем накопления и переработки нефтешламов / Р.С. Гришин, Е.А. Андреева.// Тенденции развития науки и образования. 2022. № 91-7. С. 24-27.
14. Вахрушева Н.Д. использование вихревых технологий для утилизации нефтесодержащих отходов / Н.Д. Вахрушева, И.Н. Мусихин, И.Г. Поспелова В.Н. Кузьмин, О.Н. Барданова // Управление техносферой. 2022. Т. 5. № 4. С. 423-434.
15. Зверева Э.Р. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива / Э.Р. Зверева А.О. Макарова, Ю.В. Бахтиярова, В.И. Королев, Н.П. Ильин А.Н. Туранов, О.С. Зуева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 16-28.

Авторы публикации

Зверева Эльвира Рафиковна, доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета.

Эминов Абдысердар Абдылменатович, аспирант Казанского государственного энергетического университета.

Зверев Леонид Олегович, студент Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

Липатов Дмитрий Владимирович, аспирант Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Krapivsky E.I. Oil sludge: destruction, disposal, decontamination: monograph / E.I. Krapivsky. Moscow: Infra-Engineering. 2021. 432 p.
2. Akhmetov A.F., Gaisina A.R., Mustafin I.A. Methods of utilization of oil sludge of various origin. *Oil and gas business*. 2011;3:98-101.
3. Shram V.G., Shram V.G., Petrov O.N., Sokolnikov A.N., Ivanov P.E., Agrovichenko D.V. Technology of oil sludge processing. *Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology*. 2018; 8(3): 121-125.
4. Khusnutdinov I.Sh. Safiullina A.G., Zabbarov R.R., Khusnutdinov S.I. Methods of oil sludge utilization. *Izvestia of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2015; 58 (10): 3-20.
5. Medvedev A.V. Investigation of the possibility of using the pyrolysis method for the disposal of oil waste. *Online journal of Science Studies*. 2014; 5 (24): 10.
6. Petrovsky E.A., Solovyov E.A., Kolenchukov O.A. Modern technologies of oil sludge processing. *Bulletin of BSTU*. 2018; 4: 126-132.
7. Boranbayeva A.N., Serikbayeva A.K., Imanbayev E.I., Busurmanova A.Ch., Akkenzheeva A.Sh. Reducing the load on the environment environment with the disposal of oil sludge on road bitumen. *Ecology of industrial production*. 2022; 1 (117): 13-17.
8. Huseynova L.V., Huseynova M.A. The environmentally friendly technologies for oil sludge utilizing. *Modern Science*. 2018; 3: 143-147.
9. Burnashev R.A., Artemyeva N.N., Maksimenko Yu.A. Optimization of the technological process of sewage treatment plants of an oil refinery to reduce the volume of oil sludge storage. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University*. 2017; 2 (64): 16-20.
10. Kazakov A.V., Martsulevich N.A. Optimization of the processes of operation of the pseudo-liquefied layer furnace during thermal neutralization of oil and bio-sludge. *Natural and technical sciences*. 2023;3 (178): 270-275.
11. Cheng W., Liguozh., Wei Zh., Xiaodong H., Qiuxia W., Hongyu W. Investigation of the characteristics of dispersed oil-containing sludge and its tamponing properties. *Petrochemistry*. 2022; 62 (6): 870-883.
12. Umereshova S.G., Shinguzhieva A.B., Tukhbatullin K.R. Analysis of the properties of ground concretes using oil sludges. *Science and Education*. 2022;1-2 (66): 201-204.
13. Grishin R.S., Andreeva E.A. Consideration of ways to solve the problems of accumulation and processing of oil sludge. *Trends in the development of science and education*. 2022; 91-7: 24-27.
14. Vakhrusheva N.D., Musikhin I.N., Pospelova I.G., Kuzmin V.N., Bardanova O.N. The use of vortex technologies for the disposal of oily waste. *Management of the technosphere*. 2022; 5(4): 423-434.
15. Zvereva E.R., Makarova A.O., Bakhtiyarova Yu.V., Korolev V.I., Ilyin N.P., Turanov A.N., Zueva O.S. Secondary use of low-sulfur oil residues as a basis for boiler and ship fuel. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2022; 24(1):16-28.

Authors of the publication

Elvira R. Zvereva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering Ecology and Occupational Safety of Kazan State Energy University (KSEU).

Abdyserdar A. Eminov – postgraduate student of Kazan State Energy University (KSEU).

Leonid O. Zverev – student of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (SPBGUPTD).

Dmitry V. Lipatov – postgraduate student of Kazan State Power Engineering University (KSEU).

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено ***22.05.2023г.***

Отредактировано ***05.06.2023г.***

Принято ***09.06.2023г.***

УДК 621.57

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОБУСА ПРИ РАБОТЕ В ХОЛОДНОЕ ВРЕМЯ ГОДА

Ермаков А.М., Салахов Р.Р., Хисматуллин Р.М., Мелихов М.К.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия

amermakov@kai.ru, rrsalakhov@kai.ru, rmkhismatullin@kai.ru, melikhovmk@stud.kai.ru

Резюме: В статье предложены пути повышения эффективности климатических установок при работе в холодное время года. **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Увеличение пробега электробуса на одном заряде батареи является основной задачей при создании электробусов. Также, при разработке электробуса накладываются требования по обеспечению микроклимата в салоне электробуса. Климатическая установка электробуса в зависимости от климатических условий может потреблять значительное количество электроэнергии, уменьшая пробег электробуса. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть основные методы повышения эффективности климатических установок и оценить перспективность их применения. **МЕТОДЫ.** Одномерное численное моделирование климатических установок на платформе мультифизического моделирования сложных технических систем и анализа процессов в многодисциплинарных системах Simcenter Amesim с учетом характеристик применяющегося оборудования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны одномерные модели климатической установки и представлены результаты численного моделирования климатической системы электробуса в холодное время года, которые показывают, что наибольшую теплопроизводительность показывают фреоны R404a (14,1 кВт), R410a (20,5 кВт) и R507a (14,9 кВт). Применение рекуперативного теплообменного аппарата позволяет поднять эффективность термодинамического цикла парокомпрессионной установки на 11%. Применение объединенной системы терморегулирования позволяет поднять коэффициент преобразования до 3,15. **ВЫВОДЫ.** Все рассмотренные методы повышения позволяют повысить эффективность климатической установки в холодное время года, наиболее перспективным является совместное применение методов в одной климатической установке.

Ключевые слова: электробус; отопление; парокомпрессионная холодильная машина; HVAC.

Благодарности: «Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00373, <https://rscf.ru/project/22-19-00373/>».

Для цитирования: Ермаков А.М, Салахов Р.Р., Хисматуллин Р.М., Мелихов М.К. Пути повышения эффективности работы климатических установок электробуса при работе в холодное время года // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.15. №2(58). С.68-77.

WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF ELECTRIC BUS CLIMATE INSTALLATIONS WHEN OPERATING IN THE COLD SEASON

AM. Ermakov, RR. Salakhov, RM. Hismatullin, MK. Melikhov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan,
Russia

amermakov@kai.ru, rrsalakhov@kai.ru, rmkhismatullin@kai.ru, melikhovmk@stud.kai.ru

Abstract: The article suggests ways to improve the efficiency of climate control systems when working in the cold season. **RELEVANCE.** Increasing the mileage of an electric bus on a single battery charge is the main task when creating electric buses. Also, when developing an electric

bus, requirements are imposed to ensure a microclimate in the cabin of an electric bus. The climate control system of an electric bus, depending on climatic conditions, can consume a significant amount of electricity, reducing the mileage of the electric bus. THE PURPOSE. To consider the main methods of increasing the efficiency of climate installations and to assess the prospects of their application. METHODS. One-dimensional numerical simulation of climate installations on the platform of multiphysical modeling of complex technical systems and process analysis in multidisciplinary Simcenter Amesim systems, taking into account the characteristics of the equipment used. RESULTS. One-dimensional models of the climate system have been developed and the results of numerical simulation of the climate system of an electric bus in the cold season are presented, which show that the greatest heating capacity is shown by freons R404a (14.1 kW), R410a (20.5) and R507a (14.9). The use of a regenerative heat exchanger makes it possible to increase the efficiency of the thermodynamic cycle of the steam compression unit by 11%. The use of a combined temperature control system allows you to raise the conversion factor to 3.15. CONCLUSIONS. All the considered methods of enhancement make it possible to increase the efficiency of the climate system in the cold season, the most promising is the joint application of methods in one climate system.

Keywords: *electric bus; heating; steam compression refrigerating machine; HVAC.*

Acknowledgment: «The research was carried out due to a grant from the Russian Scientific Fund 22-19-00373, <https://rscf.ru/project/22-19-00373/>».

For citation: Ermakov AM, Salakhov RR, Hismatullin RM., Melikhov MK. Ways to improve the efficiency of the operation of electric bus climate control units when working in the cold season .. 2023;15:2(58):68-77.

Введение (Introduction)

На данный момент идет бурный рост рынка электробусов во всем мире. По данным агентства Reportlinker число электробусов вырастет на 43,1% к 2027 году и будет составлять 671 285 шт. Основными производителями электробусов являются BYD (Китай), Yutong (Китай), Proterra (США), CAF (Solaris) (Испания), VDL Groep (Нидерланды) и АВ Volvo (Швеция). [1]. Рост количества электротранспорта также наблюдается с в странах СНГ [2], так например в Республике Беларусь в г. Минск к 2025 году планируется заменить 35% городского пассажирского электротранспорта. В России также идет активное внедрение электробусов в крупных городах, и несмотря на высокую стоимость электробусов темпы роста электробусов не снижаются [3], но пока основная часть электробусов эксплуатируется в г. Москва.

Литературный обзор (Literature Review)

Общий подход к разработке и предварительным исследованиям изложен в работе [4], где приведены основные требования к температуре в салоне электробуса в зависимости от температуры окружающего воздуха, определена примерная мощность климатической установки (около 24 кВт), мощность, потребляемая её компрессором (5 кВт) и требуемая мощность на охлаждение электрооборудования (4 кВт). Приведены подходы к исследованиям при работе в нестационарных циклах и тепловым балансам салона электробуса. Но в данной работе не представлены результаты исследований по представленной методике. Из этой работы видно, что основной проблемой при эксплуатации в холодное время года является дополнительное потребление электроэнергии на обогрев салона, как и в работе [5].

В связи с этим становится актуальной проблема обогрева салона электробуса в холодное время года. Производители электробусов идут по пути отказа от дополнительных систем обогрева на жидком топливе и газе и переходят на производство тепла только за счет электроэнергии. Существует несколько вариантов обогрева салона: электронагреватели, инфракрасные обогреватели, перевод климатической установки в режим теплового насоса, которые уже успешно применяются при утилизации низкопотенциального тепла [6] и показывают коэффициент преобразования от 3 до 5. Так как в электробусах при эксплуатации в летний период для поддержания комфортной температуры в салоне используется холодильная парокомпрессионная установка, то наиболее логичным видится перевод её в режим теплового насоса для обогрева салона, с

получением тепловой энергии 3-5 кВт на один кВт затраченной электрической мощности.

По данному пути развития идут основные производители электробусов. Так, например, компания *Guchen* (Китай) производит крышные климатические установки для электробусов *YUTONG*, которые имеют холодопроизводительность 32 кВт и теплопроизводительность 30 кВт, при максимальной потребляемой мощности 10 кВт, что говорит о холодильном коэффициенте 3,2 и коэффициенте преобразования 3,0, но производителем не указаны температурные условия, при которых получается эти характеристики [7]. Другой компанией *Valeo* (Германия) производятся климатические установки *Revo-E* крышного типа [8], которые используются в электробусах *Man Lion's city E*, *BYD ADL Enviro200EV*, *Volvo 7900 Electric u Solaris Urbino 12*, также использован данный подход, а заявленная холодопроизводительность составляет 30 кВт, теплопроизводительность 40 кВт, при 13 кВт максимальной потребляемой электрической мощности. Температурный диапазон работы климатической установки также не указан. ПАО «КАМАЗ» также использует климатическую систему, работающую как в режиме кондиционирования, так и режиме «теплого насоса» в электробусе КАМАЗ - 6282 [9].

В работе [10] приведены экспериментальные данные, которые показывают значительное увеличение энергопотребления в холодный период. В летний период потребление в основном не превышает 1 кВт*ч/км, когда при отрицательных температурах в среднем идет потребление на уровне 2-3 кВт*ч/км. Также увеличение энергопотребления с понижением температуры воздуха показано и в работе [11], где приведено исследование потребления энергии 17 электробусов при работе за 4 года (с 2018 по 2021 г.) с общим пробегом более 1,5 млн. км., использующихся в г. Братислава (Словакия). Особенностью является то, что температура окружающего воздуха не опускалась ниже -15 °С в холодное время года и не поднималась выше 25 °С летом. Удельное электропотребление в зимний период составляет около 4 кВт*ч/км, при условии использования электрического нагревателя, а летом составляет 2,5 кВт*ч/км. В работе [12] проведено экспериментальное исследование эффективности климатической установки электробуса на рабочих телах R134a и R744. При использовании в качестве рабочего тела фреона R134a холодильный коэффициент снижается от 5,6 до 2,3 при повышении температуры окружающего воздуха с 15 °С до 30 °С, а коэффициент преобразования снижается с 3,21 до 1,8 при снижении температуры с -5 °С до -15 °С. При использовании фреона R744 холодильный коэффициент в тех же условиях снижается с 4,4 до 1,75, а коэффициент преобразования повышается с 2,65 до 2,79. В работе [13] представлены результаты экспериментальных исследований потребления электробусом *Solaris Urbino 12e* в течении года в г. Клуж (Румыния) минимальное энергопотребление составило 1,07 кВт*ч/км при среднемесячной температуре окружающего воздуха 18,6 °С (сентябрь), а максимальное 1,9 кВт*ч/км при среднемесячной температуре окружающего воздуха минус 8 °С (январь). Таким образом можно сделать вывод, что эффективность климатической установки зависит от температуры окружающего воздуха и с понижением температуры увеличивается, при чем энергопотребление в зимний период больше, чем в летний. Также видно, что рассматривается энергопотребление до минус 15 °С, чего явно недостаточно для российских условий эксплуатации.

Научная значимость заключается в том, что углубляются данные по методам повышения эффективности парокомпрессионных климатических установок электробусов и проводится их количественная оценка, а практическая – в снижении затрат электроэнергии при эксплуатации климатических установок электробусов и расширении температурного диапазона их использования в холодное время года.

Материалы и методы (Materials and methods)

Основными методами исследования и прогнозирования потребления при работе климатических установок на данный момент является одномерное численное моделирование. Для чего могут быть использованы различные программные продукты. Так, например, в работе [14] использован пакет *Simulink ПО Matlab*. Недостатком данного метода является сложность моделирования теплогидравлических систем с учетом реальных характеристик теплообменного оборудования.

В данной работе для исследования климатической системы электробуса использована платформа мультифизического моделирования сложных технических систем *Simcenter Amesim*. Создана одномерная модель с учетом характеристик подобранного оборудования (Рис. 1). В модель внесены следующие характеристики: объем компрессора составляет 474 см³, его производительность зависит от частоты вращения, для зимнего режима работы задана 1750 об/мин; в конденсаторе задано проходное сечение 14900 мм², эквивалентный диаметр 10 мм и характерная длина 760 мм

для расчета гидравлического сопротивления; объем конденсатосборника задан 1,5 л; в терморегулируем вентиле задано максимальное открытие проходного сечения 8 мм², при максимальном перемещении штока 0,8 мм, внесена в табличном виде зависимость давления фреона на линии насыщения от температуры $p = f(T)$; в испарителе задана площадь проходного сечения 4830 мм².



Рис. 1. Одномерная модель парокompрессионной климатической установки

Fig. 1. One-dimensional model of a vapour compression climate system

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для оценки достоверности работоспособности модели проведена верификация в режиме теплового насоса по экспериментальным данным [15] на фреоне R407c (Рис.2). Погрешность моделирования на всех режимах не превышает 2%.

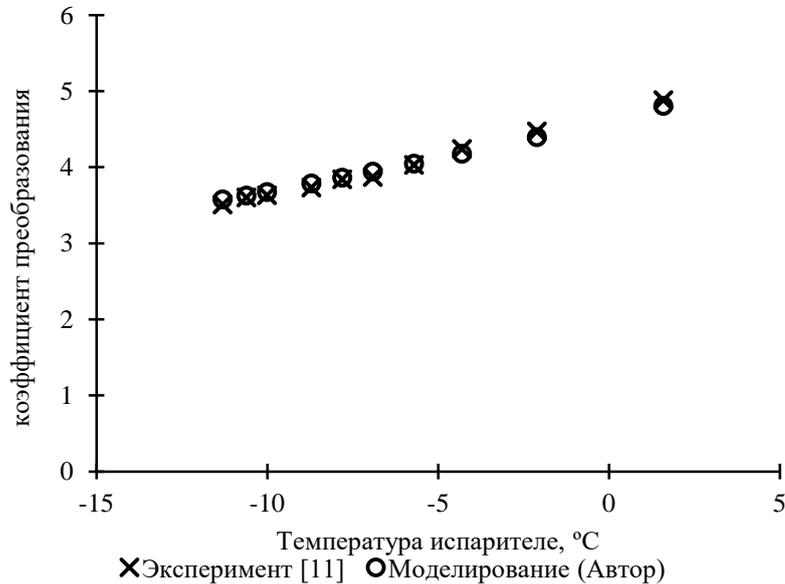


Рис. 2. Верификация модели парокompрессионной климатической установки

Fig. 1. Verification of the model of the vapor compression climate system

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты (Results)

В качестве путей повышения эффективности климатической установки в холодный период рассмотрим следующие:

- выбор наиболее подходящего рабочего тела;
- применение регенеративного теплообменного аппарата, для повышения эффективности термодинамического цикла парокompрессионной машины;
- использование объединенной системы терморегулирования.

Первым направлением является выбор рабочего тела парокомпрессионной установки для работы в режиме теплового насоса в холодное время года.

Сначала проанализируем результаты работы климатической установки в режиме кондиционирования (Таблица 1). При существующем оборудовании фреоны R404a, R407c, R410a, R507a и R744 позволяют добиться требуемой холодопроизводительности в 30 кВт.

Таблица 1

Table 1

Результаты моделирования работы климатической установки в теплое время года на различных фреонах

The results of modeling the performance of the climate system in the warm season on various freons

Фреон	$t_{гор.}, ^\circ C$	$t_{хол.}, ^\circ C$	n , об/мин	N_k , Вт	$Q_{исп.}$, Вт	$Q_{конд.}$, Вт	ε
R134a	40	15	1450	5 432	22 337	27 316	4,11
R290	40	15	1450	7 143	27 138	33 932	3,80
R404a	40	15	1450	8 346	32 806	40 737	3,93
R407c	40	15	1450	10 416	30 177	40 019	2,90
R410a	40	15	1450	12 044	43 294	54 676	3,59
R507a	40	15	1450	8 496	32 707	40 753	3,85
R600a	40	15	1450	2 836	13 017	15 156	4,59
R744	40	15	600	24 277	47 771	71 199	1,97
R1234yf	40	15	1450	4 849	21 061	25 638	4,34

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

При этом стоит отметить, что коэффициент преобразования фреона R744, применяющегося в европейских странах ниже 2, что связано с работой в транскритическом цикле. Второй фреон активно распространенный в европейских странах R407c имеет коэффициент преобразования ниже 3, а наиболее распространенный фреон в системах автомобильных кондиционеров имеет хороший коэффициент преобразования, но не позволяет достичь требуемой холодильной мощности. Исходя из результатов моделирования видно, что у фреонов R404a, R410a и R507a коэффициент преобразования больше 3,5.

Далее рассмотрим результаты моделирования в холодное время при работе в режиме теплового насоса (Таблица 2). Результаты моделирования показывают существенное падение теплопроизводительности по сравнению с летним периодом (это связано с увеличением разницы температур испарения и конденсации). Также снизился и коэффициент преобразования. Наиболее распространенный фреон R134a не позволяет вырабатывать достаточного количества тепла для обогрева салона и больше подходит для стран с мягким климатом.

Таблица 2

Table 2

Результаты моделирования работы климатической установки в холодное время года на различных фреонах

The results of modeling the performance of the climate system in the cold season on various freons

Фреон	$t_{гор.}, ^\circ C$	$t_{хол.}, ^\circ C$	N_k , Вт	$Q_{исп.}$, Вт	$Q_{конд.}$, Вт	μ
R134a	20	-30	2 074	4 340	5 749	2,77
R290	20	-30	4 435	7 844	11 993	2,70
R404a	20	-30	5 017	9 734	14 131	2,82
R407c	20	-30	4 378	8 428	11 870	2,71
R410a	20	-30	7 269	14 644	20 544	2,83
R507a	20	-30	5 187	10 455	14 952	2,88
R600a	20	-30	1 142	2 781	3 428	3,00
R1234yf	20	-30	2 519	5 243	7 236	2,87

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

теплопроизводительность показали фреоны R404a (14,1 кВт), R410a (20,5 кВт) и R507a (14,9 кВт), при этом коэффициенты преобразования составляют 2,82-2,88. Остальные фреоны не подходят для работы в режиме теплового насоса при данном оборудовании.

Наиболее перспективными телами для всесезонной работы климатической установки являются R404a, R410a и R507a.

Вторым направлением является повышение термодинамического цикла холодильной машины за счет использования теплообменника рекуператора (Internal Heat Exchanger). Для климатической установки использован рекуператор по типу труба в трубе из медной трубы. Диаметры по жидкой и газообразной стороне подобраны таким образом, что по жидкому фреону не превышает 1 м/с, а по газообразному 15 м/с. Длина рекуператора варьировалась для определения влияния на эффективность климатической установки. В одномерную модель внесены по жидкому фреону площадь проходного сечения 148 мм², площадь поверхности 0,196 м², эквивалентный диаметр 3,31 мм; по газообразному фреону площадь поперечного сечения 490 мм², диаметр 25 мм. (Рис. 3). Таким образом, эффективность климатической установки определяется с учетом дополнительных гидравлических потерь на рекуператоре как по жидкому, так и газообразному контуру.

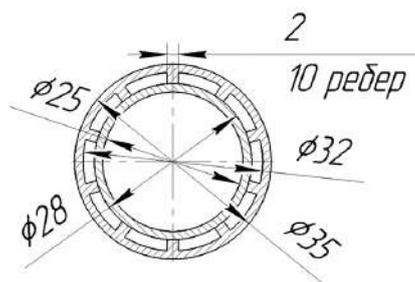
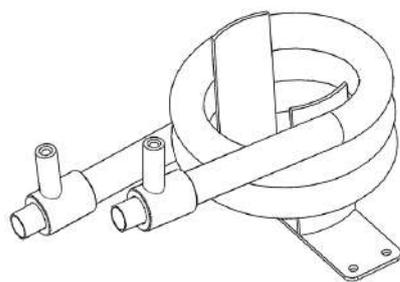


Рис. 3. Теплообменник рекуператор климатической установки

Fig. 3. Air conditioner internal heat exchanger

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты моделирования на фреоне R410a с оборудованием под целевую мощность обогрева 20 кВт (Таблица 2) показывают прирост тепловой мощности составляет 1,7 кВт, а повышение коэффициента преобразования достигает 11% и его значение приближается к 3, что позволяет полностью обогревать салон электробуса без дополнительных электрических нагревателей.

Таблица 3
Table 3

Результаты моделирования при различной длине рекуператора
Model results for different recuperator lengths

Длина рекуператора, мм	N_k , Вт	$Q_{исп.}$, Вт	$Q_{конд.}$, Вт	$Q_{ИHX.}$, Вт	μ
500	7 939	13 295	20 769	610	2,69
1000	7 987	13 700	21 184	1 033	2,78
1500	8 019	14 003	21 484	1 343	2,85
2000	8 001	14 292	21 658	1 567	2,9
2500	7 860	14 643	21 645	1 714	2,97

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Также положительным моментом является небольшое снижение мощности компрессора при увеличении длины теплообменника рекуператора.

Третьим направлением является объединение систем охлаждения электродвигателей и кондиционирования салона в одну систему терморегулирования. По данному направлению движется Mercedes-Benz со своим электробусом e-Citaro, климатическая установка которого работает на R744.

Подходом для оценки эффективности работы систем электробусов является использование транзитных циклов, имитирующих поездку автобуса по маршруту. Для городских автобусов в мире используется нестационарный цикл Брауншвейга [16]. Скорость автобуса в цикле Брауншвейга представлена на Рис.4. Данный цикл

характеризуется частыми остановками и разгонами.

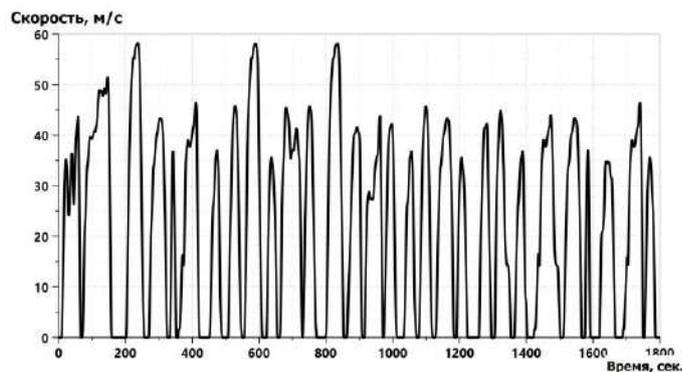


Рис. 4. Скорость электробуса в транзитном цикле Braunschweig*[16]

Fig. 4. Electric bus speed in the Braunschweig transient cycle*[16]

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Авторами создана система терморегулирования, которая включает в себя модель салона электробуса, с учетом тепловых потерь при движении электробуса, парокompрессионную установку, жидкостный контур охлаждения батарей, электродвигателя и инверторов при работе в режиме теплового насоса подключен к конденсатору парокompрессионной установки. Тепловыделение в электрических компонентах пропорционально нагрузочной характеристике транзитного цикла Брауншвейга.

Преимуществами объединенной системы терморегулирования является то, что тепловыделение от парокompрессионной установки и электрических компонентов передается в жидкостный контур, который осуществляет обогрев салона, что позволяет работать парокompрессионной установке с большей эффективностью.

Моделирование имитирует работу систем электробуса после предварительной подготовки и прогрева до +18 °С. Температура окружающей среды задана -25 °С. Результаты моделирования представлены на Рис. 5 и Рис. 6.

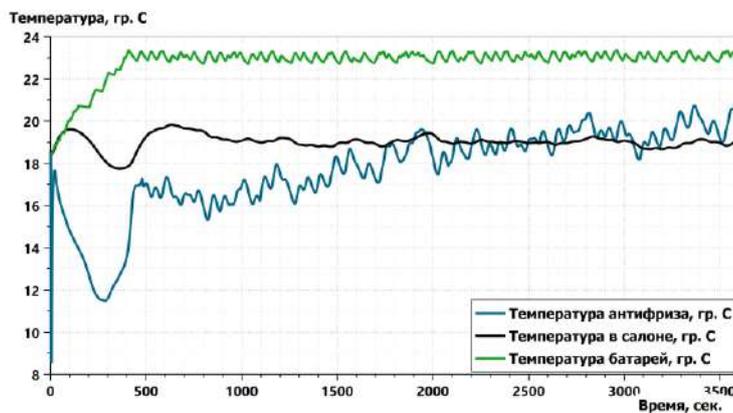


Рис. 5. Температура в салоне, антифриза и батарей

Fig. 5. Saloon, antifreeze and batteries temperatures

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для оптимальной работы силовых агрегатов температура батарей должна поддерживаться в диапазоне 20 – 25 °С и в ней применен отдельный ПИД-регулятор. Несмотря на резко меняющуюся скорость температура в салоне меняется плавно и поддерживается в районе 19 °С и после установления заданной температуры батарей меняется незначительно.

Также из Рис. 6. можно оценить работу компрессора климатической установки, среднее значение потребляемой мощности за цикл составляет 1,8 кВт, а пиковая мощность составляет 4,3 кВт. Коэффициент преобразования климатической установки после выхода на режим практически не меняется и после 500 секунд работы не опускается ниже 3, что

является хорошим значением и на существующих электробусах не Достигается и при

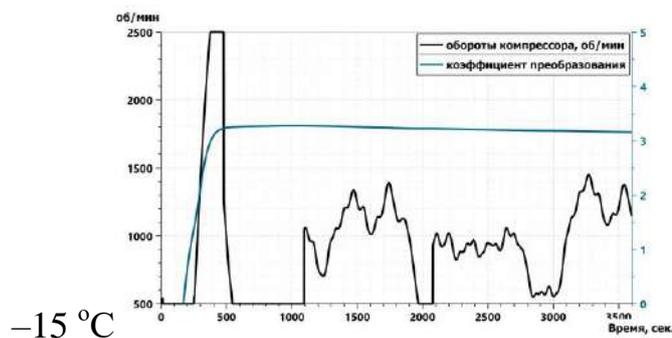


Рис. 6. Обороты компрессора и коэффициент преобразования

Fig. 6. Compressor speed and coefficient of performance

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Дальнейшее направление повышения эффективности климатических установок можно реализовывать за счет алгоритмов управления, стратегий совместной работы систем электробуса и утилизации теплоты воздуха, исходящего из салона. Используя систему терморегулирования с использованием тепловыделения от электрооборудования коэффициент преобразования увеличился до 3,15.

Заключение (Conclusions)

Проведен анализ существующих путей повышения эффективности работы климатической установки в холодное время года. Определено, что существующие климатические системы спроектированы для более мягкого климата и температуры эксплуатации не ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По сравнению с рассмотренными источниками проведено моделирование для более низких температур, характерных для территории России и подобраны наиболее подходящие рабочие тела для круглогодичной работы климатической установки и показывающие достаточную теплопроизводительность в режиме обогрева – фреоны R404a (14,1 кВт), R410a (20,5 кВт) и R507a (14,9 кВт), при этом коэффициенты преобразования составляют 2,82-2,88.

Проведено моделирование при изменении длины рекуператора при работе в режиме обогрева, определено, что применение рекуператора позволяет повысить термодинамическую эффективность цикла парокомпрессионной установки на 11%, а коэффициент преобразования при этом достигает значения 2,97.

Разработана система терморегулирования, которая объединяет в контур теростатирования электрооборудования и климатическую систему. Проведено моделирование работы системы терморегулирования в нестационарном цикле Брауншвейга в режиме обогрева при температуре окружающей среды $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Применение системы терморегулирования позволяет повысить коэффициент преобразования климатической установки до 3,15, что позволяет использовать климатическую систему круглый год с достаточной эффективностью в российских климатических условиях.

Литература

1. Electric Bus Market - Global Forecast to 2027. [Электронный ресурс] https://www.reportlinker.com/p05835369/Electric-Bus-Market-by-Propulsion-Type-Application-Consumer-Segment-Range-Length-of-Bus-Power-Output-Battery-Capacity-Component-And-Region-Global-Forecast-to.html?utm_source=GNW (дата обращения: 01.03.23).
2. Александрович С.А., Зорина Т.Г. Прогнозирование потребности в электроэнергии на работу электротранспорта в Республике Беларусь на период до 2030 года // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 4(56). С. 156-167.
3. Фасхиев Х. А. Электромобилизация в Российской Федерации // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2020. Т. 19. № 3. С. 133-142.
4. Göhlich D., Fay T. A., Jefferies D., Lauth, Kunith A., Zhang X. Design of urban electric bus systems // Design Science. 2018. V. 4. p. 28.
5. Маликов Р. Р., Биксалеев Р. Ш., Карпухин К. Е., Климов А. В. Влияние

работы климатической системы на удельный расход энергии электробуса категории М3 // Труды НАМИ. 2022. 1(288). С. 68-81.

6. Накоряков В. Е., Елистратов С. Л. Передовые схемные решения теплонасосных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. № 11-12. С. 64-75.

7. Guchen Electric Bus Air Conditioner [Электронный ресурс] <https://www.guchen.com/all-electric-bus-ac/es-06-electric-bus-air-conditioner.html> (дата обращения: 01.03.23).

8. REVO-E rooftop unit [Электронный ресурс] https://www.valeo-thermalbus.com/eu_en/Products/Air-Conditioning/Buses-over-12-m/REVO-E (дата обращения: 01.03.23).

9. Гарипов С.Г., Казаков А.В. Особенности конструкции электробуса КАМАЗ-6282 и условия его эксплуатации // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 3 (89). С. 51-57.

10. Hjelkrem O. A., Lervåg K. Y., Babri S., Lu C., Södersten C. J. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021. 94. 102804.

11. Čulík, K.; Štefancová, V.; Hrudkay, K.; Morgoš, J. Interior Heating and Its Influence on Electric Bus Consumption // Energies 2021, 14, 8346. <https://doi.org/10.3390/en14248346>.

12. Wang Y., Dong J., Jia S., Huang L., Experimental comparison of R744 and R134a heat pump systems for electric vehicle application // International Journal of Refrigeration. 2021. V. 121. Pages 10-22.

13. Iclodean C., Cordoş N., Todoruţ A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions // Energies. 2019. 12(23). 4535.

14. Афанасьев А. Ю., Рыбушкин Н. А., Килиманов К. А. Моделирование и оптимизация по энергопотреблению гибридной силовой установки для транспортного средства // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 11-12. С. 133-143.

15. Byrne P., Miriel J., Lenat Y. Experimental study of an air-source heat pump for simultaneous heating and cooling – Part 1: Basic concepts and performance verification // Applied Energy. 2011. V. 88, Issue 5. Pages 1841-1847.

16. Braunschweig City Driving Cycle [Электронный ресурс] <https://dieselnet.com/standards/cycles/braunschweig.php> (дата обращения: 01.03.23)

Авторы публикации:

Ермаков Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

Салахов Ришат Ризович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

Хисматуллин Ренат Мансорович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

Мелихов Матвей Константинович – студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

References

1. *Electric Bus Market - Global Forecast to 2027*. [Electronic resource] https://www.reportlinker.com/p05835369/Electric-Bus-Market-by-Propulsion-Type-Application-Consumer-Segment-Range-Length-of-Bus-Power-Output-Battery-Capacity-Component-And-Region-Global-Forecast-to.html?utm_source=GNW (date of application: 01.03.23)

2. Aleksandrovich SA, Zorina TG. Prognozirovanie potrebnosti v elektroenergii na rabotu elektrottransporta v Respublike Belarus' na period do 2030 goda. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14:4(56):156-167.

3. Faskhiev KhA. Elektromobilizatsiya v Rossiiskoi Federatsii. *AvtoGazoZapravochnyi kompleks + Al'ternativnoe toplivo*. 2020; 19(3):133-142.

4. Göhlich D, Fay TA, Jefferies D, Kunith A, Zhang X. *Design of urban electric bus systems. Design Science.* 2018; 4:28.
5. Malikov RR, Biksaleev RSh, Karpukhin KE, Klimov AV. Vliyanie raboty klimaticheskoi sistemy na udel'nyi raskhod energii elektrobusa kategorii M3. *Trudy NAMI.* 2022; 1(288):68-81.
6. Nakoryakov VE, Elistratov SL. Peredovye skhemnye resheniya teplonasnykh ustanovok. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki.* 2007; 11-12:64-75.
7. Guchen Electric Bus Air Conditioner [Electronic resource] <https://www.guchen.com/all-electric-bus-ac/es-06-electric-bus-air-conditioner.html> (date of application: 01.03.23).
8. REVO-E rooftop unit [Electronic resource] https://www.valeo-thermalbus.com/eu_en/Products/Air-Conditioning/Buses-over-12-m/REVO-E (date of application: 01.03.23).
9. Garipov SG, Kazakov AV. Osobennosti konstruksii elektrobusa KAMAZ-6282 i usloviya ego ekspluatatsii. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya.* 2021; 3(89): 51-57.
10. Hjelkrem OA, Lervåg KY, Babri S, Lu C, Södersten CJ. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment.* 2021; 94:102804.
11. Čulík K, Štefancová V, Hrudkay K, Morigoš J. Interior Heating and Its Influence on Electric Bus Consumption. *Energies.* 2021;14:8346.
12. Wang Y, Dong J, Jia S, Huang L. Experimental comparison of R744 and R134a heat pump systems for electric vehicle application. *International Journal of Refrigeration.* 2021; 121: 10-22.
13. Iclodean C, Cordoş N, Todoruţ A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies.* 2019; 12(23):4535.
14. Afanas'ev AYu, Rybushkin NA, Kilimanov KA. Modelirovanie i optimizatsiya po energopotrebleniyu gibridnoi silovoi ustanovki dlya transportnogo sredstva. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki.* 2018; 20(11-12):133-143.
15. Byrne P, Miriel J, Lenat Y. Experimental study of an air-source heat pump for simultaneous heating and cooling – Part 1: Basic concepts and performance verification. *Applied Energy.* 2011; 88(5):1841-1847.
16. Braunschweig City Driving Cycle [Electronic resource] <https://dieselnet.com/standards/cycles/braunschweig.php> (date of application: 01.03.23)

Authors of the publication

Andrey M. Ermakov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Rishat R. Salakhov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Renat M. Hismatullin – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Matvey K. Melikhov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (Технические науки)

Смежные шифры в рамках группы научной специальности: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (Технические науки)

Получено

Отредактировано

Принято

УДК 536.21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЕНОБЕТОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Соловьева О.В.^{1*}, Соловьев С.А.¹, Шакурова Р.З.¹, Сеницын А.А.²,
Закревская Л.В.³, Ананьев М.С.³.

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

³Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Резюме: Актуальность исследования заключается в том, что существует проблема высокого потребления энергии и топливно-энергетических ресурсов. Высокое энергопотребление во многом связано с потерей тепловой энергии через ограждающие конструкции зданий ввиду низкой теплоизоляционной способности строительных конструкций и материалов. Одним из решений данной проблемы является применение в строительстве композитных материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками, например, композитных пенобетонов. Свойства композитов изменяются в зависимости от материала наполнителя и его количества. **ЦЕЛЬ.** Исследовать влияние материала наполнителя и его распределения по объему на свойства композитных пенобетонов. В качестве исследуемых образцов выбраны пенобетоны с наполнителями в виде диатомитовых микросфер и костры конопли. **МЕТОДЫ.** Для исследования теплопроводности разработан экспериментальный стенд, работающий по методу стационарного теплового потока. Теплопроводность определяли из закона Фурье. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результаты исследований показали, что костробетон конопли имеет в целом меньшие значения теплопроводности во всём исследованном диапазоне температур, что связано с высоким содержанием наполнителя в данном образце. Пенобетоны с микросферами показали различные значения теплопроводности ввиду изменяемого распределения микросфер по объему. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Образцы композитного пенобетона, исследованные в данной работе, могут применяться в жилом строительстве с целью снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции.

Ключевые слова: пенобетон, композит, теплопроводность, микросферы, эксперимент.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

Для цитирования: Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З., Сеницын А.А., Закревская Л.В., Ананьев М.С. Экспериментальные исследования теплофизических свойств высокопористых композитных пенобетонов с различными наполнителями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2 (58). С.78-92.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HIGHLY POROUS COMPOSITE FOAM CONCRETE WITH DIFFERENT FILLERS

O.V. Soloveva^{1*}, S.A. Solovev¹, R.Z. Shakurova¹, A.A. Sinitin²
L.V. Zakrevskaya³, M.S. Ananiev³

¹Kazan State Power Engineering University

²Vologda State University

³Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Abstract: The relevance of the study lies in the fact that there is a problem of high energy consumption and high consumption of fuel and energy resources. High energy consumption is largely due to the loss of thermal energy through the building envelope due to the low thermal insulation capacity of building structures and materials. One of the solutions to this problem is the use in construction of composite materials with high thermal insulation characteristics, for example, composite foam concrete. The properties of composites vary depending on the type of filler and its quantity. **THE PURPOSE.** To investigate the influence of the type of filler and the distribution of the filler by volume on the properties of composite foam concrete. Foam concretes with fillers in the form of diatomite microspheres and hemp shives were chosen as the test samples. **METHODS.** To study the thermal conductivity, an experimental stand has been developed that operates according to the method of stationary heat flow. The thermal conductivity was determined from the Fourier law. **RESULTS.** The results of the research showed that hemp concrete has generally lower thermal conductivity values in the entire temperature range studied, which is associated with a high content of filler in this sample. Foam concrete with microspheres showed different values of thermal conductivity due to different distribution of microspheres by volume. **CONCLUSION.** Composite foam concrete samples studied in this work can be used in residential construction in order to reduce heat losses through building envelopes.

Keywords: foam concrete, composite, thermal conductivity, microspheres, experiment.

Acknowledgments: The research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 21-79-10406, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/>.

For citation: Soloveva OV, Solovev SA, Shakurova RZ, Sinitin AA, Zakrevskaya LV, Ananiev M.S. Experimental studies of the thermophysical properties of highly porous composite foam concrete with different fillers. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):78-92.

Введение (Introduction)

Снижение потребления энергоресурсов и повышение энергетической эффективности являются приоритетными задачами развития энергетики согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года¹. Жилищно-коммунальный сектор потребляет около 30-40% производимой тепловой и электрической энергии и обладает большим потенциалом энергосбережения [1]. В первую очередь, в ЖКХ наблюдается высокий расход тепловой энергии на поддержание оптимальных климатических условий в помещениях. Высокое энергопотребление связано с теплопотерями в окружающую среду ввиду несовершенства традиционной тепловой изоляции. Для улучшения теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций зданий применяют легкие пористые строительные материалы, такие как пенобетон. По сравнению с обычным бетоном, пенобетон имеет высокопористую структуру, относительно низкую плотность (400-1850 кг/м³), легкий вес и отличается хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами [2,3]. Пенобетон получают двумя способами: методом предварительно вспенивания, когда стабилизированная пена приготавливается отдельно и после добавляется в цементный раствор, или же методом вспенивания смеси, при котором раствор пенообразователя смешивают с цементным раствором в высокоскоростном смесителе. После отверждения смеси получается бетон с высокопористой структурой. Поры пенобетона заполнены воздухом, который является естественным теплоизолятором, благодаря чему теплопроводность значительно снижается по сравнению с обычным бетоном.

Теплоизоляционные свойства пористого материала во многом зависят от структуры, а именно: от пористости и размера пор [4-8]. Gołaszewski и др. [9] экспериментально исследовали теплопроводность пенобетонов различной плотности (180-460 кг/м³) и выяснили, что теплопроводность пенобетона повышается с 0,050 до 0,080 Вт/м·К с увеличением плотности. В работе [10] Ganesan и др. исследовали тепловые свойства образцов пенобетона с плотностями 700, 1000 и 1400 кг/м³.

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

Результаты исследований показали, что с увеличением плотности материала его пористость уменьшилась с 68 до 35%, в то время как теплопроводность увеличилась с 0,240 до 0,740 Вт/м·К. В работе [11] авторы исследовали механические свойства пенобетонов. Результаты исследований показали, что изменения в плотности более значительно влияют на механические свойства пенобетона, чем на тепловые: уменьшение плотности с 600 до 100 кг/м³ привело к снижению теплопроводности пенобетона с 0,2 до 0,04 Вт/м·К, т.е. в пять раз, в то время как прочность на сжатие уменьшилась более чем в десять раз: с 2,25 до 0,2 МПа.

На свойства пенобетона оказывает влияние и его пористость, которая представляет собой отношение объема, занимаемого воздухом, к общему объему пенобетонного блока, и выражается в процентах. В свою очередь, пористость пенобетона определяется количеством пенообразователя. Авторы работы [12] выяснили, что повышение концентрации пенообразователя с 1 до 2,5 % масс. приводит к снижению теплопроводности с 0,9 до 0,075 Вт/м·К. Прочность пенобетона также снижается: с 1,2 до 0,85 МПа. Зависимость теплопроводности пенобетона от пористости и размера пор исследовали в работе [13]. Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение пористости пенобетона с 70 до 83% приводит к снижению теплопроводности с 0,15 до 0,10 Вт/м·К. При увеличении размера пор с 0,350 до 0,450 мм теплопроводность пенобетона увеличивается с 0,097 до 0,118 Вт/м·К, в то время как прочность на сжатие уменьшается. Влияние размера пор на теплопроводность пенобетона также оценили Chen и др. [14]. Согласно результатам численных исследований, увеличение среднего диаметра пор с 0,125 до 1 мм способствовало повышению теплопроводности пенобетона с 0,152 до 0,268 Вт/м·К. Авторы объясняют это тем, что увеличение размера пор приводит к уменьшению их количества, что сокращает путь теплопередачи и усиливает эффект теплового моста.

Контроль структурных параметров позволит создавать пенобетон с требуемыми тепловыми и механическими характеристиками. Структура пенобетона зависит от водоцементного отношения и содержания пены. Согласно исследованиям, представленным в работе [15], увеличение водоцементного отношения с 0,37 до 0,47 приводит к увеличению пористости пенобетона с 82,3 до 86,28%, теплопроводность при этом уменьшается с 0,1007 до 0,0808 Вт/м·К, а прочность на сжатие снижается почти в два раза: с 0,451 до 0,277 МПа. Авторы также исследовали влияние содержания пены на свойства пенобетона. Увеличение количества пены с 10 до 50% привело к повышению пористости с 37,04 до 89,45%, теплопроводность и прочность на сжатие при этом уменьшаются с 0,1221 до 0,0647 Вт/м·К и с 1,965 до 0,338 МПа соответственно.

Для улучшения тепловых свойств в пенобетон добавляют различные примеси и наполнители в виде летучей золы, кремнезема, стеклянных полых микросфер и т.д. [16] Batool и др. [17] провели исследования теплопроводности пенобетонов при добавлении 10-20% летучей золы, кремнезема и метаксаолина. Результаты экспериментальных исследований показали, что добавки позволяют снизить теплопроводность пенобетона, при этом чем выше содержание добавок, тем ниже значение теплопроводности. Добавление кремнезема оказало наибольшее влияние на теплопроводность, которая снизилась с 0,24 до 0,20 Вт/м·К при содержании кремнезема 20%. Добавление метаксаолина в количестве 10% привело к небольшому снижению теплопроводности, а повышение содержания этой добавки до 20% привело к значительному повышению теплопроводности. Это связано с гидрофильностью каолина, а, как известно, высокое содержание влаги способствует повышению теплопроводности материала.

В работе [18] авторы исследовали влияние содержания перлита и песка из отходов стекла на свойства пенобетона. Результаты исследований показали, что увеличение содержания стеклянного песка с 30 до 70% позволяет повысить прочность на сжатие с 2,22 до 2,60 МПа и прочность на изгиб с 0,40 до 0,61 МПа. Кроме того, повышенное содержание песка в три раза снижает усадку пенобетона при высыхании. Увеличение содержания перлита с 30 до 70% приводит к снижению теплопроводности пенобетона с 0,44 до 0,30 Вт/м·К. Таким образом, высокое содержание песка из стекла приводит к улучшению прочности пенобетона, в то время как теплопроводность значительно увеличивается. Высокое содержание перлита, напротив, улучшает теплоизоляционные свойства пенобетона и негативно влияет на его прочностные характеристики.

Priyanka и др. [19] исследовали влияние гранул пенополистирола на тепловые и механические свойства пенобетона. Авторы варьировали содержание гранул от 0,5 до 1 % и сравнивали характеристики полученных образцов пенобетона и контрольного образца, не содержащего пенополистирол. Результаты исследований показали, что

прочность на изгиб снижается с 400 МПа для контрольного образца до 200 МПа для пенобетона с 1% пенополистирола. Теплопроводность также уменьшается с 0,15 до 0,11 Вт/м·К. Таким образом, добавление гранул пенополистирола привело к снижению теплопроводности пенобетона на 31%, в то время как прочность на изгиб снизилась на 46,7%. Похожее исследование провели авторы работы [20], в которой оценили влияние различного содержания пенополистирола на характеристики легкого пенобетона. Содержание пенополистирола изменялось от 8 до 32 об. %, характеристики композитов сравнивались с характеристиками исходного пенобетона без добавок. Результаты исследований показали снижение теплопроводности композита с 32 об. % пенополистирола до 0,24 Вт/м·К по сравнению с исходным пенобетоном (0,48 Вт/м·К). Прочность на сжатие при этом снизилась с 37,5 до 28 МПа. Для обеспечения высоких тепловых и механических свойств пенобетона, необходимо определить оптимальное количество наполнителя.

Авторы работы [21] исследовали влияние содержания микросфер из вспученного перлита на прочность пенобетона и его теплопроводность. Согласно результатам исследований, повышение содержания микросфер из перлита от 0 до 100% способствует значительному снижению плотности пенобетона с 547 до 258 кг/м³. В свою очередь, снижение плотности объясняет уменьшение прочности пенобетона на сжатие с 1,22 до 0,56 МПа и его теплопроводности с 0,122 до 0,062 Вт/м·К.

Onur Pehlivanlı и др. [22] исследовали влияние длины полипропиленового волокна (3, 6, 12 мм) на механические и тепловые свойства автоклавного пенобетона. Армирование пенобетона волокном способствовало увеличению прочности на изгиб до 70,4% и теплопроводности до 20,2%. При этом чем больше длина полипропиленового волокна, тем выше прочность и теплопроводность композита.

В работе [23] Zhang и др. разработали пенобетон с наполнителями из гранул аэрогеля и рубленого стекловолокна. Плотность композитного пенобетона снизилась до 200 кг/м³, в то время как плотность обычного пенобетона составила 1767 кг/м³. Добавление аэрогеля и стекловолокна позволило снизить теплопроводность пенобетона более чем в шестнадцать раз: с 0,7553 до 0,0458 Вт/м·К. Похожее исследование провели авторы работы [24], в которой представили характеристики разработанного пенобетона с добавлением аэрогеля. Авторам удалось снизить плотность композитного пенобетона до 198 кг/м³, теплопроводность при этом составила 0,049 Вт/м·К.

Bayraktar и др. [25] разработали композит на основе пенобетона с добавлением базальтового волокна, отработанного мраморного порошка и молотого гранулированного доменного шлака. Результаты исследований механических свойств показали, что добавление базальтового волокна и мраморного порошка положительно влияет на прочность пенобетона на сжатие, в то время как добавление гранул доменного шлака, напротив, снижает прочность бетона. Вместе с тем, добавление базальтового волокна и мраморного порошка привело к повышению теплопроводности пенобетона на 14%.

В работе [26] авторы исследовали механические и тепловые свойства пенобетона при добавлении минеральных и синтетических волокон. В качестве наполнителей использовали базальтовые и асбестовые волокна. Согласно результатам исследований, пенобетон с добавлением асбеста имеет высокую прочность 0,69 МПа и низкую теплопроводность 0,055 Вт/м·К.

В работе [27] авторы исследовали теплопроводность древесно-цементных композитов, представляющих собой опилкобетон и арболит. В обоих случаях основой для заполнителя послужила древесина сосны. Согласно результатам исследований, опилкобетон имеет более высокую теплопроводность 0,22-0,25 Вт/м·К, чем арболит 0,175-0,210 Вт/м·К в диапазоне температур от 30 до 70 °С.

Нередко в качестве наполнителя в пенобетонах применяют полые стеклянные микросферы [28-30]. Wang и др. [31] разработали композит с добавлением микросфер в количестве 60, 80, 100 об.%. Результаты исследований прочности пенобетона показали, что по сравнению с чистым пенобетоном, прочность на сжатие которого составила 42 МПа, прочность композита с 60 об.% микросфер составила 17 МПа, композита с 100 об.% микросфер – 7 МПа. Несмотря на ухудшение прочности, добавление микросфер положительно на теплоизоляционные свойства пенобетона. В работе [32] авторы добавили микросферы в пенобетон и исследовали теплопроводность полученных композитов. Результаты исследований показали, что добавление 6% микросфер позволяет снизить теплопроводность пенобетона с 0,2507 до 0,2029 Вт/м·К.

В исследованной литературе приведены результаты оценки свойств пенобетонов и

композитов на их основе. Целью нашей работы является исследование влияния различных наполнителей на теплопроводность композитного пенобетона. В качестве наполнителей использованы диатомитовые микросферы и костра конопли. В отличие от полых стеклянных микросфер, диатомитовые микросферы обладают более высокой прочностью. Согласно работе [33], стеклянные микросферы с размерами 30-70 мкм имеют прочность от 15 до 79 МПа. Диатомитовые микросферы с размерами 30-40 мкм имеют прочность от 532 до 969 МПа [34].

Научная значимость исследования заключается в выявлении зависимостей теплофизических свойств композитного бетона от материала наполнителя и его распределения по объему композита. Практическая значимость исследования заключается в разработке методики изготовления композитных бетонных блоков, а также в получении определенных значений тепловых характеристик композитов с различными типами наполнителя. Результаты работы будут полезны производителям строительных материалов для создания композитных бетонных блоков с улучшенными теплоизоляционными характеристиками.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе исследованы образцы пенобетона, заполненные диатомитовыми микросферами различного диаметра, и костробетон. Состав композитного пенобетона с микросферами представлен в таблице 1. Пенобетон синтезировали по следующей технологии. Емкость и шнеки двухроторного смесителя обрабатывались слабо смоченной тканью, затем в емкость добавляли компоненты пенобетона и перемешивали на низких оборотах. Далее в смесь добавляли половину объема подготовленной воды и перемешивали до однородной консистенции. На заключительном этапе добавляли оставшуюся воду и перемешивали в течение двух минут. Затем образцы пенобетона формовали согласно ГОСТ 10180-2012, после чего измеряли характеристики полученных пенобетонов (таблица 2): согласно ГОСТ 18105-2018 определяли прочность композитов, согласно ГОСТ 26633-2012 определяли морозостойкость. Полученные пенобетоны с микросферами обладают плотностью 1350 кг/м³. Согласно ГОСТ 25484-2019, ячеистые бетоны с плотностью свыше 800 кг/м³ относятся к конструкционным, т.е. могут применяться для возведения строительных конструкций.

Таблица 1.

Состав композитного пенобетона с микросферами

Компонент	Содержание, % масс.
Цемент	34,79
Микрокальцит	17,38
Метакаолин	3,75
Микросферы R=0,14...0,315	18,25
Микросферы R=0,315...0,63	13,26
Вода	12,19
Суперпластификатор	0,38

Таблица 2.

Характеристики композитного пенобетона с микросферами

Прочность на сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³	Класс бетона	Марка по морозостойкости, не менее	Водопоглощение по массе, %
1350	1350	B30	F300	2

Для испытаний были выбраны исходные образцы пенобетона с микросферами 150x150x39...40 мм и костробетон 142x148x48 мм (рисунок 1). Плотность пенобетонов с диатомитовыми микросферами составила 1350 кг/м³, костробетона – 500 кг/м³. Образец с кострой конопли был выбран для оценки влияния типа и количества наполнителя на теплоизоляционные свойства пенобетона.

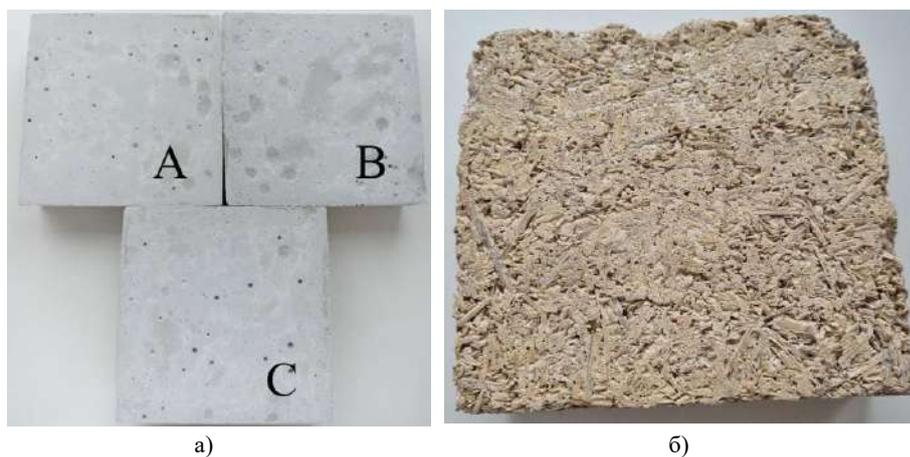


Рис. 1. Фотографии исследованных образцов пенобетона: а) с микросферами, б) с костью конопли

Fig. 1. Pictures of the studied samples of foam concrete: a) with microspheres, b) with hemp shives.

На рисунке 2 представлены фотографии поверхности микросфер и их внутреннего строения, сделанные с помощью растровой электронной микроскопии. При создании композитных материалов с микросферами важно обеспечить равномерное распределение сфер по объему композита, в противном случае возникают участки, не занятые микросферами, что влияет на свойства композита. Кроме того, при перемешивании некоторые микросферы могут сломаться, что также окажет негативное влияние на теплофизические и механические характеристики композитного материала.

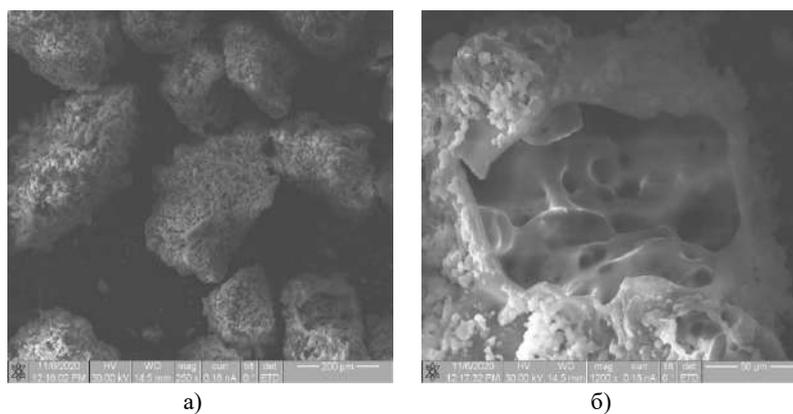


Рис. 2. Электронная микроскопия микросфер: а) поверхности, б) внутреннего строения.

Fig. 2. Electron microscopy of microspheres: a) surface, b) internal structure.

На рисунке 3 представлена схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности исследуемых образцов. На схеме позициями обозначены: 1 – индукционный нагреватель, 2 – алюминиевая пластина, 3 – исследуемый образец пенобетона, 4 – тепловая изоляция, 5 – датчик плотности теплового потока, 6 – термопары, 7 – измеритель плотности теплового потока, 8 – измеритель температуры. Датчик измерения плотности теплового потока работает по принципу дополнительной стенки. Пределы относительной погрешности датчика составляют $\pm 6\%$. Для измерения температуры применялись термопары К типа, погрешность измерений которых составляет $\pm 0,3\%$. Измерения теплопроводности проведены в соответствии с методом стационарного теплового потока (ГОСТ 7076-99).

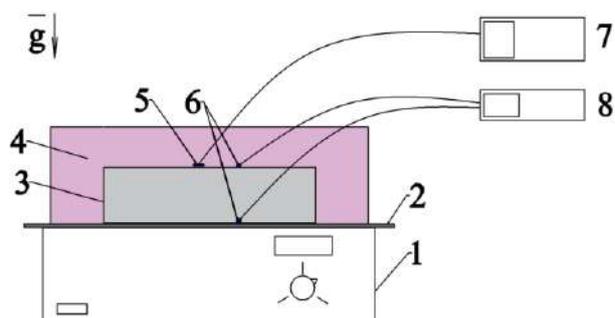


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности образцов пенобетона.

Fig. 3. Scheme of the experimental setup for measuring the thermal conductivity of foam concrete samples

Измерения проводились при температурах нагревателя 100, 150, 200 и 250 °С. Для обеспечения равномерного нагрева пенобетона на нагреватель устанавливали алюминиевую пластину, на которую, в свою очередь, помещали исследуемый образец. Для обеспечения однонаправленного теплового потока образец окружали теплоизоляционным материалом. Между пенобетоном и алюминиевой пластиной устанавливалась первая термопара, вторую термопару и датчик плотности теплового потока крепили с противоположной стороны, между пенобетоном и теплоизоляцией. В ходе измерений фиксировались значения обеих термопар и датчика плотности теплового потока. Значение теплопроводности получали из закона Фурье (1):

$$\lambda = q \cdot \delta / (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность образца, Вт/м·К; q – плотность теплового потока, Вт/м²; δ – толщина образца, м; T_1 , T_2 – показания температур первой и второй термопар соответственно, К.

Исследуемые в работе образцы пенобетонов с микросферами и с кострой конопли относятся к пористым материалам. Передача тепла в пористом материале осуществляется путем теплопроводности твердой фазы, теплопроводности газовой фазы, конвекции и излучения. Для определения теплопроводности пористой среды принято использовать термин «эффективной теплопроводности». Эффективная теплопроводность определяется по формуле (2) [35]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_c + \lambda_r, \quad (2)$$

где λ_{eff} – эффективная теплопроводность пористого материала, λ_g – теплопроводность газа внутри пор, λ_s – теплопроводность твердотельной матрицы, λ_c характеризует перенос тепла путем конвекции внутри пор, λ_r определяет лучистый теплообмен.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В результате проведенных экспериментальных исследований получены значения теплопроводности для образцов пенобетона с микросферами (образцы А, В и С) и костробетона. Значения теплопроводности получены для диапазона температур от 53 до 114 °С. Результаты исследований представлены на рисунке 4. На оси ОХ указаны значения температуры нагрева, соответствующие показаниям термопары, установленной на алюминиевой пластине, на оси ОУ указаны значения теплопроводности.

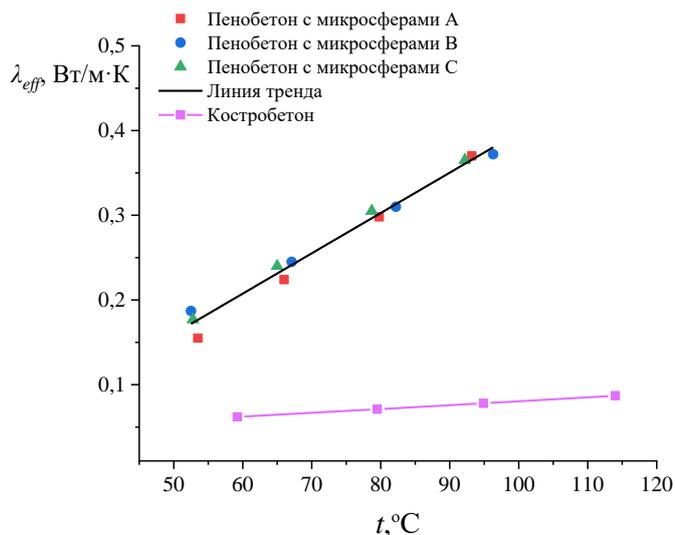


Рис. 4. Теплопроводности пенобетонов с микросферами и кострой конопли в зависимости от температуры

Fig. 4. Thermal conductivity of foam concrete with microspheres and hemp shives depending on temperature.

Теплопроводности пенобетонов с диатомитовыми микросферами с плотностью 1350 кг/м^3 изменялись в диапазоне от 0,155 до 0,365 Вт/м·К при температурах от 53 до $114 \text{ }^\circ\text{C}$. Для сравнения, согласно ГОСТ 25484-2019, пенобетоны с плотностью 1200 кг/м^3 при комнатной температуре имеют теплопроводность 0,290-0,350 Вт/м·К в зависимости от состава. Таким образом, исследуемые в данной работе пенобетоны с диатомитовыми микросферами имеют меньшую теплопроводность, чем применяемые на сегодняшний день пенобетоны, и, следовательно, обеспечивают более эффективную теплоизоляцию зданий.

Образцы пенобетона с микросферами показали в целом более высокие значения теплопроводности, чем костробетон. При температуре нагрева $80 \text{ }^\circ\text{C}$ пенобетоны с микросферами показали значения теплопроводности: 0,289 Вт/м·К (пенобетон А), 0,300 Вт/м·К (пенобетон В) и 0,311 Вт/м·К (пенобетон С). Теплопроводность костробетона при той же температуре составила 0,070 Вт/м·К, что можно объяснить высоким содержанием наполнителя в данном образце. Костробетон продемонстрировал небольшое увеличение теплопроводности с ростом температуры, а именно: при повышении температуры с 59 до $114 \text{ }^\circ\text{C}$ теплопроводность увеличилась с 0,062 до 0,085 Вт/м·К, т.е. на 37%. Пенобетоны с микросферами продемонстрировали более интенсивный рост теплопроводности, который составил 58,1%, 49,7% и 51,5% для образцов А, В и С соответственно, в диапазоне температур от 53 до $96 \text{ }^\circ\text{C}$. Несмотря на то, что образцы пенобетона с микросферами имеют один состав, значения теплопроводности несколько отличаются, что объясняется различным распределением микрофер по объему.

Холодный климат в России способствует воздействию отрицательных температур на строительные конструкционные материалы. Возникает необходимость в оценке характеристик материалов в условиях пониженных температур. Ригге и др. [36] провели экспериментальное исследование теплопроводности двух образцов костробетона при положительных и отрицательных температурах. Результаты исследований представлены на рисунке 5.

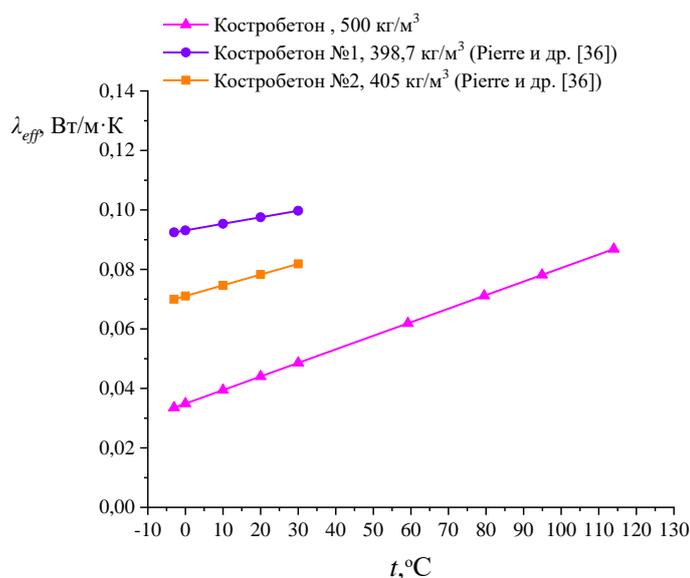


Рис. 5. Теплопроводности костробоетонов различной плотности при отрицательной температуре

Fig. 5. Thermal conductivity of hemp concretes at sub-zero temperature.

Рiерге и др. получили линейную зависимость теплопроводности от температуры, что согласуется с результатами наших измерений. При этом необходимо отметить, что линейный характер изменения теплопроводности сохраняется и при отрицательных температурах. На этом основании была проведена экстраполяция результатов измерений теплопроводности костробоетона, выполненных в нашей работе, до отрицательных температур. Теплопроводность костробоетона, приведенная в данной работе, имеет меньшие значения, чем результаты, полученные в работе Рiерге. Это объясняется различными значениями плотности образцов. В работе [36] костробоетоны имели значения плотности $398,7 \text{ кг/м}^3$ (образец №1) и 405 кг/м^3 (образец №2). При этом образец №1, несмотря на меньшую плотность, показал более высокие значения теплопроводности. Например, при фиксированной температуре 20°C и относительной влажности 0%, образец №1 имеет теплопроводность $0,098 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, образец №2 – $0,078 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Наш образец костробоетона имеет ещё более высокое значение плотности 500 кг/м^3 , и его теплопроводность при 20°C составила $0,044 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Таким образом, мы видим тенденцию к уменьшению теплопроводности костробоетона с увеличением его плотности. Это связано с тем, что в костробоетоне, как в пористом материале, часть тепла передается путем конвекции через микроканалы (формула 2). Согласно результатам исследований, представленным в работе [37], вклад конвекции в эффективную теплопроводность пористой среды составляет до 25%. С повышением плотности костробоетона происходит забивка микроканалов частицами костры конопли, количество микроканалов значительно уменьшается, следовательно, снижается как вклад конвекции, так и эффективная теплопроводность костробоетона в целом.

Заклyчение (Conclusions)

В данной работе проведены экспериментальные исследования свойств пенобетонов, армированных диатомитовыми микросферами и кострой конопли. В статье представлена методика изготовления композитных пенобетонов и результаты измерения основных физических характеристик. Методика в целом не отличается от известных на сегодняшний день технологий изготовления бетонов, а сырье для производства пенобетона легкодоступно на рынке строительных материалов.

Исследование теплоизоляционных свойств проведено путем определения эффективной теплопроводности образцов в диапазоне температур от 53 до 114°C . Измерения проводились согласно методу стационарного теплового потока, теплопроводность находили из закона Фурье. Результаты исследований показали, что костробоетон имеет более низкую теплопроводность в сравнении с пенобетонами, армированными диатомитовыми микросферами. Это объясняется более высоким содержанием наполнителя – костры конопли. Образцы с микросферами несмотря на один состав показали разные значения теплопроводности, что объясняется различным распределением микросфер по объему.

Исследовано влияние отрицательных температур на эффективную теплопроводность кострбетона. Выявлено, что теплопроводность сохраняет линейную зависимость и в условиях низких температур. Сравнительный анализ результатов работы с результатами других авторов [36] выявил обратную зависимость эффективной теплопроводности кострбетона от его плотности. Кострбетоны высокой плотности продемонстрировали более низкие значения эффективной теплопроводности. Это связано с тем, что значительный вклад в эффективную теплопроводность вносит перенос тепла конвекцией через микроканалы, присутствующие в структуре кострбетона. Повышение плотности способствует закупорке микроканалов, уменьшению их размеров и количества, что приводит к снижению как конвективной составляющей, так и эффективной теплопроводности кострбетона в целом.

В целом, исследованные образцы пенобетона демонстрируют улучшенные теплоизоляционные характеристики по сравнению с применяемыми в настоящее время ячеистыми бетонами и пригодны для использования в жилом строительстве с целью возведения ненесущих и несущих конструкций. Благодаря высоким теплоизоляционным свойствам композитные пенобетоны способны существенно снизить тепловую нагрузку на отопление здания.

Литература

1. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C., Ghellere M., Guazzi G., Meroni I., Salamone F., Scamoni F., Scrosati C. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // Journal of building engineering. 2019. Т. 25. С. 100772.
2. Wagh C. D., Indu Siva Ranjani G., Kamisetty A. Thermal properties of foamed concrete: a review //3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development: ITCSD 2020 3. Springer International Publishing, 2021. С. 113-137.
3. Jhatial A. A., Goh W. I., Mohamad N., Rind T. A., Sandhu A. R. Development of thermal insulating lightweight foamed concrete reinforced with polypropylene fibres //Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. Т. 45. С. 4067-4076.
4. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Попкова О.С. Моделирование трехмерной структуры высокопористых ячеистых материалов и анализ качества модели на примере расчета перепада давления // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. 2018. Т. 160, Кн. 4. С. 681-694.
5. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Талипова А.Р., Шакурова Р.З., Гилязов А.И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №. 1(53). С. 56-64.
6. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Ваньков Ю. В., Ахметова И. Г., Шакурова Р. З., Талипова А. Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 3. С. 55-66.
7. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 1. С. 82-104.
8. Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M. R. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete //Construction and building materials. 2013. Т. 47. С. 1278-1291.
9. Gołaszewski J., Klemczak B., Smolana A., Gołaszewska M., Cygan G., Mankel C., Peralta I., Roser F., Koenders E. A. Effect of foaming agent, binder and density on the compressive strength and thermal conductivity of ultra-light foam concrete //Buildings. 2022. Т. 12. №. 8. С. 1176.
10. Ganesan S., Othuman Mydin M. A., Mohd Yunos M. Y., Mohd Nawi M. N. Thermal properties of foamed concrete with various densities and additives at ambient temperature //Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2015. Т. 747. С. 230-233.
11. Chung S. Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches //Applied Sciences. 2017. Т. 7. №. 6. С. 550.
12. Горбач П. С., Щербин С. А. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №. 5 (46). С. 126-132.
13. Chen G., Li F., Jing P., Geng J., Si Z. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete //Materials. 2021. Т. 14. №. 2. С. 339.
14. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity //Construction and

Building Materials. 2021. Т. 294. С. 123572.

15. Zhang X., Yang Q., Shi Y., Zheng G., Li Q., Chen H., Cheng X. Effects of different control methods on the mechanical and thermal properties of ultra-light foamed concrete //Construction and Building Materials. 2020. Т. 262. С. 120082.

16. Баранова А. А. Теплопроводность и термическое сопротивление неавтоклавно пенобетона на основе микрокремнезёма //Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. №. 3 (34). С. 370-377.

17. Batool F., Bindiganavile V. Quantification of factors influencing the thermal conductivity of cement-based foam //Cement and Concrete Composites. 2018. Т. 91. С. 76-86.

18. Gencil O., Bayraktar O. Y., Kaplan G., Arslan O., Nodehi M., Benli A., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties //Construction and Building Materials. 2022. Т. 320. С. 126187.

19. Priyanka E., Sathyan D., Mini K. M. Functional and strength characteristics of EPS beads incorporated foam concrete wall panels //Materials Today: Proceedings. 2021. Т. 46. С. 5167-5170.

20. Mahdi H. A., Jasim K. A., Shaban A. H. Manufacturing and improving the characteristics of the isolation of concrete composites by additive Styrofoam particulate //Energy Procedia. 2019. Т. 157. С. 158-163.

21. Машкин Н.А., Малахов Д.А., Русаков В.Е., Бартеньева Е.А., Беркутов С.С. Перлитовые микросферы-эффективный наполнитель для теплоизоляционного пенобетона //Научный вестник Арктики. 2019. №. 5. С. 47-50.

22. Pehlivanli Z. O., Uzun İ. Effect of polypropylene fiber length on mechanical and thermal properties of autoclaved aerated concrete //Construction and Building Materials. 2022. Т. 322. С. 126506.

23. Zhang H., Yang J., Wu H., Fu P., Liu Y., Yang W. Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency //Solar Energy. 2020. Т. 204. С. 569-576.

24. Li P., W H., Liu Y., Yang J., Fang Z., Lin B. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete //Construction and Building Materials. 2019. Т. 205. С. 529-542.

25. Bayraktar O. Y., Kaplan G., Gencil O., Benli A., Sutcu M. Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag //Construction and Building Materials. 2021. Т. 288. С. 123128.

26. Кудряков А. И., Стешенко А. Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №. 2 (43). С. 127-133.

27. Долматов С. Н., Никончук А. В. Исследование показателей теплопроводности древесно-цементных композитов //Хвойные boreальной зоны. 2019. Т. 37. №. 5. С. 341-346.

28. Dahal M., Liyew G., Kim H. K., Pyo S. Characteristics of ultra-high performance lightweight concrete containing hollow glass microspheres under severe loading conditions //Construction and Building Materials. 2022. Т. 356. С. 129312.

29. Aslani F., Dehghani A., Wang L. The effect of hollow glass microspheres, carbon nanofibers and activated carbon powder on mechanical and dry shrinkage performance of ultra-lightweight engineered cementitious composites //Construction and Building Materials. 2021. Т. 280. С. 122415.

30. Соловьев С. А., Соловьева О. В., Ахметова И. Г., Ваньков Ю. В., Шакурова Р. З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 1. С. 86-98.

31. Wang L., Aslani F., Hajirasouliha I., Roquino E. Ultra-lightweight engineered cementitious composite using waste recycled hollow glass microspheres //Journal of Cleaner Production. 2020. Т. 249. С. 119331.

32. Shahidan S., Aminuddin E., Noor K. M., Hannan N. I. R. R., Bahari N. A. S. Potential of hollow glass microsphere as cement replacement for lightweight foam concrete on thermal insulation performance //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. 2017. Т. 103. С. 01014.

33. Dillinger B., Clark D., Suchicital C., Wicks G. Crush strength analysis of hollow glass microspheres //Proceedings of the 41st International Conference on Advanced Ceramics and Composites: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 38, Issue 2. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2018. Т. 38. С. 11-25.

34. Yan S., Huo W., Yang J., Zhang X., Wang Q., Wang L., Pan Y., Huang Y. Green synthesis and influence of calcined temperature on the formation of novel porous diatomite microspheres for efficient adsorption of dyes //Powder Technology. 2018. Т. 329. С. 260-269.

35. Notario B., Pinto J., Solorzano E., deSaja J.A., Dumon M., Rodríguez-Pérez M.A. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams //Polymer. 2015. Т. 56. С. 57-67.

36. Pierre T., Colinart T., Glouannec P. Measurement of thermal properties of biosourced building materials //International Journal of Thermophysics. 2014. Т. 35. №. 9-10. С. 1832-1852.

37. Soloveva O.V., Solovev S.A., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies //Processes. 2022. Т. 10. №. 11. С. 2257.

Авторы публикации

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Цифровые системы и модели» (ЦСМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сеницын Антон Александрович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Теплогазоводоснабжение» Вологодского государственного университета (ВоГУ).

Закревская Любовь Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

Ананьев Михаил Сергеевич – студент кафедры «Строительное производство» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

References

1. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C., Ghellere M., Guazzi G., Meroni I., Salamone F., Scamoni F., Scrosati C. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of building engineering*. 2019;25:100772. doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100772

2. Wagh C. D., Indu Siva Ranjani G., Kamisetty A. Thermal properties of foamed concrete: a review. 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development: ITCSD 2020 3. *Springer International Publishing*. 2021;113-137. doi: 10.1007/978-3-030-51485-3_9

3. Jhatial A. A., Goh W. I., Mohamad N., Rind T. A., Sandhu A. R. Development of thermal insulating lightweight foamed concrete reinforced with polypropylene fibres. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020;45:4067-4076. doi: 10.1007/s13369-020-04382-0

4. Solovev S.A., Soloveva O.V., Popkova O.S. Modeling of the three-dimensional structure of open cell foam and analysis of the model quality using the example of pressure drop calculation. *Uchenie Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2018; 160(4): 681-694.

4. Soloveva O.V., Solovev S.A., Talipova A.R., Shakurova R.Z., Gilyazov A.I. Study of the influence of the porosity of a fibrous material on the energy efficiency value. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14(1):56-64.

6. Soloveva O.V., Solovev S.A., Vankov Y.V., Akhmetova I.G., Shakurova R.Z., Talipova A.R. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):55-66. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-65

7. Soloveva O.V., Solovev S.A., Shakurova R.Z. Review Of Modern Ceramic Cellular Materials And Composites Used In Heat Engineering. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(1):82-104. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104

8. Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M. R. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and building materials*. 2013;47:1278-1291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.027

9. Gołaszewski J., Klemczak B., Smolana A., Gołaszewska M., Cygan G., Mankel C., Peralta I.,

Roser F., Koenders E. A. Effect of foaming agent, binder and density on the compressive strength and thermal conductivity of ultra-light foam concrete. *Buildings*. 2022;12(8):1176. doi: 10.3390/buildings12081176

10. Ganesan S., Othuman Mydin M. A., Mohd Yunos M. Y., Mohd Nawi M. N. Thermal properties of foamed concrete with various densities and additives at ambient temperature. *Applied Mechanics and Materials*. – Trans Tech Publications Ltd. 2015;747:230-233. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.747.230

11. Chung S. Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*. 2017;7(6):550. doi: 10.3390/app7060550

12. Gorbach P. S., Shcherbin S. A. Influence of a foaming agent on the properties of foam and foam concrete. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014;5(46):126-132.

13. Chen G., Li F., Jing P., Geng J., Si Z. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Materials*. 2021;14(2):339. doi: 10.3390/ma14020339

14. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 2021;294:123572. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123572

15. Zhang X., Yang Q., Shi Y., Zheng G., Li Q., Chen H., Cheng X. Effects of different control methods on the mechanical and thermal properties of ultra-light foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;262:120082. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120082

16. Baranova A.A. Thermal conductivity and thermal resistance of non-autoclaved foam concrete based on silica fume. *Izvestiya vuzov. Investments. Construction. Real estate*. 2020;10(3):370-377.

17. Batool F., Bindiganavile V. Quantification of factors influencing the thermal conductivity of cement-based foam. *Cement and Concrete Composites*. 2018;91:76-86. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.015

18. Gencil O., Bayraktar O. Y., Kaplan G., Arslan O., Nodehi M., Benli A., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*. 2022;30:126187. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126187

19. Priyanka E., Sathyan D., Mini K. M. Functional and strength characteristics of EPS beads incorporated foam concrete wall panels. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46:5167-5170. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.592

20. Mahdi H. A., Jasim K. A., Shaban A. H. Manufacturing and improving the characteristics of the isolation of concrete composites by additive Styrofoam particulate. *Energy Procedia*. 2019;157:158-163. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.176

21. Mashkin N.A., Malakhov D.A., Rusakov V.E., Bartenyeva E.A., Berkutov S.S. Perlite microspheres - an effective filler for heat-insulating foam concrete. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2019;5:47-50.

22. Pehlivanli Z. O., Uzun İ. Effect of polypropylene fiber length on mechanical and thermal properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;322:126506. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126506

23. Zhang H., Yang J., Wu H., Fu P., Liu Y., Yang W. Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency. *Solar Energy*. 2020;204:569-576. doi: 10.1016/j.solener.2020.04.092

24. Li P., W H., Liu Y., Yang J., Fang Z., Lin B. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;205:529-542. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212

25. Bayraktar O. Y., Kaplan G., Gencil O., Benli A., Sutcu M. Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*. 2021;288:123128. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123128

26. Kudyakov A. I., Steshenko A. B. Foam concrete dispersed-reinforced heat-insulating natural hardening. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014;2(43):127-133.

27. Dolmatov S. N., Nikonchuk A. V. Investigation of the thermal conductivity of wood-cement composites. *Coniferous boreal zone*. 2019;37(5):341-346.

28. Dahal M., Liyew G., Kim H. K., Pyo S. Characteristics of ultra-high performance lightweight concrete containing hollow glass microspheres under severe loading conditions. *Construction and Building Materials*. 2022;356:129312. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129312

29. Aslani F., Dehghani A., Wang L. The effect of hollow glass microspheres, carbon nanofibers

and activated carbon powder on mechanical and dry shrinkage performance of ultra-lightweight engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2021;280:122415. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122415

30. Solovev S.A., Soloveva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):86-98. doi : 10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.

31. Wang L., Aslani F., Hajirasouliha I., Roquino E. Ultra-lightweight engineered cementitious composite using waste recycled hollow glass microspheres. *Journal of Cleaner Production*. 2020;249:119331. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119331

32. Shahidan S., Aminuddin E., Noor K. M., Hannan N. I. R. R., Bahari N. A. S. Potential of hollow glass microsphere as cement replacement for lightweight foam concrete on thermal insulation performance. *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2017;103:01014. doi: 10.1051/mateconf/201710301014

33. Dillinger B., Clark D., Suchicital C., Wicks G. Crush strength analysis of hollow glass microspheres. *Proceedings of the 41st International Conference on Advanced Ceramics and Composites: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 38, Issue 2*. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2018;38:11-25. doi:10.1002/9781119474678.ch2

34. Yan S., Huo W., Yang J., Zhang X., Wang Q., Wang L., Pan Y., Huang Y. Green synthesis and influence of calcined temperature on the formation of novel porous diatomite microspheres for efficient adsorption of dyes. *Powder Technology*. 2018;329:260-269. doi:10.1016/j.powtec.2018.01.090

35. Notario B., Pinto J., Solorzano E., deSaja J.A., Dumon M., Rodríguez-Pérez M.A. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015;56:57-67. doi: 10.1016/j.polymer.2014.10.006

36. Pierre T., Colinart T., Glouannec P. Measurement of thermal properties of biosourced building materials. *International Journal of Thermophysics*. 2014;35(9-10):1832-1852. doi: 10.1007/s10765-013-1477-0

37. Soloveva O.V., Solovev S.A., Vankov YV., Shakurova R.Z. *Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies*. *Processes*. 2022;10(11):2257. doi:10.3390/pr10112257

Authors of the publication

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton A. Sinitsin – Vologda State University, Vologda, Russia.

Lyubov V. Zakrevskaya – Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Mikhail S. Ananiev – Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 20.05.2023г.

Отредактировано 29.05.2023г.

Принято 06.06.2023г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.321

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ОБЪЕКТОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Абдуллазянов Э.Ю.¹, Грачева Е.И.¹, Ибатуллин Э.Э.¹, Петрова Р.М.¹, Синюкова Т.В.².

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Липецкий Государственный Технический Университет, г. Липецк, Россия

ibatullinedick@yandex.ru

Резюме: Актуальностью данного исследования является анализ статистических данных основных показателей промышленного производства объектов средней мощности. Результаты исследования могут быть использованы для повышения энергетической эффективности промышленных предприятий, сокращению затрат на электроэнергию и повышению надежности работы промышленных объектов. **ЦЕЛЬ.** Провести исследование показателей производства продукции, состава электрооборудования и режимов работы объектов средней мощности различных отраслей промышленности. **МЕТОДЫ.** Используются методы обработки статистических и эксплуатационных данных предприятий. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложена классификация промышленных объектов средней мощности: 1) по потребляемой мощности, 2) по характеру технологического процесса, 3) по количеству работающих, 4) по площади занимаемой территории, 5) по виду промышленности. Представлены результаты исследований и анализа величины удельных расходов электроэнергии на производство отдельных видов продукции для различных отраслей промышленности за 2000-2020 г.г., показана динамика изменения данных показателей. Приведены данные анализа доли потребления электрической энергии отдельными электроприемниками с равномерным графиком нагрузки от общего электропотребления цеха для отдельных предприятий. Представлен состав электрооборудования и электроприемников технологической, круглосуточной и некруглосуточной нагрузки для предприятий основных стратегических отраслей промышленности. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований и анализа основных технико-экономических показателей некоторых производств промышленности предприятий средней мощности могут быть использованы для оценки и анализа энергоэффективности таких объектов.

Ключевые слова: отрасли промышленности; электропотребитель; удельный расход электроэнергии; энергоэффективность; производство продукции; график нагрузки.

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э., Петрова Р.М., Синюкова Т.В. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.

ANALYSIS OF THE MAIN INDICATORS OF INDUSTRIAL PRODUCTION OF FACILITIES OF AVERAGE CAPACITY

EYu. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva¹, EE. Ibatullin¹, P.M.Petrova, TV. Sinyukova²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

ibatullinedick@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. Achieving efficient and optimized energy consumption at industrial facilities. The results of the study can be used in various industries to improve the energy efficiency of enterprises, reduce energy costs and improve the reliability of industrial facilities. OBJECTIVE. To conduct research of the current condition of electric consumers, electric equipment and operation modes of industrial objects of medium capacity in different industries.

METHODS. Methods of statistical and operational data processing of enterprises and industrial facilities of various industries are used. RESULTS. The classification of industrial objects of average power: 1) according to the consumed power, 2) according to the character of the technological process, 3) according to the number of employees, 4) according to the area of the occupied territory, 5) according to the kind of industry is offered. The results of the research and analysis of the value of the specific electric energy consumption for the production of the separate kinds of output for the different branches of industry in 2000-2020 are presented, the dynamics of the given indicators in the percentage relation are shown. The data of the analysis of a share of electric power consumption by separate electric consumers with the uniform loading schedule from the total power consumption of a shop for some enterprises are resulted. The composition of electrical equipment and electrical consumers of technological, round-the-clock and non-round-the-clock load for the enterprises of the main strategic industries is presented. CONCLUSIONS. The results of the conducted research and analysis of the main technical and economic indicators of some production facilities of RF industry and enterprises of average capacity can be used to assess the energy efficiency of such facilities.

Keywords: Industries electricity consumer; specific electricity consumption; energy efficiency; production; load schedule.

For citation: Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Ibatullin EE, Petrova P.M, Sinyukova TV. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):93-108.

Введение

В современных условиях системного экономического кризиса и введенных санкций против РФ особое внимание уделяется повышению оптимизации электроснабжения промышленных объектов. В настоящее время в России особое внимание уделяется повышению точности процессов прогнозирования электропотребления. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, кризис в экономике и, особенно, в энергетических отраслях, отрицательно влияет на эффективность функционирования оборудования промышленных комплексов. При этом характерно, что наблюдается взаимосвязь между таким важнейшим показателем эффективности работы электротехнических систем, как потери электроэнергии и кризисных явлениях во всех странах, независимо от уровня их развития. В настоящее время регулированию режимов потребления электроэнергии уделяется значительное внимание, обусловленное ростом стоимости электроэнергии. Ниже представлен анализ некоторых научных работ ученых, проводящих исследования в данной области.

Авторами Грачевой Е.И., Горловым А.Н., Алимовой А.Н. [1] проведен анализ и исследование потерь электроэнергии в цеховых сетях. Авторами в ходе исследования выявлено, что для точного учета потерь электроэнергии необходимо учитывать такие параметры электрооборудования, как нагрев элементов электрооборудования, температура окружающей среды и сопротивление контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов, установленных на линиях цеховых сетей.

Дробов А.В. в [2] проанализировал рациональные схемы электроснабжения промышленных и транспортных объектов. Автором разработан метод автоматического поиска рациональных вариантов электроснабжения с наименьшими приведенными затратами. В ходе проведенного исследования определена схема электроснабжения для конкретного участка системы, позволяющая сократить потери мощности на 20%.

В ходе проведенных исследований Грачевой Е.И. и Наумовым О.В. в [3] проанализированы достоинства и недостатки различных методов расчета нагрузок, включая расчеты по установленной мощности и коэффициенту спроса, среднеквадратичной мощности, коэффициенту формы графика нагрузки, средней мощности, коэффициенту максимума и удельной нагрузке на единицу производственной площади. Авторами предложены рекомендации по использованию и применению этих методов.

Грачева Е.И. и Алимова А.Н. в [4] исследовали причины возникновения возможных погрешностей при расчете потерь электроэнергии в цеховых сетях низкого напряжения, связанные с неправильным учетом основных характеристик электрооборудования. Авторами выявлено, что для более точного расчета потерь электроэнергии необходимо учитывать такие параметры, как температура нагрева проводов и кабелей линий цеховых сетей, температура окружающей среды, вид графиков нагрузки и загрузки электрооборудования, а А.В. Шагидуллин в [5] проведен анализ эффективности замены установленных коммутационных аппаратов на новые в цеховых сетях предприятий с целью

снижения потребления электроэнергии. Автором проведена оценка эффективности данной замены с оценкой технических параметров и экономических показателей.

Зацепиной В.И. в [6] исследованы проблемы безотказности систем электроснабжения. Автором разработано математическое описание функционирования этих систем, учитывающее иерархичность их структур и взаимодействие всех элементов для оценки воздействия на них широкого спектра случайных возмущающих факторов.

Горловым А.Н., Филатовым Е.А. в [7] предложена математическая модель оптимизации системы электроснабжения промышленных предприятий, позволяющая разделять энергосберегающие мероприятия по критериям и выбирать те, внедрение которых приведет к наибольшему эффекту. Внедрение данной математической модели позволит сократить потери электроэнергии на промышленных предприятиях.

Мягишкіна Г.В. и Бирюк В.В. в [8] исследовали условия рационального потребления и распределения электроэнергии на предприятиях. Авторами рассмотрено влияние профиля почасового потребления предприятиями на общий расход электроэнергии, проведен расчет величины отклонений средневзвешенных значений расхода электроэнергии и приведены условия для их оценки. В работе также содержатся заключения о рациональности способа определения энергоэффективности через оценку режимов потребления электроэнергии предприятиями.

Возможности повышения эффективности управления режимами систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями путем оптимизации эксплуатационных режимов рассмотрены Малафеевым А.В. в [9]. Автором предложены подходы и методы для оптимизации эксплуатационных режимов систем электроснабжения, что позволяет улучшить энергоэффективность и экономическую эффективность предприятий, а качество функционирования экономического механизма энергоснабжения промышленных предприятий исследовано Герасимовым И.А. в [10]. Автором предложены критерии и методы оптимизации данного механизма для повышения его эффективности. Исследование позволяет выявить проблемные области в управлении энергоснабжением и предложить меры для оптимизации и совершенствования этого процесса.

Гуляевым М.Ю. в [11] проведены анализ и исследование с определением комплекса мер, направленных на оптимизацию затрат предприятия на электроснабжение потребителей на примере промышленного предприятия.

Хафизов Х.И., Бозоров М.Б. в [12] разработали метод комплексного исследования энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий. Авторами предложена структурная схема расчета коэффициентов, которые характеризуют энергоэффективность системы электроснабжения промышленных объектов, а особенности построения систем электроснабжения промышленных предприятий исследовали Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. в [13]. Авторами проанализирована топология схем внутриводского электроснабжения, то есть внутренних систем, обеспечивающих электроэнергией промышленные объекты на предприятии. В ходе исследования проведена оценка эффективности функционирования таких схем.

Semenov A.S., Semenova M.N., Vebikhov Y.V. в [14] разработали универсальную математическую модель, которая представляет собой инструмент для анализа и оптимизации систем электроснабжения. В ходе исследования проведено тестирование модели при различных сценариях и проектах, что позволило сделать выводы о ее корректности и применимости для проектирования новых систем электроснабжения и реконструкции существующих.

Возможности повышения достоверности прогнозирования величины электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных предприятиях исследовали Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. в [15]. Авторами предложено использовать динамику изменения величины эквивалентного сопротивления внутриводских сетей электроснабжения для управления режимами расхода электроэнергии и внесения корректировок в процессы прогнозирования, а в [16] Gracheva E.I., Sinyukova T.V., Tabachnikova T.V., Alimova A.N. рассмотрели вопросы качества электроснабжения потребителей на промышленных предприятиях. Авторами проведен анализ расходов электроэнергии в зависимости от вида графиков нагрузки электропотребителей промышленных предприятий. В ходе исследования предложены различные схемы питания для технологической нагрузки с равномерными графиками нагрузки.

С.А. Тимчук и Н.С. Деренько [17] в своей статье рассмотрели оптимизацию системы электроснабжения промышленного предприятия при ее реконструкции. Авторами в результате проведенного исследования на примере конкретного предприятия получены три варианта оптимальной реконструкции системы электроснабжения, в зависимости от возможностей финансирования.

А.А. Галимовой в [18] рассмотрены критерии выбора коэффициента загрузки силового трансформатора при проектировании подстанций распределительных сетей. Автором исследовано влияние коэффициента загрузки силовых трансформаторов на их срок службы, проведены расчеты относительного срока службы силового трансформатора в зависимости от коэффициента загрузки. В результате исследования определены критерии выбора оптимального коэффициента загрузки трансформаторов, учитывающие мощность, структуру и типы потребителей электроэнергии, а В.М. Ефременко и Р.В. Беляевский в [19] провели анализ влияния коэффициента загрузки трансформаторов на величину потерь электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Авторами проведены расчеты потерь мощности и электроэнергии в трансформаторах. В результате исследования предложены рекомендации по рационализации работы силовых трансформаторов для уменьшения реактивной мощности, потребляемой трансформаторами. Данные рекомендации могут способствовать снижению потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий и повышению их энергоэффективности.

С.В. Подковальников, М.А. Поломошина в [20] исследовали возможность использования возобновляемых источников энергии, в частности солнечных батарей, для электроснабжения механического завода. Авторами предложено внедрение солнечных батарей и проведен расчет годового количества электроэнергии, которое может быть получено от использования таких источников. Результаты расчета показали, что возобновляемые источники энергии могут составить значительную долю в общем объеме электроснабжения предприятий.

Р.В. Беляевским в [21] проведен анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности. Проведены расчеты коэффициента реактивной мощности при различных значениях коэффициента загрузки асинхронных двигателей. Представлены аппроксимирующие графики зависимостей. Даны рекомендации по рационализации работы асинхронных двигателей для снижения величины реактивной мощности, потребляемой ими.

В.А. Негодаевым в [22] исследована оптимизация работы магистральной сети электроснабжения с ограниченной мощностью. В исследованиях учтен ряд параметров трансформаторов, которые играют важную роль в процессах преобразования энергии в сетях электроснабжения. В работе представлено обоснование перехода к магистральной структуре распределения электроэнергии, что является актуальной темой в современных системах электроснабжения, разработаны соответствующие математические модели, необходимые для проведения такого преобразования.

В [23] Е.В. Тумаевой, С.С. Кузиным, И.Ф. Афлятуновым, Т.Г. Максуевой рассматривается метод снижения потерь активной мощности в кабельных линиях на предприятиях нефтяной промышленности путем оптимального распределения реактивной мощности между компенсирующими устройствами. Проведен расчет потерь активной мощности в кабельных линиях, питающих асинхронные двигатели, для различных режимов нагрузки, что позволило оценить величину потерь и выявить основные факторы, влияющие на эффективность системы электроснабжения.

Комплекс научных подходов и технических мероприятий для повышения эффективности электроснабжения предприятий черной металлургии рассмотрен Г.П. Корниловым, А.Н. Шеметовым, В.В. Шохиним, Д.Ю. Усатым в [24]. В работе описываются принципы формирования математических моделей энергопотребления и основы их оптимизации, также приводятся примеры внедрения энергосберегающих мероприятий на заводских электростанциях. Опыт ПАО "ММК" по внедрению средств автоматизации в системах электроснабжения рассматривается в данном исследовании и позволяет снизить затраты на проектирование, пусконаладочные работы, монтаж и эксплуатацию при строительстве новых подстанций.

Н.В. Савиной, Ю.В. Мясоедовым и Л.А. Мясоедовой в [25] исследуются условия обеспечения оптимального уровня потерь электроэнергии в системах электроснабжения предприятий. Авторами предложена структура адаптивного управления уровнем потерь электроэнергии, которая учитывает технологические и электрические взаимосвязи оборудования, также предложена программа для управления потреблением электроэнергии на предприятиях, направленная на снижение потерь электроэнергии, выделены и проанализированы основные мероприятия, которые способствуют снижению потерь электроэнергии и повышению эффективности систем электроснабжения предприятий.

В [26] N. Grigorieva, L. Dobrovolska, D.Sobchuk, V. Shabaykovich, M. Romaniuk провели анализ эффективности систем электроснабжения предприятий. Авторами рассмотрены два вида систем электроснабжения, выявлено, что для выполнения оптимизации схем электроснабжения, сначала формируются основные факторы, определяющие эффективность системы, после этого выстраивается модель процессов оптимизации, позволяющей в дальнейшем уменьшить потери электроэнергии.

Разработка программного комплекса по оптимизации системы электроснабжения с целью минимизации потерь мощности рассматривают Хабдулина З.К., Хабдуллин А.Б., Хабдуллин А.Б. в [27]. Авторами используется модернизированный программный комплекс "SEZAM", с помощью которого рассчитаны потери активной мощности в системах электроснабжения предприятия, представлены графики потерь мощности, что позволит минимизировать потери мощности и нагрузки до 5 %.

А. Kodirov, M. Kobilov, Z. Tsuchiyev в [28] представили сведения о потреблении реактивной мощности на промышленных предприятиях, процессах ее генерации и компенсации. Исследованы условия выработки необходимого объема электроэнергетики для потребителей реактивной мощности, включающие выбор оптимальных источников, расчет и регулирование их мощности, а также рациональное размещение источников в системе электроснабжения. Результаты исследования позволяют оптимизировать процессы потребления, генерации и компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, что способствует повышению энергетической эффективности и снижению эксплуатационных затрат.

Модели и алгоритмы для информационных систем управления режимами электропотребления показывают V.I. Viryulin, V.N. Alyabyev в [29]. Разработаны критерии выбора эффективных мероприятий по снижению электропотребления в условиях ограниченных средств. Предложено регулирование уровней напряжения в качестве одного из возможных способов энергосбережения.

Комплексная оценка энергоэффективности системы электроснабжения промышленного предприятия рассматривается Павлюченко Д.А. и Любченко В.Я. в [30]. Авторами предложена модель оценки энергоэффективности системы электроснабжения промышленных объектов. Результатом работы является выражение, позволяющее определить рейтинг энергоэффективности предприятия, который в дальнейшем может быть использован в энергоменеджменте.

Оценку эффективности использования и распределения электрической энергии в системе электроснабжения промышленного предприятия рассматривает Каратаев П.Ю. в [31]. Автором проведено энергетическое обследование системы электроснабжения промышленного предприятия ОАО "Трансмаш". Выявлены основные причины нерационального расхода электроэнергии предприятием. Даны рекомендации по устранению этих причин.

Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. в [32] рассматривают надежность и эффективность современного электроснабжения. При этом авторами выявлены особенности современных систем электроснабжения, показаны возможные методы повышения эффективности электроснабжения потребителей, уточняются модели участков систем для проведения оценки технико-экономических потерь.

Анализ структуры электропотребления и оценка его эффективности в системе электроснабжения завода нефтяного электромашиностроения рассматриваются Гамидовым М.Г. и Тагизаде С.М. в [33]. Авторами исследованы вопросы регулирования режимов электропотребления при ограничении электроснабжения, проведен анализ электропотребления конкретными объектами и снижения потерь электроэнергии в элементах электрооборудования. Разработан алгоритм и программа определения величины расхода электроэнергии.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи является представление статистических данных промышленного производства объектов средней мощности и их анализ, результаты которого могут быть использованы для разработки и внедрения мероприятий по энергосбережению, снижению потерь электроэнергии и повышению энергетической эффективности промышленных предприятий.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключается в результатах проведенного анализа технико-экономических показателей некоторых основных производств и предложенной классификации объектов средней мощности стратегических отраслей промышленности РФ. Проведен анализ динамики изменения удельных расходов электроэнергии на отдельные виды промышленного производства на объектах средней мощности, проведен анализ изменения объемов производства отдельных видов продукции для основных стратегических отраслей промышленности за 2020-2021 года.

Материалы и методы

Анализ современного состояния стратегических отраслей промышленности.

В настоящее время промышленность России включает следующие основные конкурентоспособные отрасли (рис.1): лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная; легкая; пищевая; металлургическая (цветная, черная); химическая; машиностроительная; нефтеперерабатывающая; строительная.



Рис. 1. Основные отрасли промышленности России

Fig. 1. Main industries in Russia

По данным Федеральной службы государственной статистики на конец 2021 года, на территории России находится 310 814 промышленных предприятий. Наиболее распространенными потребителями электроэнергии в стране являются промышленные объекты средней мощности, от 5 до 75 МВт.

Промышленные объекты средней мощности предлагается классифицировать по следующим признакам (рис.2):

- По потребляемой мощности: 1) 5-20МВт; 2) 21-40МВт, 3) 41-75МВт.
- По характеру технологического процесса: 1) с непрерывным технологическим процессом; 2) с прерывным технологическим процессом.
- По количеству работающих на промышленном объекте: 1) до 50 человек; 2) 50-500 человек; 3) 500- 2500 человек; 4) свыше 2500 человек.
- По площади занимаемой территории: 1) до 0,5 га; 2) 0,5-5,0 га; 3) 5,0-25,0 га; 4) 25,0-200 га.



Рис. 2. Классификация объектов средней мощности

Fig. 2. Classification of medium power facilities.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

На рисунках 3 и 4 представлены данные по численности предприятий и занятых сотрудников на предприятиях средней мощности по отраслям промышленности.

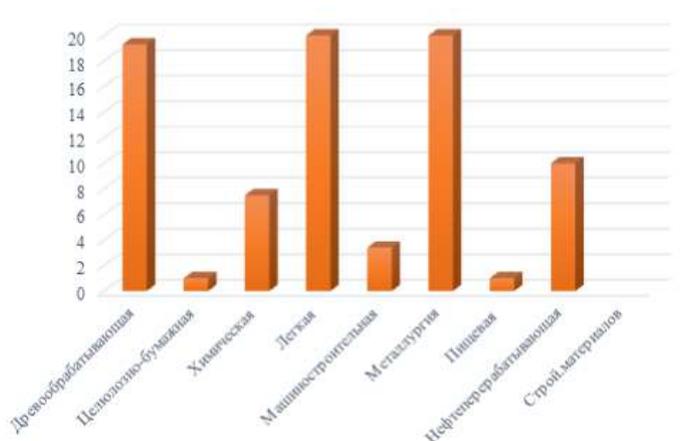


Рис. 3. Количество предприятий по отраслям промышленности.

Fig. 3. The number of enterprises by industry.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

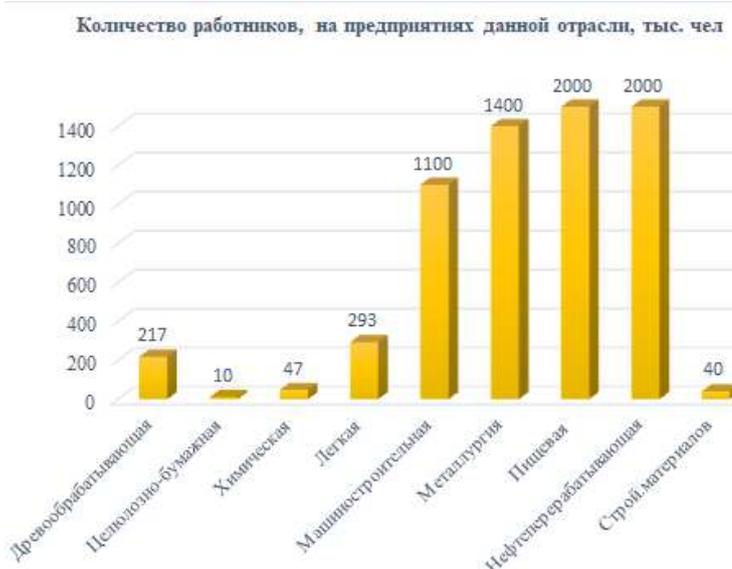


Рис. 4. Количество сотрудников, трудоустроенных на предприятиях по отраслям промышленности

Fig. 4. Number of people employed in enterprises by industry

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

К основным электроприемникам промышленных объектов средней мощности можно отнести: электроприводы различных станков и механизмов; различные виды электросварки как на однофазном токе, так и на постоянном токе, получаемом от преобразователей (сварочные машины шовные, стыковые, точечные). Они работают с постоянными большими бросками мощности, характеризуются большой частотой и малой продолжительностью включения. Также к основным электропотребителям относятся гальванопластика (автоматы для никелирования, цинкования деталей на подвесках и др.), преобразователи частоты (ПЧ) для электродвигателей (вентильные, машинные). ПЧ создают большие трудности для электроснабжения: колебания напряжения, искажение формы кривых либо тока, либо напряжения. Электротермическое регулируемое оборудование и установки (электрические печи, нагревательные аппараты) работают в продолжительном режиме.

В таблице 1 приведены основные виды электроприемников, мощность и возможные режимы работы предприятий по отраслям промышленности.

Таблица 1.
Table 1.

Общие данные по электропотребителям промышленных объектов средней мощности.
General data on electrical consumers of industrial facilities of average capacity.

Вид промышленности	Мощность предприятий, МВт	Основные электроприемники	Кол-во рабочих смен	Примеры предприятий
Легкая	15-45	АД, СД, осветительная нагрузка,	2,3	Ткацкие, обувные, меховые, прядильные фабрики
Пищевая	5-45	АД, СД, сушильные печи, жаровни, осветительная нагрузка	2,3	Элеваторы, мельницы, комбикормовые заводы, хлебзаводы
Металлургическая	5-75		3	Мартеновские, конвекторные, электросталеплавильные, прокатные
Химическая	5-75	АД, СД, электролиз, мешалки, центрифуги, осветительная нагрузка	3	Заводы изготовители полиэтилена, заводы изготовители красочных материалов
Деревообрабатывающая	5-75	АД, СД, смесители, рубительные аппараты, упаковочные аппараты, сушильные камеры, обжиговые печи	2,3	Заводы изготовления бумаги, лесозаготовительные заводы
Машиностроительная	5-50	АД, СД, электрические печи, конвейеры, краны, транспортеры, электролизные установки, сварочные аппараты,	2,3	Автомобильные заводы, авиационные заводы, кораблестроительные и др.
Промышленность строй. материалов	5-70	АД, СД, питатели, сушильные печи, осветительная нагрузка	2,3	Кирпичные, цементные, стекольные заводы
Нефтеперерабатывающая	5-50	АД, осветительная нагрузка, задвижки	2,3	Нефтеперерабатывающие заводы

В настоящее время возрастают объемы потребления топлива и энергии, значительно увеличиваются затраты на добычу, производство и транспортировку готовой продукции. Для эффективного функционирования предприятий применяется нормирование расходов энергоресурсов.

Под удельным расходом w понимается фактически полученное значение затраченной электроэнергии на единицу продукции или технологическую операцию, которое определяется по формуле:

$$w = \frac{W}{M}, \quad (1)$$

где W — фактический расход электроэнергии на выпуск продукции количества M (количество может измеряться в различных единицах).

В таблице 2 приведены примеры удельных расходов электроэнергии на производство некоторых отдельных видов продукции и работ для некоторых сфер промышленного производства [8].

Таблица 2.

Table 2.

Удельные расходы электроэнергии на производство продукции различных отраслей.
Specific electricity consumption for the production of various industries.

Вид продукции или работ (киловатт-часов/тонн)/год	1995	2000	2010	2015	2020
Добыча угля	36,2	26,8	22,7	20,0	20,4

Добыча нефти	102,9	98,6	107,9	127,4	122,7
Изготовление хлебобулочных изделий	103	189	203	212	233
Изготовление бумаги	810	1144	1093	1054	1016
Изготовление цемента	132	139	113	111	108
Прокат черных металлов	168,6	151,7	137,5	129,0	121,4
Изготовление электростали	781,5	714,1	564,7	537,4	552,6
Изготовление электроферросплавов	5268	5348	5337	5119	5154
Производство сахарного песка	72	65	55	52	50
Производство шёлка	2200	2125	2000	1800	1400
Просушивание зерновых	15	13	13	12	10
Производство консервной продукции(мясные/рыбные /плодоовощные)	70	60	55	52	45

Результаты исследований и данные таблицы 2 показывают, что на большую часть представленной продукции или производимых работ, значение удельных норм расхода электроэнергии уменьшается. Так, с 2010 по 2020 год удельные расходы снизились:

- на добычу угля – на 10%
- на изготовление цемента – на 4,4%
- на прокат черных металлов – на 11,7%
- на изготовление электростали – на 2,1%
- на изготовление электроферросплавов -на 4,4%
- на производство сахарного песка – на 9%
- на производство шелка – на 30%
- на просушивание зерновых – на 23,1%
- на производство консервной продукции – на 18,2%
- на изготовление бумаги – на 7,4%

На данную динамику влияет целый ряд технологических факторов, колебания которых носят случайный характер и подчиняются вероятностным законам. Данные изменения удельных норм обусловлены также изменением загрузки объектов, эксплуатационными режимами работы, составом сырья, изменением параметров выпускаемой продукции, изменением режимов работы и стоимости исходного сырья и оборудования. В то же время удельные расходы электроэнергии на добычу нефти возросли на 12,1 %, а на изготовление хлебобулочных изделий – увеличились на 12,9%. Данные результаты исследований показаны на рисунках 5 и 6.

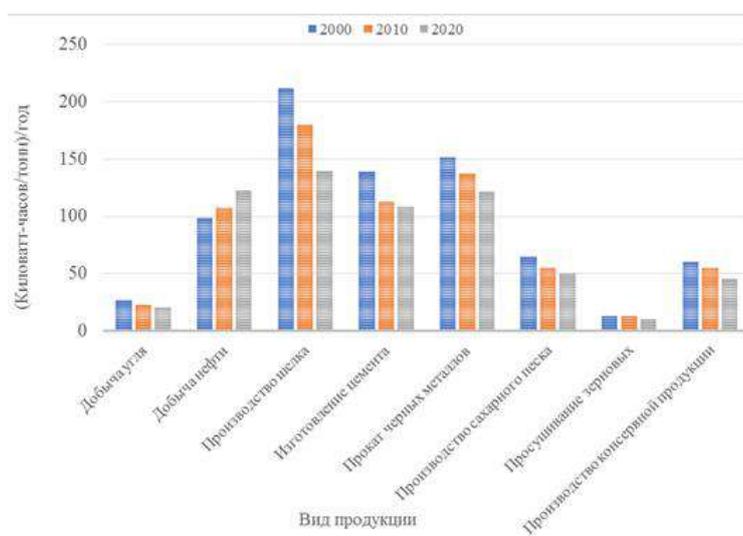


Рис. 5. Удельные нормы расхода электроэнергии на производство некоторых видов продукции за 2000, 2010 и 2020 г.г.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig. 5. Specific energy consumption rates for the production of certain products in 2000, 2010 and 2020.

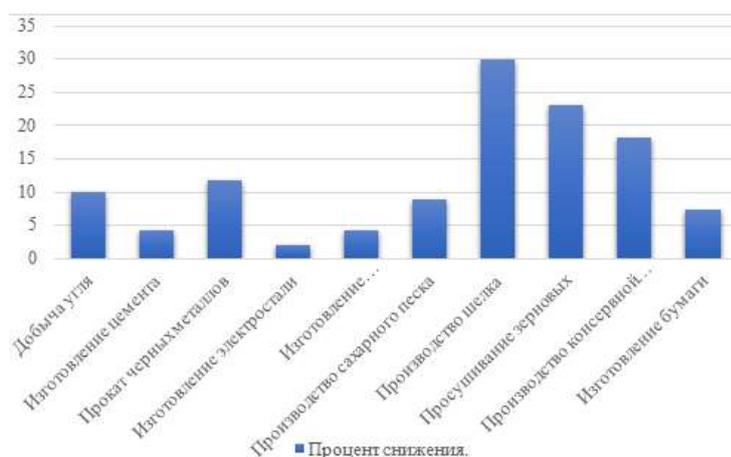


Рис. 6. Динамика изменения удельных норм расхода электроэнергии на производство отдельных видов продукции за 2010-2020 г.г.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig. 6. Dynamics of change in specific norms of electric power consumption for production of certain types of products for 2010-2020.

Данные по объемам продукции, произведенной некоторыми видами производств и промышленных предприятий в период за 2020 и 2021 год, показаны в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Объемы производства промышленных объектов различных сфер промышленности.
Volumes of production of industrial facilities in various fields of industry.

Вид произведенной продукции/год	2020г.	2021г.
Уголь, млн. тонн	36,6	38,7
Нефть, млн. тонн	39,1	46,2
Газ, млрд. тонн	58,4	60,1
Железородные окатыши, млн.тонн	4,4	4,59
Природный песок, млн. м ³	12,7	17,0
Пшеничная мука, млн. тонн	8,4	8,2
Макаронные изделия, тыс. тонн	117,75	126
Мясные полуфабрикаты, тыс. тонн	351,7	384
Сыворотки и вакцины, млрд. доз	1,3	1,6
Перевозочные материалы, млн. упаковок	29,0	25,1
Бензин, млн. тонн	38,4	40,8
Дизельное топливо, млн. тонн	77,9	80,3
Стальной листовой прокат, тыс. тонн	42,56	39,78
Лакокрасочные материалы, млн. тонн	1,2	1,5
Производство покрышек, камер, млн. штук	3,7	4,2
Легковые автомобили, млн. штук	1,26	1,36
Грузовые автомобили, тыс. штук	4,2	4,3
Вагоны пассажирские железнодорожные, тыс.штук	2,0	1,6
Вагоны грузовые магистральные широкой колеи, тыс.штук	57,1	63,1
Выработка электроэнергии на всех типах электростанций, млрд. кВт*ч.	108,5	114,0

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Диаграмма показывает, что во всех областях промышленности наблюдался рост выпуска произведенной продукции. В период с 2021 по 2022 год наблюдается, изображенная на рисунке 7, показывает, что в период с 2020 по 2021 год во некоторый временный спад производственных объемов, однако в первые месяцы 2023 года ситуация изменяется и планируется дальнейшее наращивание как ввода новых мощностей для генерации электроэнергии (Курская АЭС-2, Граматухинская ГЭС, Усть-Среднеканской ГЭС, Ленинградская АЭС-2), так и увеличения производства продукции, особенно в стратегических отраслях промышленности. Временный спад производства был связан, в

основном, дефицитом комплектующих, нарушением логистических цепочек, снижением экспорта, закрытием предприятий западных компаний в РФ. В настоящее время идет процесс переориентации и реформирования экономики, создания новых коммуникаций и логистических систем, а также успешного привлечения новых партнеров для совместных производств.



Рис. 7. Объемы производства отдельных видов продукции некоторых отраслей промышленности за период 2020-2021 г.г.

Fig. 7. Volumes of production of certain types of products of some industries for the period 2020-2021.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Классификация потребителей электроэнергии на промышленных объектах средней мощности по режимам работы.

- Как известно, по режимам работы электроприемники делятся на
- потребителей электроэнергии с неравномерным графиком нагрузки;
 - потребителей с равномерным графиком нагрузки.

К первой группе можно отнести всех потребителей, связанных с технологическим процессом, и условно их называть технологической нагрузкой.

Вторую группу разделим на две подгруппы:

- потребители, работающие круглосуточно, и не участвующие напрямую в основном технологическом процессе — круглосуточная нагрузка;
- потребители, работающие не круглые сутки и также не участвующие в технологическом процессе — некруглосуточной нагрузкой.

Как показали результаты исследований статистической информации, [16] потребители с равномерным графиком нагрузки расходуют 23 — 30% от общей доли электроэнергии промышленных объектов. При рассмотрении этой задачи на уровне цехов результаты несколько различаются. В таблице 4 приведена информация по некоторым промышленным объектам о доле электропотребления отдельными потребителями с равномерным графиком нагрузки от общего потребления электроэнергии цеха.

Таблица 4
Table 4

Доля электропотребления отдельными приемниками электроэнергии с равномерным графиком нагрузки от общего электропотребления цеха для отдельных промышленных объектов средней мощности.

Share of power consumption by individual power receivers with a uniform load schedule from the total power consumption of the shop for individual industrial facilities of average capacity.

Промышленный объект	Цех	% потребит. с равномерным графиком нагрузки от общей нагрузки цеха	% осветительной нагрузки от общей нагрузки цеха
Завод производства полиэтилена	Цех пиролиза	30	7
Авиастроительный завод	Токарный участок	9	10
Автомобильный завод	Сварочный участок	17	15
Консервный завод	Упаковочный участок	21	8
Завод химического машиностроения	Кислородная станция	50	6

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

В цехах и по предприятиям в целом осветительная нагрузка находится в пределах 6-15% [16]. Потребители с равномерным графиком нагрузки в цехах в зависимости от вида производства и технологических процессов в цехе по величине электропотребления могут значительно различаться. Все вышеперечисленное выдвигает дополнительные требования к системе электроснабжения объектов средней мощности, для которой необходимо: 1) иметь отдельное питание для потребителей, которые работают круглосуточно, со индивидуальным учетом расхода электроэнергии, к таким потребителям относятся электроприемники, имеющие длительный режим работы с практически постоянным графиком нагрузки; 2) иметь отдельное питание для нагрузок, работающих в технологических сменах с возможностью учета потребления электроэнергии по отдельным технологическим циклам.

Для уменьшения расхода электроэнергии на промышленных объектах средней мощности возможным мероприятием является отключение части трансформаторов в нерабочее время и модернизация схемы системы электроснабжения. Для чего необходимо выделить потребителей с равномерным графиком нагрузки и подключить их к отдельному источнику питания. При этом целесообразность технических решений определяется на основании технико-экономической оценки.

Обсуждение результатов.

Проведенные исследования и анализ статистических данных показали, что для промышленных объектов средней мощности доля потребителей с равномерным графиком нагрузки составляет 23-30% от общей доли потребления электроэнергии всем предприятием. Установлено, что чем меньше установленная мощность электропотребителей предприятия, тем больше величина мощности нагрузки с равномерным графиком электропотребления. По результатам исследований выявлено, что мощность систем освещения составляет 10-15% от общей нагрузки. Определен состав электрооборудования и электроприемников, представляющих технологическую, круглосуточную и некруглосуточную нагрузку для предприятий основных стратегических отраслей промышленности.

В связи с наблюдающимся ростом стоимости электроэнергии, возникает задача снижения потерь электроэнергии в элементах электрооборудования в нерабочее время путем модернизации схем систем электроснабжения.

Выводы

1. Представлен анализ и предложена классификация объектов средней мощности основных системообразующих отраслей промышленности России.
2. Показана динамика изменения удельных расходов электроэнергии на отдельные виды промышленного производства объектов средней мощности. С 2010 по 2020 год наибольшее снижение удельных расходов электроэнергии наблюдается для производства - просушивания зерновых – на 23,1%, на производство консервной продукции – на 18,2%.
3. Приведена динамика изменения (увеличения) объемов производства отдельных видов продукции основных стратегических отраслей промышленности за период 2020-2021 г.г..
4. Для отдельных объектов средней мощности определена доля электропотребления основными приемниками электроэнергии с равномерным графиком нагрузки от общего электропотребления цеха, которая составляет от 9 до 50% на исследуемых предприятиях.

Литература

1. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019.Т. 11. №4(44). С. 22-29.
2. Дробов А.В. Рациональные схемы электроснабжения промышленных транспортных объектов // Завалишинские чтения 17 // 2017. С. 152-153.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследование методов расчета электрических нагрузок цеховых систем промышленного электроснабжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 1 (52). С. 54-59.
4. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92.
5. Шагидулин А.В. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕНЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 12-1.С. 43-48.
6. Зацепина В.И. Математическое описание функционирования систем электроснабжения промышленных производств// Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. №4(54). С. 50-58.
7. Горлов А.Н., Филатов Е.А. Математическая модель оптимизации системы электроснабжения промышленного предприятия. // Закрытое акционерное общество "Университетская книга"(Курск). 2013. С.332-334
8. Мятишкин Г.В., Бирюк В.В., Прохорова А.С. Определение энергоэффективности системы электроснабжения промышленного предприятия через оценку режимов потребления электрической энергии. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т.18.№4.С.181-183
9. Малафеев А.В., Игуменцев В.А., Хламова А.В. Алгоритм оптимизации распределения активной мощности между электростанциями промышленного предприятия и узлами связи с энергосистемой с учетом потерь в распределительной сети // Промышленная энергетика. 2011. № 9. С. 16-21. EDN OGHOPN.
10. Герасимов И.А. Критерии оптимизации механизма энергоснабжения предприятия // Эффективное антикризисное управление. 2013. № 1(76). С. 98-102. EDN PXFAXX.
11. Гуляев М.Ю. Оптимизация затрат на электроснабжение промышленных предприятий / М. Ю. Гуляев // Вестник магистратуры. 2015. № 5-1(44). С. 35-39. EDN TUUGLN.
12. Хафизов Х.И., Бозоров М.Б. Разработка метода комплексного исследования энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий.// Служение Науки. Международный научно-исследовательский конкурс. 2021. С. 12-19.
13. Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280798.
14. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
15. Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. Power engineering: research, equipment, technology. 2022; №. 24(6) Pp. 3-12. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
16. Е.И. Грачева, Т.В. Синюкова, Т.В. Табачникова, А.Н. Алимова Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий. 2022. С.40-42, 78-82.
17. Тимчук С.А., Деренько Н.С. Оптимизация системы электроснабжения промышленного предприятия при ее реконструкции. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. С. 4-8
18. Галимова А.А. Критерии выбора коэффициента загрузки силового трансформатора при проектировании подстанций распределительных сетей. / А.А. Галимова // Известия высших учебных заведений. 2013. С. 66-71
19. Ефременко В.М., Р.В. Беляевский Анализ коэффициента загрузки силовых трансформаторов в электрической сети промышленного предприятия. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. С.69-71

20. Подковальников С.В., Поломшина М.А. Интеграция возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия. // iPolitech Journal. 2018. С.182-198

21. Беляевский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности. / Р.В. Беляевский // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. С. 66-69

22. В.А. Негодаев. Оптимизация магистральной сети электроснабжения ограниченной мощности / В.А. Негодаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. С. 143-153.

23. Е.В. Тумаев, С.С. Кузин, И.Ф. Афлятунов, Т.Г. Максеева Решение задачи оптимального распределения мощности индивидуальных компенсирующих устройств для группы асинхронных двигателей. / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2020. С. 175-192

24. Г.П. Корнилов, А.Н. Шеметов, В.В. Шохин, Д.Ю. Усатый Опыт внедрения энерго-и ресурсосберегающих технологий в системах электроснабжения металлургического предприятия. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2022. С. 12-20

25. Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.А. Мясоедова Обеспечение оптимального уровня потерь электроэнергии в системах электроснабжения предприятий. // Вестник Амурского государственного университета. Электротехника. 2021. С. 61-68

26. N. Grigorieva, L. Dobrovolska, D.Sobchuk, V. Shabaykovich, M. Romaniuk Performance efficiency analysis of electric power supply systems. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2017. С. 34-40.

27. Хабдулина З.К., Хабдуллин А.Б., Хабдуллин А.Б. Разработка программного комплекса по оптимизации системы электроснабжения с целью минимизации потерь мощности. Федоровские чтения. Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. 2017. С. 128-134.

28. A. Kodirov, M. Kobilov, Z. Toychiyev ANALYSIS OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN INDUSTRIAL ENTERPRISES, ITS IMPORTANCE AND PRODUCTION METHODS. // Universum: технические науки. 2021. С. 103-108.

29. V.I. Biryulin, V.N. Alyabyev Mathematical model and algorithms for reasonable power saving management systems. // European science review. 2015. С 159-164.

30. Павлюченко Д.А., Любченко В.Я. Комплексная оценка энергоэффективности системы электроснабжения промышленного предприятия. // Научный вестник Новосибирского Государственного Университета. 2012. С. 119-128.

31. Каратаев П.Ю. Оценка эффективности использования и распределения электрической энергии в системе электроснабжения промышленного предприятия. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. С. 103-106

32. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения. // Научно-издательский центр "21 век". 2021. С.1-160.

33. Гамидовым М.Г., Тагизаде С.М. Анализ структуры электропотребления и оценка его эффективности в системе электроснабжения завода нефтяного электромашиностроения. // Синергия наук. 2020. С. 276-283

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Ибатуллин Эдуард Эльсович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Петрова Рената Маратовна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Синюкова Татьяна Викторовна – к.т.н., доцент Липецкого государственного энергетического университета.

References

1. Gracheva EI, Gorlov AN, Alimova AN. Research and evaluation of power losses in intrashop power supply systems. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2019;11;4(44);22-29.
2. Drobov A.. Rational schemes of power supply of industrial transport objects. *Zavalishinskie readings* 17. 2017.pp. 152-153.
3. Gracheva EI, Naumov OV. Research methods for calculating electrical loads of shop-floor industrial power supply systems. *Electricity. Transmission and distribution*. 2019;1 (52):54-59.
4. Gracheva EI, Alimova AN. Possible errors in calculations of power losses in the shop industrial networks. *Izvestiya vysokikh izuchenii. PROBLEMS OF ENERGY*. 2018;20:11-12:81-92. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92.
5. Shagidulin A.V. EFFICIENCY OF REPLACEMENT OF LOW-VOLTAGE COMMUTATION APPLICATIONS AT THE EXAMPLE OF AN INDUSTRIAL PROPERTY. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2017;12-1:43-48.
6. Zatsepina VI. Mathematical description of the functioning of power supply systems of industrial production. *Vesti vesti vysshee izuchenii Chernozem'ya*. 2018;4(54):50-58.
7. Gorlov AN, Filatov EA. *Mathematical model of optimization of power supply system of industrial enterprise*. Closed Joint-Stock Company «University Book»(Kursk). 2013. P.332-334
8. Myatishkin GV, Biriuk VV, Prokhorova AS. Determination of the power supply efficiency of an industrial enterprise by estimation of the modes of electric energy consumption. *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(4):181-183
9. Malafeev AV, Igumenshev VA, Khlamova AV. Algorithm of optimization of active power distribution between power plants of an industrial enterprise and nodes of communication with the power grid, taking into account losses in the distribution network. *Industrial Energy*. 2011;9:16-21. EDN OGHOPN.
10. Gerasimov IA. Criteria for optimizing the energy supply mechanism of an enterprise. *Effective anti-crisis management*. 2013;1(76):98-102. EDN PXFAXX.
11. Gulyaev MY. Optimization of costs for power supply of industrial enterprises / M.Y. Gulyaev. *Bulletin of Magistracy*. 2015;5-1(44):35-39. EDN TUUGLN.
12. Khafizov HI, Bozorov MB. *Development of a method of comprehensive research of energy efficiency of power supply system of industrial enterprises*. Service of Science. International research competition. 2021. P. 12-19.
13. Gracheva E, Gorlov A, Alimova A. *Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises*. International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913. doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280798.
14. Semenov AS, Semenova MN, Bebikhov YV. *Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise*. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. P. 1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
15. Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Alzakkar A, et al. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
16. Gracheva EI, Sinyukova TV, Tabachnikova TV. *Optimization of power supply schemes of industrial enterprises*. 2022. P.40-42, 78-82.
17. Timchuk SA, Derenko NS. Optimization of power supply system of industrial enterprise during its reconstruction. *East-European Journal of Advanced Technologies*. 2013. P. 4-8.
18. Galimova AA. *Criteria for selecting the load factor of a power transformer in the design of distribution network substations*. Proceedings of higher education institutions. 2013. P. 66-71.
19. Efremenko VM, Belyaevsky RV. Analysis of load factor of power transformers in the electrical network of an industrial enterprise. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010. P.69-71.
20. Podkoyalnikov SV, Polomshina MA. Integration of renewable energy sources into power supply system of industrial enterprise. *Politech Journal*. 2018. P.182-198.
21. Belyaevskiy R.V. Analysis of the influence of induction motor load factor on reactive power consumption. *Vestnik of the Kuzbass State Technical University*. 2010. P. 66-69.
22. Negodaev VA. Optimization of the main power supply network of limited capacity. V.A. Negodaev. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017. P. 143-153.
23. Tumaev EV, Kuzin SS, Aflyatunov IF, et al. The solution of problem of optimal power distribution of individual compensating devices for a group of induction motors. *Vestnik of Perm National Research Polytechnic University*. 2020. P. 175-192.

24. Kornilov GP, Shemetov AN, Shokhin VV. Usatiy Experience of implementing energy- and resource-saving technologies in power supply systems of metallurgical enterprise. (in Russian). *Bulletin of South Ural State University*. 2022. P. 12-20.

25. Savina NV, Myasoedov YuV, Myasoedova LA. Ensuring the optimal level of power losses in the power supply systems of enterprises. (in Russian). *Vestnik of Amur State University. Electrotechnics*. 2021. P. 61-68

26. Grigorieva N, Dobrovolska L, Sobchuk D, Shabaykovich V. Romaniuk Performance efficiency analysis of electric power supply systems. *East European Journal of Advanced Technologies*. 2017. C. 34-40.

27. Khabdulina ZK, Khabdullin AB, Khabdullin AB. *Development of software complex for optimization of power supply system to minimize power losses*. Fedorovsky readings. International scientific and practical conference with elements of scientific school. 2017. P. 128-134.

28. Kodirov A, Kobilov M, Toychiyev Z. ANALYSIS OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN INDUSTRIAL ENTERPRISES, ITS IMPORTANCE AND PRODUCTION METHODS. *Universum: Technical Sciences*. 2021. P. 103-108.

29. Biryulin VI., Alyabyev VN. Mathematical model and algorithms for reasonable power saving management systems. *European science review*. 2015. P. 159-164.

30. Pavlyuchenko DA., Lyubchenko V.Ya. Integrated assessment of energy efficiency of power supply system of an industrial enterprise. *Scientific Bulletin of Novosibirsk State University*. 2012. P. 119-128.

31. Karataev PYu. *Assessment of efficiency of use and distribution of electric energy in the power supply system of an industrial enterprise*. Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2013. P. 103-106

32. Papkov BV, Ilyushin PV, Kulikov AL. Reliability and efficiency of modern power supply. Scientific-publishing center "21 century". 2021. P.1-160.

33. Gamidov MG., Taghizadeh S.M. Analysis of the structure of electricity consumption and assessment of its efficiency in the power supply system of the plant of oil electric machine building. *Synergy of sciences*. 2020. P. 276-283

Authors of the publication

Edvard Yu. Abdullazyanov – rector of Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the University of Electric Power Industry, Kazan State Power Engineering University.

Eduard Ibatullin – Master of Technology and Technology, graduate student of the Institute of Electric Power Engineering of Kazan State Power Engineering University.

Renata M. Petrova – Postgraduate student of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University.

Tatiana V.Sinyukova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lipetsk State Energy University.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Смежные специальности в рамках групп научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика

Получено

17.05.2023г.

Отредактировано

29.05.2023г.

Принято

30.05.2023г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.316.1.05: 621.316.12: 621.316.15: 621.311.1: 621.3.029.4/79

ОБЗОР ОДНОПРОВОДНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Виноградов А.В.¹, Юферев Л.Ю.¹, Большев В.Е.¹, Гусаров В.А.¹, Букреев А.В.¹, Бородин М.В.²

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

²Орловский государственный аграрный университет

vadimbolshev@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Однопроводная передача электроэнергии является одним из вариантов снижения капитальных затрат на строительство линии электропередачи за счет использования меньшего количества проводов, арматуры и более легких опор ЛЭП при одновременном снижении эксплуатационных расходов. Информационный поиск выявил четыре варианта однопроводных систем электроснабжения: однофазная система электропередачи с возвратом тока через землю SWER, однопроводная сбалансированная линия В-Line, резонансные системы беспроводной передачи электрической энергии при использовании дополнительной соединяющей линии между высоковольтными трансформаторами SWPT, но наибольший интерес вызывает резонансные однопроводные системы передачи энергии из-за отсутствия подробного структурированного материала, описывающего эту технологию. **ЦЕЛЬ.** Описание технических решений, преимуществ и проблем использования резонансных систем передачи электрической энергии по одному проводу. **МЕТОДЫ.** В статье использованы методы поиска и анализа информации, патентного анализа, литературного обзора по теме «Системы передачи электрической энергии по однопроводной кабельной линии». В качестве источников информации были использованы: поисковые системы Yandex и Google, научные базы данных Scopus и Google Scholar, электронная библиотека КиберЛенинка, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore, IGI Global. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе исследования были представлен обзор литературных источников, посвященных резонансным однопроводным системам передачи энергии, и подробно освещена история развития и структура этих систем, описаны их особенности, преимущества и проблемы использования, а также опыт внедрения и области их применения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В ходе информационного поиска было установлено, что для передачи электрической энергии удаленным потребителям, наиболее многообещающими являются однопроводные системы на резонансной технологии. Данные системы обладают высоким уровнем электробезопасности за счет особенностей резонансного режима работы. Они надежно защищены от несанкционированного отбора электроэнергии, а также обладают впечатляющей экономической эффективностью. Передавая мощность и расстояние, на которую можно её передать, также значительно превосходят возможности остальных однопроводных систем.

Ключевые слова: *системы однопроводной передачи электроэнергии; резонансная передача электроэнергии; электроснабжение отдаленных объектов; трансформаторы Тесла.*

Для цитирования: Виноградов А.В., Юферев Л.Ю., Большев В.Е., Гусаров В.А., Букреев А.В., Бородин М.В. Обзор однопроводных резонансных систем передачи электрической энергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т.15. № 2(58). С. 109-127.

REVIEW OF SINGLE-WIRE RESONANT ELECTRICAL POWER TRANSMISSION SYSTEMS

AV. Vinogradov¹, LYu. Yuferev¹, VE. Bolshev¹, VA. Gusarov¹, AV. Bukreev¹,
MV. Borodin²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM

²Orel State Agrarian University

vadimbolshev@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* Single-wire transmission of electricity is one option to reduce the capital cost of transmission line construction by using fewer wires, fittings and lighter transmission towers while reducing operating costs. Information search revealed four options for single-wire power supply systems: SWER single-wire power transmission system with earth return, B-Line single-wire balanced line, resonant wireless power transmission systems using an additional connecting line between SWPT high-voltage transformers, but resonant single-wire transmission systems are of most interest due to the lack of detailed structured material describing this technology. *PURPOSE.* To conduct an information search on the topic "Systems for the transmission of electrical energy through a single-wire cable line." *METHODS.* The article uses methods of searching and analyzing information, patent analysis, literature review on the topic "Systems for the transmission of electrical energy through a single-wire cable line." The following sources of information were used: Yandex and Google search engines, Scopus and Google Scholar scientific databases, CyberLeninka electronic library, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore, IGI Global. *RESULTS.* In the course of the research, a review of the literature on resonant single-wire power transmission systems was presented with describing the history of the development and structure of these systems in detail, their features, advantages and problems of use, as well as implementation experience and areas of their application. *CONCLUSION.* During the information search, it was found that for the transmission of electrical energy to remote consumers, the most promising are single-wire systems based on resonant technology. These systems have a high level of electrical safety due to the peculiarities of the resonant mode of operation. They are reliably protected from unauthorized power consumption, and also have impressive economic efficiency. Transmitting power and distance over which it can be transmitted also greatly exceeds the capabilities of other single-wire systems.

Keywords: *Single-wire Transmission; Resonant Power Transmission; Remote Settlement Supply; Tesla transformers.*

For citation: Vinogradov AV, Lansberg AA, Volchkov YuD, Vinogradova AV. Review of single-wire resonant electrical power transmission systems. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN.2023;15;2(58):109-127.

Введение (Introduction)

Электроснабжение, как и обеспечение другими видами ресурсов, является одной из основ эффективного сельского хозяйства. Однако, вследствие сокращения числа людей, проживающих в сельских населённых пунктах, появилось большое количество линий электропередачи, питающих малую нагрузку при большой протяжённости данных линий, что привело к увеличению стоимости электроэнергии, поскольку обслуживание ЛЭП в большинстве таких случаев необходимо несмотря на отсутствие экономической эффективности. В России для снижения социальной напряженности эти затраты закладываются в тариф для предприятий согласно философии перекрёстного субсидирования, что, в свою очередь, приводит к росту себестоимости их продукции и снижению конкурентоспособности. Согласно расчётным данным, стоимость строительства линии электропередачи составляет крупные суммы. Так, в РФ стоимость строительства ЛЭП 10 кВ в настоящее время составляет порядка 2-3 миллионов рублей за один километр [1], в США - 45 тыс. долларов за одну милю [2]. При мощности нагрузок линии в несколько кВт эти затраты могут не окупиться, хотя нести их электросетевой организации всё равно необходимо по социальным причинам [3]. Вариантами сокращения затрат на строительство и эксплуатацию ЛЭП является применение однопроводных линий электропередачи, позволяющих снизить капитальные затраты за счет использования меньшего количества

проводников, арматуры и облегчения опор ЛЭП, при этом затраты на эксплуатацию также будут снижены.

Информационный поиск выявил четыре варианта однопроводных систем электроснабжения: однофазная система электропередачи с возвратом тока через землю SWER, однопроводная сбалансированная линия В-Line, резонансные системы беспроводной передачи электрической энергии при использовании дополнительной соединяющей линии между высоковольтными трансформаторами SWPT и резонансные системы передачи электрической энергии по одному проводу. Каждая из систем обладает своими преимуществами и недостатками и имеет свою область применения, однако для передачи электрической энергии потребителям, удаленным от централизованной системы электроснабжения, наиболее подходящими являются SWER системы и системы на резонансной технологии, предложенной во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). Однако, если SWER системы хорошо изучены и разрешены, применяются во многих странах, то резонансные системы являются слабоизученными, сложными в устройстве и в эксплуатации. Обзор литературных источников показал отсутствие полной и подробной информации, описывающей эту технологию.

Цель исследования заключается в описании технических решений, преимуществ и проблем использования резонансных систем передачи электрической энергии по одному проводу. Теоретическое значение работы заключается в обзоре методов однопроводной передачи электроэнергии, практическое – в выявлении их преимуществ и недостатков, применимости в различных условиях.

Материалы и методы (Materials and methods)

Статья представляет собой описание информационного поиска на предмет уникальности технических решений, выполненного по договору на НИОКР «Разработка системы передачи электрической энергии по однопроводной кабельной линии напряжением более 1 кВ в резонансном режиме на повышенной частоте мощностью не менее 7 кВт на расстояние не менее 3 км» для нужд ПАО «Россети Центр и Приволжье». Были использованы методы поиска и анализа информации, патентного анализа, литературного по теме «Системы передачи электрической энергии по однопроводной кабельной линии»,

В качестве источников информации были использованы: поисковые системы Yandex и Google, научные базы данных Scopus и Google Scholar, электронная библиотека КиберЛенинка, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore, IGI Global. В литературный анализ вошли 58 источников, наиболее подходящих к теме исследования, из них 9 источников – интернет ресурсы, 49 – рецензируемые статьи и материалы конференции; 10 источников информации представлены на английском языке, 48 – на русском.

Статья организована в следующем виде. Раздел 2 описывает структуру и историю развития систем, а раздел 3 посвящен методу стабилизации выходного напряжения. Особенности, преимущества и проблемы использования однопроводных резонансных систем передачи электроэнергии, а также опыт и области их применения рассмотрены в разделах 4 и 5 соответственно. Исследование завершается обобщающей дискуссией, представленной в разделе 6.

2 Структура и история создания резонансных систем однопроводной передачи электрической энергии

2.1 История создания однопроводной резонансной системы передачи электрической энергии

Идея создания однопроводной резонансной системы передачи электроэнергии, основанная на двух резонансных трансформаторах и линии электропередачи, была запатентована Н. Тесла в 1897г [4] (Патент US593138A [5]). Схема этой резонансной системы представлена на рисунке 1. На рисунке 1 А — это сердечники (магнитные) двух трансформаторов, В – вторичные катушки, намотанные на сердечники А, С — первичные катушки, намотанные рядом с В. При этом, одни выводы вторичных катушек В находятся в центре витков спиралей и соединены между собой линией передачи. Другие выводы катушек В заземлены. В качестве источника энергии используется машинный генератор G, а приемников - лампы Н и двигатели К. Принцип работы основан на преобразовании тока низкой частоты повышающим трансформатором, затем передачи его с помощью линии электропередачи на понижающий трансформатор, и уже ток, преобразованный до низкой частоты, подается на питание электроприборов. При этом, должен соблюдаться надлежащий импеданс за счет настройки на электрический резонанс с помощью катушки индуктивности, настроенную на требуемую частоту, что позволяет убрать реактивное

сопротивление собственной емкости и использовать её в качестве обратной цепи вместо провода.

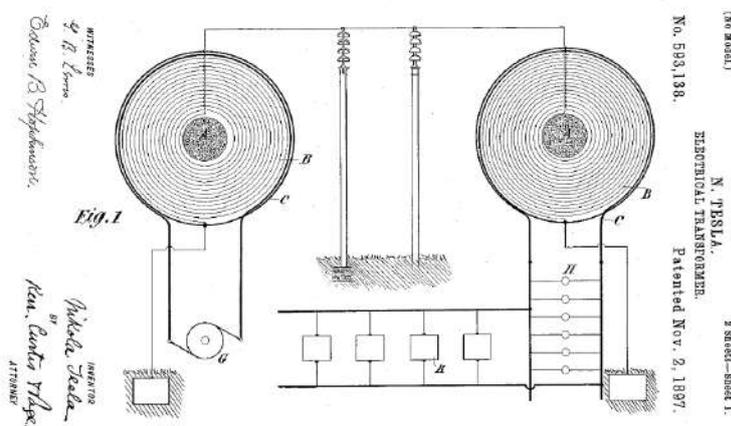


Рис. 1. Резонансная система передачи электроэнергии Н. Тесла

*Source: Patent US593138A [6].

*Источник: Патент US593138A [6].

Несмотря на то, что метод передачи электрической энергии, предложенный Н. Тесла, был известен с 1897 г., его развитие, а тем более практическое применение, не нашли поддержки общества из-за сложной конструкции и ряда нерешаемых задач на то время. Поэтому способ передачи электроэнергии по однопроводной линии в резонансном режиме был забыт до конца 20 века. Возрождение интереса к этим системам стало возможно по нескольким причинам: во-первых, за прошедшее время появились новые технологии и элементная база, способная справиться с изначальными проблемами и, во-вторых, благодаря переоткрытию данного способа русским инженером Авраменко С. В. Необходимо отметить, что информационный поиск по техническим решениям в области резонансных систем передачи электрической энергии по одному проводу также выявил, что основные разработки велись (и ведутся) как раз в России коллективом ученых, коллегами Авраменко.

Первое упоминание о резонансных системах Авраменко С. В., относится к эксперименту, проведенному в июле 1990 года в лаборатории Московского энергетического института [7, 8]. Эксперимент заключался в передаче мощности 1,3 кВт по одному вольфрамовому проводу длиной 2,75 м и диаметром 20 микрон. Основой устройства для однопроводной передачи энергии послужила знаменитая «вилка Авраменко» [9], которая представлена на рисунке 2.

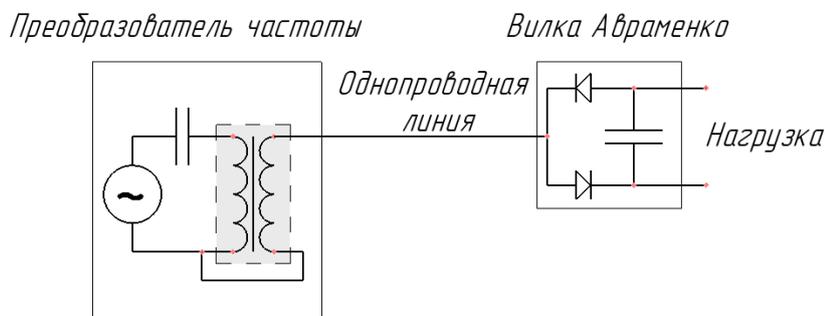


Рис. 2. Схема вилки Авраменко.

Fig. 2. Scheme of Avramenko's fork.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Вилка Авраменко состояла из двух полупроводниковых диодов, соединенных друг к другу катодом и анодом, к свободным концам которых подключен конденсатор [10]. Соединенные между собой концы диодов были подключены к машинному генератору (8 кГц, 100 кВт). В качестве нагрузки использовались лампы накаливания. Подробное описание процедуры расчета «вилки Авраменко» представлено в работе [11]. Автор

дополнил представленную выше схему конденсаторами небольшой емкости, моделирующими ток смещения между нагрузкой и корпусом генератора синусоидального напряжения низкой частоты. «Вилка Авраменко», объективность применения однопроводных систем передачи электрической энергии в системе электроснабжения и возможные ниши применения таких систем рассмотрены в [12]. Необходимо отметить, что опыты Авраменко является обсуждаемой темой на различных интернет-ресурсах в России, а энтузиасты проводят похожие опыты, чтобы подтвердить возможность передачи энергии по разработанному им способу [13–18].

Дальнейшее развитие резонансных систем передачи электроэнергии получило свое продолжение в стенах Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) (в 2016 г вошел в состав Федерального научного агроинженерного центра ВИМ) в коллективе ученых, к которым присоединился Авраменко С.В., под руководством академика РАН Стребкова Д.С. [9].

2.2 Структура однопроводной резонансной системы передачи электрической энергии

В настоящем обзоре рассмотрена структура однопроводной резонансной системы передачи электрической энергии, разработанная Авраменко С.В. (Патент US6104107A [19]) и уже усовершенствованная во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) [20, 21]. Особенности физических процессов при передаче электрической энергии по резонансной однопроводной линии электропередачи и её преимущества представлены в [22, 23].

На рисунке 3 представлена схема однопроводной резонансной электрической системы, состоящей из двух резонансных трансформаторов (модифицированных трансформаторов Тесла) 2 и 4 с частотой 5...15 кГц и однопроводной линии 3 с напряжением 1...10 кВ при работе в резонансном режиме. Отличительной особенностью применяемых трансформаторов, от стандартных трансформаторов на 50 Гц является асимметрия потенциалов на выводах высоковольтной обмотки относительно Земли, отсутствие трансформаторного масла и сердечника. Резонансные трансформаторы состоят из силового резонансного контура и повышающей/понижающей обмотки. Питание схемы осуществляется от системы электроснабжения промышленной частоты 50-60 Гц, которое преобразуется преобразователем частоты 1 в ток повышенной частоты 5...15 кГц и подается на резонансный контур повышающего трансформатора

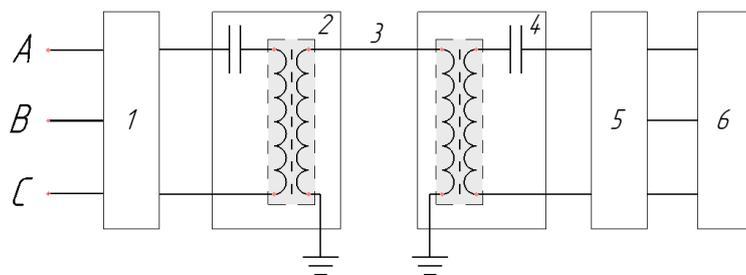


Рис. 2. Схема однопроводной системы передачи электроэнергии: 1 – преобразователь частоты; 2 – резонансный контур повышающего трансформатора; 3 – однопроводная линия; 4 – резонансный контур понижающего трансформатора; 5 – выпрямитель-инвертор; 6 – нагрузка

Fig. 3. Diagram of a single-wire power transmission system: 1 - frequency converter; 2 - resonant circuit of the step-up transformer; 3 - single-wire line; 4 - resonant circuit of the step-down transformer; 5 - rectifier-inverter; 6 - load

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

При правильном расчете индуктивностей обмоток и емкостей, включающих межвитковую ёмкость трансформаторов, на заданной частоте достигается резонанс напряжения, выражающийся известной формулой 1. При этом необходимо, чтобы резонансные контуры повышающего и понижающего трансформаторов имели равные произведения индуктивностей и емкостей.

$$T = \sqrt{L \times C} \quad (1)$$

Обязательным условием обеспечения резонансного режима работы является использование правильной частоты подаваемого тока, зависящее от длины линии. В данном случае необходимо, чтобы длина линии l равнялась целому числу половин волны λ :

$$l = n \lambda / 2 \quad (2)$$

Таким образом, при выполнении оговоренных условий в линии 3 будет наблюдаться возникновение стоячих волн за счет наложения друг на друга падающих и отражённых волн, при этом подаваемый в линию ток будет сдвинут по отношению к напряжению на 90. То есть, в начале и конце линии будут наблюдаться неизменяющиеся во времени пучности реактивного тока (максимальная амплитуда), а также узлы напряжения, то есть электрический потенциал наружного вывода высоковольтной обмотки трансформаторов равен нулю и эти выводы можно заземлить, что обычно и выполняется на практике для повышения электробезопасности устройства.

В резонансном режиме передача электрической энергии осуществляется с помощью реактивного тока перезарядки собственной ёмкости линии или, по Максвеллу, тока смещения, а так как активный ток в линии отсутствует из-за разомкнутой линии, то Джоулевы потери на нагрев проводника минимальны. При этом, необходимо понимать, что частоты 50–60 Гц, используемые в традиционных системах передачи электроэнергии, практически не применимы для обеспечения резонанса, так одно из условий резонанса является использование ЛЭП с длиной, кратной половине длины волны электрического тока (для тока частотой 50 Гц равна 3000 км).

Более подробная информация о составе оборудования резонансных систем передачи электроэнергии, принципе их работы и основные расчётные данные этой системы представлены в работе [24]. Отмечено, что передающий трансформатор в рассматриваемой системе передачи электроэнергии является резонансным, задающим частоту работы всей системы, а приёмный трансформатор — широкополосный понижающий. Схема преобразователя напряжения однопроводной системы передачи электроэнергии, включающий резонансные трансформаторы, показана на рисунке 4, согласно которой резонансные трансформаторы (Тр1 и Тр2) состоят из силового резонансного контура C2L1 и повышающей/понижающей обмотки L2. Основными элементами резонансного преобразователя, являются силовые ключи K1 и K2, блок управления БУ и резонансный трансформатор, состоящий из емкости C2 и обмоток L1 и L2. Резонансная частота системы в основном определяется параметрами элементов C2L1. На частоту оказывает влияние емкость линии электропередачи, которая через трансформатор Тр1 добавляется к задающему конденсатору C2 и соответственно понижает собственную резонансную частоту контура C2L1. Необходимо отметить, что приёмный трансформатор не оказывает влияния на частоту, на которую настроена резонансная система передачи электроэнергии. Главное, что оказывает влияние на частоту является мощность нагрузки, поэтому к резонансной линии электропередачи может подключаться любое количество приемных трансформаторов с условием, что их суммарная мощность не превысит мощность передающего преобразователя напряжения.

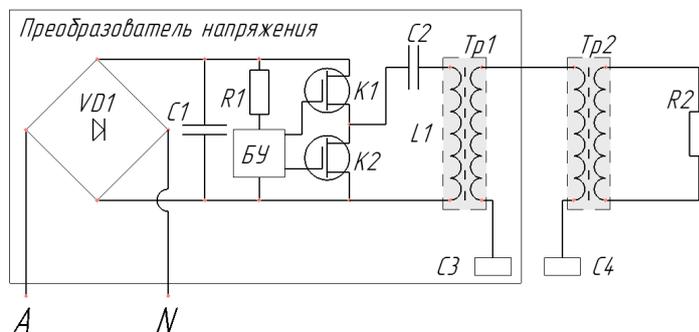


Рис. 4. Структурная схема преобразователя напряжения однопроводной системы передачи электроэнергии. Fig. 4. Structural diagram of the voltage converter of a single-wire power transmission system.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Более подробные особенности проектирования преобразователей напряжения для резонансных систем передачи электрической энергии малой мощности представлены в

работе [25]. Экспериментальное подтверждение передачи электрической энергии в однопроводной резонансной системе без применения заземлителей было представлено в исследовании [26]. В работе [27] рассмотрена резонансная система передачи электрической энергии на выпрямленном токе, в которой передача энергии осуществляется положительной полуволной напряжения и тока с помощью высоковольтного диода, установленного на выводе повышающего трансформатора Тесла.

2.3 Классификация однопроводных резонансных систем передачи электрической энергии по расположению первичных и вторичных обмоток трансформаторов Тесла.

В работе [28] отмечено, что для создания однопроводных резонансных систем важным условием является взаимное расположение первичных и вторичных обмоток трансформаторов Тесла, состояние неподключенных к передающему проводу выводов вторичных обмоток, а также частота, на которой работает система. В соответствии с этим, авторы классифицируют резонансные системы на три типа: высокопотенциальный способ с применением заземлений (Рисунок 5 а), высокопотенциальный способ без использования заземлений (Рисунок 5 б) и низкопотенциальный способ без использования заземлений (Рисунок 5 в). Схемы типов резонансных систем показаны на рисунке 5.

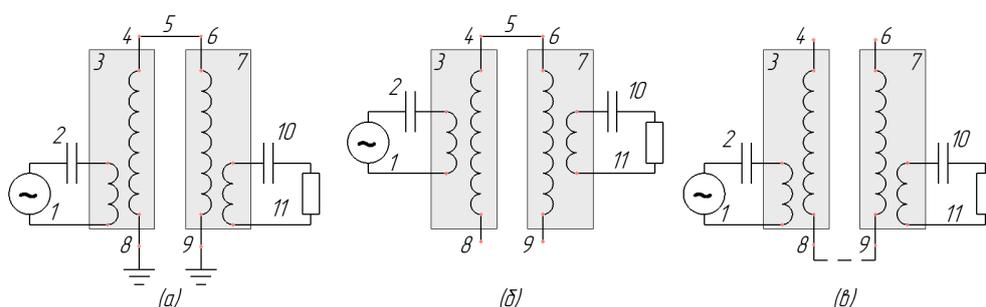


Рис. 5. Структурная схема резонансной системы передачи электрической энергии: (а) высокопотенциальная с заземлениями; (б) высокопотенциальная без заземлений; (в) низкопотенциальная без заземлений. Согласно рисунку: 1- высокочастотный генератор, 2 и 10 - конденсаторы, 3 и 7 - высокочастотные трансформаторы Тесла, 11- нагрузка 5 - однопроводная линия электропередачи, 4, 6, 8 и 9 - высоковольтные выводы трансформаторов Тесла.

Fig. 5. Structural diagram of a resonant electrical energy transmission system: (a) high-potential with grounding; (b) high-potential without grounding; (c) low-potential without grounding. According to the figure: 1 - high-frequency generator, 2 and 10 - capacitors, 3 and 7 - high-frequency Tesla transformers, 11 - load 5 - single-wire power line, 4, 6, 8 and 9 - high-voltage terminals of Tesla transformers.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В системе, показанной на рисунке 5 (а), низковольтные обмотки трансформаторов Тесла размещаются у заземляемых выводов высоковольтных обмоток. Два трансформатора Тесла, соединенные линией электропередачи, образуют передающую систему с длиной линии, равной половине длины волны.

Отличие системы, показанной на рисунке 5 (б), от системы, рассмотренной ранее, в том, что в ней созданы условия, не требующие использования заземлений. В ней первичная обмотка передающего трансформатора Тесла размещается на середине вторичной однослойной обмотки, а вдоль двух трансформаторов и линии передачи размещается целая длина волны.

В системе, показанной на рисунке 5 (в), низковольтная обмотка передающего трансформатора Тесла находится непосредственно у начала вторичной обмотки. Для низкопотенциального режима передачи характерен полуволновой режим, поэтому обычно резонансная частота тока у низкопотенциальной системы в два раза ниже. В низкопотенциальной системе, в отличие от высокопотенциальной, напряжение на передающем проводе остается практически неизменным при изменении нагрузки.

Более подробная информация по основным характеристикам резонансных систем, особенности их работы, возникающие волновые эффекты может быть найдена в работе [28].

3 Решение проблемы стабилизации выходного напряжения в резонансной линии электропередачи при нагрузке переменного характера

Высокая эффективность резонансных систем однопроводной передачи электрической энергии достигается при обеспечении необходимых фиксированных

параметров напряжения, частоты и нагрузки, на которые рассчитана система. Однако, как правило, энергопотребители имеют непостоянную по времени нагрузку, зависящую от параметров включаемого в разные моменты времени оборудования, задействованного в технологическом процессе, что в конечном итоге сбивает резонансные режимы работы (изменяя добротность контуров) передачи электроэнергии. При этом выходное напряжение на приёмной стороне так же изменяется в несколько раз, что недопустимо для эксплуатации электрооборудования.

Для решения этой проблемы в работе [29] предложена однопроводная система резонансной передачи электроэнергии с функцией стабилизации выходного напряжения в линии электропередачи независимо от мощности нагрузки. На систему получен патент [30]. Комплект оборудования работает на частоте 7-9 кГц при напряжении 980 В и позволяет передавать энергию мощностью до 8000 Вт на расстояние до 1,5 км по радиочастотному кабелю РК-75.

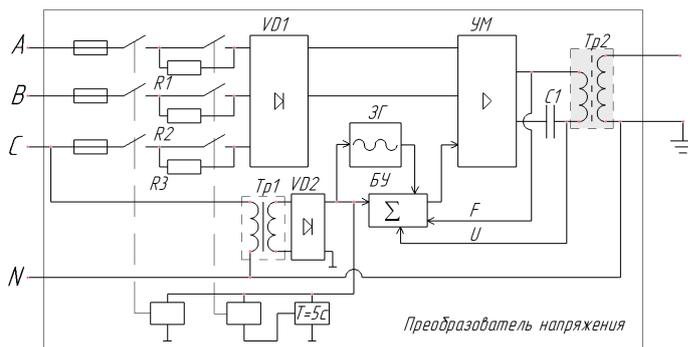


Рис. 6. Электрическая схема передающего преобразователя напряжения.

Fig. 6. Electrical diagram of the transmitting voltage converter.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Согласно электрической схеме передающего преобразователя напряжения, показанной на рисунке 6, основными элементами являются силовой выпрямитель VD1, задающий генератор ЗГ, ключевой усилитель мощности УМ, резонансный трансформатор с емкостью TP1-C1 и блок обработки сигналов БУ, имеющий функции автоматической подстройки частоты и регулировки напряжения. В схеме предусмотрено наличие обратной связи, что позволяет определять уровень напряжение в линии. Как результат, реализация обратной связи позволяет поддерживать выходное напряжение стабильным до достижения номинальной нагрузки, на которую рассчитана система, а при превышении которой произойдет резкое падение выходного напряжения. Зависимость выходного напряжения от нагрузки для резонансной системы с обратной связью и без показана на рисунке 7.

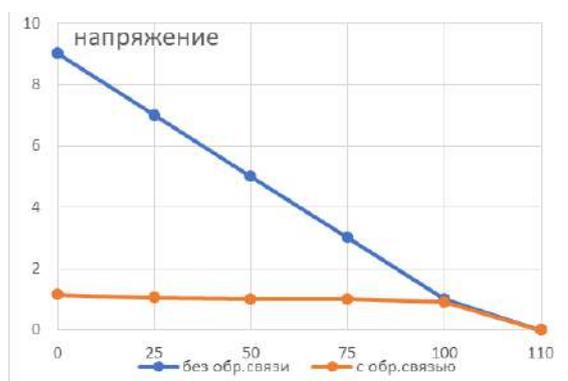


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения от нагрузки в резонансной линии электропередачи

Fig. 7. Dependence of the output voltage on the load in a resonant power line

*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

4 Особенности, преимущества и проблемы использования однопроводной резонансной системы передачи электрической энергии

4.1 Особенности резонансных систем, положительно влияющих на эффективность передачи электрической энергии

Основным преимуществом данной систем является то, что в отличие от традиционных систем электроснабжения, электроэнергия в ЛЭП, за счет резонансного режима, распространяется электромагнитными волнами, а не током в проводе, что позволяет значительно снизить потери электроэнергии, а значит и использовать провод меньшего сечения, при том, что этот провод может быть выполнен из более дешевого материала, чем, например, медь [31]. Здесь необходимо добавить, что экономия в проводе происходит и за счет использования одного проводника. В дополнение к вышесказанному значительная экономия при строительстве воздушных ЛЭП возникает в результате облегчения опор и использования меньшего количества арматуры.

В [24] авторами сделано сравнение с известными системами передачи электроэнергии, которое показало, что однопроводные системы передачи электроэнергии, работающие на повышенной частоте, являются более эффективными с экономической точки зрения по сравнению с линиями SWER, работающими на постоянном или переменном токе промышленной частоты. Расчёт технико-экономических показателей использования резонансной системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [32] показал, что точка безубыточности при строительстве воздушной линии мощностью 20 кВт и напряжением 10 кВ равна 15,2 км, рентабельность строительства такой линии составляет 10%. Если будет использоваться резонансная кабельная линия с теми же параметрами передаваемой мощности, то точка безубыточности будет находиться на расстоянии 7 км., рентабельность строительства составит 111%.

Кроме того, в случае реализации однопроводной резонансной системы электропередачи отсутствует межфазное короткое замыкание и обеспечивается высокий уровень электробезопасности. Это обусловлено особенностями резонансного режима работы. Как показано на рисунке 7, при превышении расчетной нагрузки, которое возникает в случае перегрузки или короткого замыкания, нагрузкой генератора частоты останется только емкость С2 (Рисунок 4), напряжение на емкости уменьшится в несколько раз, а величина тока - в 10 раз. Необходимо отметить, что такие системы не нуждаются в дорогих системах защиты от коротких замыканий, что влияет на технико-экономическую эффективность всей системы.

При обрыве линии изменяется рабочая длина линии, которая перестает быть равной кратной половине длины волны электрического тока, а значит система выпадет из резонанса и напряжение в линии резко уменьшается. Кроме того, данная особенность делает практически невозможной кражу электроэнергии в однопроводной резонансной системе электроснабжения.

Важно отметить влияние электрического тока высокой частоты на организм человека. При рассмотрении вопросов электробезопасности в числе других пользуются понятием порогового неотпускающего тока, имеющего прямую зависимость от частоты. При частоте 50 Гц величина порогового неотпускающего тока составляет в среднем 10...15 мА. Согласно правилам безопасности, принятыми в РФ, на предприятиях допускается безопасное напряжение промышленной частоты (50 Гц) не выше 24 В. Так, увеличение частоты тока до 4 кГц позволяет повысить безопасное напряжение в 2 раза. С учетом того, что при обрыве провода, как было объяснено выше, резко уменьшается выходное напряжение, то опасность поражения электрическим током в резонансных сетях стремится к минимуму.

4.2 Особенности резонансных систем, требующие дополнительного внимания при проектировании систем передачи электрической энергии

Говоря о проблемах использования резонансных систем передачи электрической энергии необходимо отметить, что они связаны с особенностями резонансного режима работы, отличного от функционирования традиционных систем, и, в большинстве случаев, недостаточно изученного и проработанного в областях электробезопасности, систем мониторинга и надежности.

Так как данные системы работают на повышенной частоте, не лишним является вопрос рассмотрения безопасности эксплуатации резонансных систем передачи электроэнергии по отношению влияния электромагнитного поля на организм человека. Этот вопрос был изучен и в работе [33] приведен математический анализ напряженности переменных магнитного и электрического полей на соответствие нормам СанПиН 2.2.4.1191-03 (в настоящий момент заменен на СанПиН 1.2.3685-21) и СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03, выполнены практические испытания на уровень напряженности. Максимальные значения переменного электрического поля в диапазоне частот 2 - 400 кГц

составили величину 30 - 150 В/м, магнитного поля - 0,06 - 1,7 мкТл, что значительно ниже предельно допустимого уровня на рабочих местах персонала, равного 500 В/м и 62,5 мкТл, соответственно. Результаты математического и практического анализа позволяют сделать вывод о безопасности применения резонансной системы электропитания мощностью до 4,5 кВт.

Рассматриваемые резонансные системы передачи электроэнергии имеют ограниченное применение из-за наличия звуковых колебаний с частотой в диапазоне 5 кГц и выше, что находится в слышимом диапазоне частот звука для человека (от 16—20 Гц до 15—20 кГц) [34]. При этом резонансные трансформаторы являются наиболее проблематичными с точки зрения акустики частями системы, в особенности передающий трансформатор. Проведенные измерения уровней звука экспериментальных моделей различных резонансных систем [35] показали, что уровень звука на расстоянии 0,5 метров от передающего трансформатора резонансной системы мощностью 8 кВт и частотой 8 кГц составил чуть менее 60 дБА, что хоть и может оказывать вредное воздействие на здоровье и самочувствие человека [36], но является допустимым во многих странах. В большинстве стран [37] значения допустимого предела воздействия находятся на уровне 85 дБА, при этом в РФ согласно нормативным документам (ГОСТ 12.1.003-83 и СН 2.24.2.1.8.562-96) уровни звука не должны превышать 80 дБА на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий [38]. Есть два варианта решения возникающего дискомфорта от вызываемого шума: установка оборудования вне помещений и использование средств звукоизоляции, хотя в последнем случае необходимо будет решать вопрос с охлаждением оборудования.

Важным неисследованным вопросом при строительстве резонансной линии на повышенной частоте является применение оборудования, не относящегося непосредственно к передаче энергии. Так, стандартные варианты защиты линий от различных аварийных режимов, например, ограничители перенапряжения (ОПН), предназначены для сетей частотой 50/60 Гц, а для применения в 5 кГц и выше, нужно либо обоснование возможности их применения, либо исследования. К этой проблеме также можно отнести сложность развертывания учета электроэнергии, которая также в большинстве случаев спроектирована на напряжение 50/60 Гц. Вариантом частичного решения учета является установка стандартных счетчиков 50/60 Гц до повышающих и после понижающих инверторов системы.

Несмотря на то, что рассматриваемая система обеспечивает высокий уровень защиты от любой перегрузки за счет особенности резонансного режима работы, причём без использования специальных аппаратных средств, данная особенность ограничивает перегрузочную способность линии даже при кратковременных набросах нагрузки (более 100% номинальной мощности). Таким образом, чтобы избежать выхода из рабочего режима, необходимо производить расчеты с заранее завышенной передаваемой мощностью. Вторым решением, может быть применение накопителей энергии, устанавливаемых в питающей нагрузке линии, позволяющих сглаживать кратковременные перегрузки.

И последнее, в резонансном режиме потери на передачу электрической энергии в линии минимальны, однако присутствуют значительные потери в преобразовательных блоках самой системы. Так независимо от нагрузки, в системе наблюдается постоянные потери на накачку реактивного контура, составляющие 5-10% от номинальной мощности [35]. Поэтому, чтобы строительство резонансной системы передачи было рентабельно, необходимо рассчитывать на стабильную нагрузку, близкую к номинальной. Технико-экономические расчеты показывают, что резонансные системы выгодно строить для нагрузок с небольшой мощностью, удаленных от централизованного электроснабжения [32]. Однако, стоит оставить несколько замечаний к этим расчетам. Во-первых, в этих расчетах не учитывались некоторые неочевидные преимущества из-за сложности расчетов и нехватки данных, а именно скорость строительства ЛЭП, возможность строительства на 1 ЛЭП до 3-5 резонансных линий, сокращение затрат на расчистку просек, сокращение коммерческих потерь электроэнергии, сокращение воровства проводов и т.д. Во-вторых, в расчетах капитальных затрат значительную долю составляет стоимость электронного оборудования и резонансных трансформаторов, собираемых вручную в лабораторных условиях в единичных экземплярах, поэтому при выходе на производство рентабельность строительства резонансной линии должна повыситься.

5 Области применения технологии передачи электроэнергии резонансным методом

Рассматривая однопроводные воздушные и кабельные резонансные системы электроснабжения необходимо рассмотреть потенциал их применения в различных сферах народного хозяйства. Так, установлено, что резонансные системы особенно экономически

эффективны при питании объектов, удаленных от системы стационарного электроснабжения, таких как насосы для полива растений, различные системы освещения, станции катодной защиты, системы видеонаблюдения, газовые месторождения, воздушные и подводные электропотребители.

Было рассмотрено большое количество источников литературы по этому вопросу, в ходе анализа которых было установлено, что наибольшее внимание уделяется применению технологий резонансной передачи электроэнергии в системах освещения, что обусловлено неизменяющимся во времени характером нагрузки, которая «выгодна» и удобна для развертывания резонансных систем. Принцип работы и преимущества внедрения систем освещения на основе резонансной системы передачи электрической энергии представлены в [39]. В работах [40, 41] представлено использование резонансной высокочастотной электрической системы для электроосвещения с использованием сверхярких диодов и люминесцентных ламп. Модель системы резонансной однопроводной передачи электрической энергии, источником питания в которой являются фотоэлектрические модули и ветрогенератор, представлена в [42]. В работе [43] рассмотрены пути повышения эффективности искусственных источников света, включающие в себя разработку высокоэффективных электронных резонансных преобразователей напряжения для питания искусственных источников света. Микропроцессорный блок управления резонансной системой освещения, используемой в птицеводческих помещениях, представлен в [44]. Использование резонансных систем передачи электроэнергии для систем искусственного освещения растений в закрытом грунте (в теплицах) рассмотрено в [45, 46]. Аспекты создания энерго- и ресурсосберегающих резонансных систем электропитания систем уличного освещения со светодиодами или люминесцентными лампами рассмотрены в работе [47]. В результате этих исследований, сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства была реализована резонансная система электропередачи для питания системы освещения на реальном объекте - в сквере на улицы Енбекшилер, город Астана, Республика Казахстан [48]. Работа выполнялась в рамках подготовки к «Саменту ЕВРО-2017», система освещения состояла из 120 светильников по 30 Вт и находилась на расстоянии 1200 м от передающего блока резонансной системы, мощностью 3500 Вт.

В статье [49] рассматриваются проблемы создания энерго- и ресурсосберегающих резонансных систем электроснабжения системы высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений, разработанной АО «Российские космические системы» (патент на изобретение № 2496124, [50]), устанавливаемой на трубопроводном транспорте). Использование резонансных систем передачи электроэнергии также рассмотрено для питания объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» [51]. Экспериментально показана возможность передачи электроэнергии мощности 2 кВт по коаксиальному кабелю на максимальное передаваемое расстояние 5 км. В работе [52] рассматривается возможность использования резонансных систем передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода. В работе теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что разработанное оборудование позволяет увеличить скорость нагрева рельсов стрелочного перевода за счёт принципа «прямого нагрева», а также уменьшить потребление электроэнергии при той же скорости нагрева с помощью ТЭН.

Возможность применения резонансной системы электропитания для электрохимической защиты трубопроводов и сопутствующих объектов, а именно катодной защиты, рассмотрено в [53]. Данная защита служит для уменьшения скорости электрохимической коррозии металлических конструкций, достигаемого при их поляризации [54], и как правило, имеет постоянную нагрузку, что удобно для обеспечения резонансного режима работы системы. В результате исследований в городе Подольск, Московская область, РФ была построена однопроводная резонансная система питания 2 комплектов оборудования катодной защиты, расположенных на расстоянии 0,6 и 2 км от передающего блока системы мощностью 4000 Вт [55].

В качестве актуального потребителя для резонансных систем могут выступать сотовые станции, обладающие не меняющейся во времени нагрузкой. В качестве примера выступили зарядные устройства сотовых базовых станций, установленные в Подмосковье. Для этих станций был рассчитан комплект резонансной системы [29] мощность до 8000 Вт. Питание станций было осуществлено напряжением 980 В на частоте 7-9 кГц по линии электропередачи длиной 2,2 км. В работе [56] была рассмотрена возможность использования резонансных систем передачи электроэнергии к точкам доступа Wi-Fi, рассчитана стоимость проекта, описан принцип работы системы, но до практической реализации проекта дело не дошло.

Была реализована модель информационного взаимодействия объектов резонансной сети передачи электроэнергии и данных на территории кампуса университета «Дубна», а в качестве оборудования резонансной системы используются разработки ВИЭСХ [57]. Представленная модель была рассчитана на интеграцию распределенных генераторов и приемников электрической энергии в единое информационное пространство и проведение непрерывного и дифференцированного учета выданной и потребленной электроэнергии.

И наконец, в теоретической работе [58] рассмотрена возможность использования однопроводной резонансной линии, проложенной под поверхностью дорожного покрытия, для бесконтактного электроснабжения электрических транспортных средств. Несмотря на то, что предлагаемая идея имеет малый смысл с точки зрения практической реализации, авторы собрали экспериментальные модели автомобиля, работающего на данной системе, и показали возможность реализации данного способа.

Обобщающая дискуссия

В рамках информационного поиска по теме «Системы передачи электрической энергии по однопроводной кабельной линии» было найдено 58 источников, наиболее подходящих к теме исследования, из них 9 источников – интернет ресурсы, 49 – рецензируемые статьи и материалы конференции; 10 источников информации представлены на английском языке, 48 – на русском. В качестве источников информации были использованы: поисковые системы Yandex и Google, научные базы данных Scopus и Google Scholar, электронная библиотека КиберЛенинка, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore, IGI Global.

Информационный поиск по однопроводным сетям электроснабжения выявил четыре варианта: однофазная система электропередачи с возвратом тока через землю SWER, однопроводная сбалансированная линия B-Line, резонансные системы беспроводной передачи электрической энергии при использовании дополнительной соединяющей линии между высоковольтными трансформаторами SWPT и резонансные системы передачи электрической энергии по одному проводу. Необходимо отметить, что SWER и SWPT системы однопроводными названы условно. SWER использует землю в качестве проводника для обратной передачи энергии, а резонансная система SWPT используется для беспроводной передачи энергии.

Наиболее перспективным вариантом среди однопроводных являются резонансные системы передачи электрической энергии по одному проводу, предложенные Авраменко С.В. и развитыми Всероссийским научно-исследовательским институтом электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). Данные системы обладают высоким уровнем электробезопасности за счет особенностей резонансного режима работы. Они надежно защищены от несанкционированного отбора электроэнергии, а также обладают впечатляющей экономической эффективностью. Передавая мощность и расстояние, на которое можно её передать, также значительно превосходят возможности остальных однопроводных систем.

Основными преимуществами однопроводных резонансных сетей являются:

— Невысокие капитальные затраты на развертывание резонансных систем, связанные с использованием провода меньшего сечения при той же передаваемой мощности, значительной экономией в результате облегчения опор воздушных ЛЭП и использования меньшего количества арматуры. При этом рассмотренные источники отмечают, что технико-экономическая эффективность внедрения таких систем должна значительно повыситься при выходе на серийное производство электронных компонентов.

— Отсутствие межфазного короткого замыкания и перегрузки за счет особенностей резонансного режима работы таких сетей. При превышении расчетной нагрузки система выходит из резонансного режима, напряжение и ток резко падает, что позволяет говорить о высоком уровне электробезопасности. При этом необходимо отметить, что такие системы не нуждаются в передовых и дорогих системах защиты от коротких замыканий в линии, что также положительно влияет на технико-экономическую эффективность развертывания системы.

— Отсутствие электрической опасности при обрыве линии, что обусловлено выходом системы из резонансного режима из-за изменения рабочей длины линии, которая перестает быть равной длине волны электрического тока.

— Практическая невозможность кражи электроэнергии из-за нестандартных частот и напряжений в линии электропередачи.

— Увеличенный порог безопасного напряжения в результате использования повышенной частоты тока, что повышает общий уровень электробезопасности резонансных систем.

Заключение (Conclusions)

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании научных публикаций, патентов и других источников информации, в результате которой было составлено полное и подробное описание резонансных систем передачи электрической энергии по однопроводной линии. Теоретическая проработка вопросов, посвященных резонансным системам передачи электрической энергии, расширяет область знания в соответствующих разделах энергетики.

Практическая значимость работы заключается в описании технических решений, применяемых в резонансных системах передачи электрической энергии по однопроводным линиям, их преимуществ, проблем использования, а также опыта и области их применения.

Анализ полученных результатов в ходе информационного поиска выявил, что системы резонансной технологии электропередачи являются наиболее многообещающими среди остальных однопроводных систем. Данные системы обладают высоким уровнем электробезопасности. Они надежно защищены от несанкционированного отбора электроэнергии, а также обладают хорошей экономической эффективностью. Передаваемая мощность и расстояние, на которую можно её передать, также значительно превосходят возможности остальных однопроводных систем. Например, точка безубыточности при строительстве воздушной линии мощностью 20 кВт и напряжением 10 кВ равна 15,2 км, рентабельность строительства такой линии составляет 10%, а при использовании кабельной резонансной линии точка безубыточности будет находиться на 7 км при рентабельности строительства в 111%.

Литература

1. Электроснабжение объектов и электромонтажные работы в Москве и Московской области [Electronic resource]. URL: <https://elektromontazh-profi.ru/> (accessed: 02.03.2023).
2. Line Extension Cost – Pioneer Electric [Electronic resource]. URL: <https://pioneerelectric.coop/my-account/help/line-extension-cost/> (accessed: 09.01.2023).
3. Об электроэнергетике: 35-ФЗ. 2023.
4. Стребков Д.С. Никола тесла и современные проблемы Электрификации (к 150-летию со дня рождения Н. Тесла) // Вестник ВИЭСХ. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный ..., 2006. № 1. С. 6–16.
5. Tesla N. Electrical Transformer: pat. US593138A USA. 1897.
6. Bank M. It Is Quite Another Electricity: Transmitting by One Wire and without Grounding. Partridge Publishing Singapore, 2017.
7. Зубричев И.В., Коровченко М.С., Рязанов Д.Ю. Однопроводная передача электроэнергии // Исследование путей совершенствования научно-технического потенциала общества в стратегическом периоде. 2022. С. 20–22.
8. Кулигин В.А. Виртуальные заряды и токи Тесла в электродинамике.
9. Strebkov D.S., Nekrasov A.I. Resonance methods of electric power transmission // M: GNU viesh. 2006.
10. Вилка Авраменко [Electronic resource]. URL: https://cyclowiki.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B0_%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE (accessed: 02.09.2022).
11. Герасимов С.А. Однопроводная передача электрической энергии: расчет и эксперимент // Современные наукоемкие технологии. Общество с ограниченной ответственностью" Издательский Дом" Академия ..., 2011. № 4. С. 28–31.
12. Копейкина Т.В. Объективность применения однопроводных систем передачи электрической энергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. ООО Научно-издательский центр Академия Естествознания, 2016. № 12–3. С. 411–414.
13. Как передать энергию по одному проводу / Хабр [Electronic resource]. 2016. URL: <https://habr.com/ru/post/396885/?ysclid=17j04sl11m600979600> (accessed: 05.09.2022).
14. Исследование однопроводной линии передачи электроэнергии с генератором на радиолampe ГУ-50 [Electronic resource] // TechnoAttic. URL: <http://technoattic.by/vttc-gu50-experiments/> (accessed: 05.09.2022).
15. Заев Н. Передача электроэнергии по одному проводу - выдумка или реальность? [Electronic resource] // Электрик Инфо. 2009. URL: <http://electrik.info/main/praktika/21-peredacha-jelektrojenergii-po-odnomu.html> (accessed: 05.09.2022).
16. Косинов Н.В., Гарбарук В.И. Однопроводная и беспроводная передача энергии с фрагментами видеосъемки экспериментов [Electronic resource]. URL: <https://www.skif.biz/index.php?name=Pages&op=page&pid=118> (accessed: 05.09.2022).

17. Энергосберегающая и ресурсосберегающая технология передачи электрической энергии на большие расстояния [Electronic resource]. URL: http://www.greenwatt.ru/free_energy/electrics/d780/ (accessed: 05.09.2022).

18. Как передавать электроэнергию по одному проводу? Схема Авраменко | СамЭлектрик.ру | Дзен [Electronic resource]. 2022. URL: <https://zen.yandex.ru/media/samelectric/kak-peredavat-электроenergiu-po-odnomu-provodu-shema-avramenko-62f160ce8a2e872ae56c4d4d> (accessed: 05.09.2022).

19. Avramenko S., Avramenko K. Method and apparatus for single line electrical transmission: pat. US6104107A USA. United States, 1993.

20. Strebkov D. et al. Single-Wire Resonant Electric Power Systems for Renewable-Based Electric Grid // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development / ed. Kharchenko V., Vasant C. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2018. С. 449–474.

21. Strebkov D.S., Avramenko S. v, Nekrasov A.I. Single-Wire Electric Power System for Renewable-Based Electric Grid // New Energy Technol. 2001. С. 20–25.

22. Алиев И.И. Энергосберегающая резонансная однопроводная ЛЭП // Энергобезопасность и энергосбережение. Московский институт энергобезопасности и энергосбережения, 2011. № 6. С. 27–30.

23. Алиев И., Стребков Д. Особенности передачи энергии по резонансной однопроводной ЛЭП // Электроэнергия. Передача и распределение. Общество с ограниченной ответственностью Кабель, 2012. № 1. С. 40–42.

24. Юферев Л.Ю. et al. Исследование резонансной системы передачи электроэнергии на повышенной частоте // Альтернативная энергетика и экология. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ТАТА», 2014. № 8 (148). С. 89–93.

25. Стребков Д.С. et al. Проектирование преобразователей напряжения для резонансных систем передачи электрической энергии малой мощности // Сборник научных докладов ВИМ. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский ..., 2010. Vol. 2. С. 332–340.

26. Стребков Д.С. et al. Исследование однопроводной системы передачи электроэнергии с резонансными трансформаторами тесла // Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный, 2014. № 4. С. 306–309.

27. Стребков Д.С., Лосинец Д.С. Резонансные методы передачи электроэнергии на выпрямленном токе по однопроводной линии // Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный ..., 2015. № 5. С. 42–47.

28. Стребков Д.С. et al. Сравнение резонансных однопроводных систем передачи электрической энергии // Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный ..., 2016. № 1. С. 58–66.

29. Юферев Л.Ю., Рошин О.А. Комплект оборудования резонансной системы передачи электроэнергии мощностью 8000 Вт // Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный ..., 2018. № 2. С. 29–35.

30. Юферев Л.Ю., Стребков Д.С. Способ и устройство передачи электрической энергии (варианты): pat. 2 423 772 USA. РФ: Опубликовано, 2011.

31. Васильев А.В. Однопроводные ЛЭП: дорога в никуда или будущее энергетики? // Электротехнический рынок. 2015. Vol. 4, № 64.

32. Рошин О.А. Разработка резонансной системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности. Moscow: All-Russian Research Institute of Agricultural Electrification, 2006. 151 С.

33. Юферев Л.Ю., Соколов А.В. Проблемы безопасности эксплуатации резонансных систем передачи электроэнергии // Вестник ВИЭСХ. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный, 2013. № 2. С. 74–76.

34. Burke E., Uppenkamp S., Koch C. A psychoacoustical study to investigate the perceived unpleasantness of infrasound combined with audio-frequency sound // Acta Acustica. EDP Sciences, 2020. Vol. 4, № 5. С. 20.

35. Юферев Л.Ю., Стребков Д.С., Рошин О.А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. ООО «Оригинальная компания», 2010.

36. Staseva E. et al. The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. Vol. 164. С. 01028.

37. Arenas J.P., Suter A.H. Comparison of occupational noise legislation in the Americas: an overview and analysis // *Noise Health*. Medknow Publications, 2014. Vol. 16, № 72. С. 306.
38. Окунев А.А. Шум в производственных помещениях и его влияние на человека // *Современные наукоемкие технологии. Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом" Академия ...*, 2014. № 5–2. С. 105–106.
39. Шахраманьян М.А. et al. Светодиодное освещение на основе резонансной системы передачи электрической энергии // *Альтернативная энергетика и экология. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ТАТА»*, 2012. № 11. С. 92–94.
40. Стребков Д.С. et al. Резонансные системы светодиодного освещения // *Достижения науки и техники АПК. ООО «Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК»*, 2009. № 10. С. 20–21.
41. Стребков Д.С. et al. Резонансные системы светодиодного освещения // *Достижения науки и техники АПК. ООО «Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК»*, 2009. № 10. С. 20–21.
42. Шахраманьян М.А. et al. Система резонансной однопроводной передачи электрической энергии от возобновляемых источников энергии // *Альтернативная энергетика и экология. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ТАТА»*, 2012. № 11. С. 95–97.
43. Юферев Л.Ю. Повышение эффективности резонансных систем освещения и облучения // *Вестник ВИЭСХ*. 2013. № 3. С. 12.
44. Юферев Л.Ю., Михалев А.А. Микропроцессорный блок управления резонансной системой освещения // *Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный ..."*, 2013. № 3. С. 14–16.
45. Юферев Л.Ю., Соколов А.В., Юферева А.А. Резонансная система освещения растений в теплицах // *Техника в сельском хозяйстве. Автономная некоммерческая организация Редакция журнала "Техника в сельском ..."*, 2014. № 4. С. 12–15.
46. Юферев Л., Соколов А., Юферева А. Резонансная светодиодная система освещения для закрытого грунта // *Полупроводниковая светотехника. Общество с ограниченной ответственностью "Медиа КиТ"*, 2014. Vol. 2, № 28. С. 78–80.
47. Роцин О.А., Стребков Д.С., Юферев Л.Ю. О резонансной однопроводной системе электропитания в освещении светодиодами или люминесцентными лампами // *Светотехника. Общество с ограниченной ответственностью Редакция журнала Светотехника*, 2015. № 5. С. 29–32.
48. Юферев Л.Ю., Роцин О.А. Резонансная система паркового освещения // *Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный ..."*, 2016. № 1. С. 111–114.
49. Миронов М.П. Возможность применения резонансной однопроводной системы для электропитания оборудования системы мониторинга инженерных сооружений // *Наука и бизнес: пути развития. Межрегиональная общественная организация "Фонд развития науки и культуры"*, 2019. № 6. С. 65–71.
50. Жодзишский А.И., Большаков В.О., Нестеров О.В. Система высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений. 2013.
51. Ермоленко Д.В., Юферев Л.Ю., Роцин О.А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД» // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2018. Vol. 77, № 5. С. 295–300.
52. Ермоленко Д.В., Юферев Л.Ю., Роцин О.А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2019. Vol. 78, № 1. С. 48–53.
53. Александров Д.А., Юферев Л.Ю. Возможность применения резонансной системы электропитания для катодной защиты // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2012. № 2. С. 2.
54. Александров Д.В., Юферев Л.Ю. Расчёт параметров и экономическая эффективность системы катодной защиты сельскохозяйственных объектов // *Инновации в сельском хозяйстве. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный ..."*, 2015. № 3. С. 44–52.
55. Юферев Л.Ю., Александров Д.В. Повышение эффективности резонансных систем передачи электроэнергии для удаленных станций катодной защиты // *Труды международной научно-технической конференции Энергообеспечение и энергосбережение*

в сельском хозяйстве. Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский ..., 2014. Vol. 1. С. 271–278.

56. Юферев Л.Ю., Споров А.П. Резонансная система передачи электроэнергии для создания WI-FI информационных сетей и сбора информации жилищно-коммунальных услуг // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение" Федеральный ..., 2020. Vol. 67, № 4. С. 29–34.

57. Крюков Ю.А. Модель информационного взаимодействия объектов резонансной сети передачи электроэнергии и данных // Вестник РАЕН. Общероссийская общественная организация Российская академия естественных наук, 2013. Vol. 13, № 1. С. 44–51.

58. Strebkov D., Nekrasov A., Nekrasov A. Resonant Power System for Electric Transport // Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions / ed. Kharchenko V., Vasant C. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2019. С. 342–369.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р тех. наук., доцент, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. E-mail: winaleksandr@gmail.com

Лансберг Александр Александрович – специалист лаборатории электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.. E-mail: lansbergaa@vk.com

Волчков Юрий Дмитриевич - канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Орловского государственного аграрного университета. E-mail: volchkov.iurij@yandex.ru

Виноградова Алина Васильевна - канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. E-mail: alinawin@rambler.ru.

References

1. *Power supply of facilities and electrical work in Moscow and the Moscow region* [Electronic resource]. URL: <https://elektromontazh-profi.ru/> (accessed: 03/02/2023).
2. *Line Extension Cost - Pioneer Electric* [Electronic resource]. URL: <https://pioneerelectric.coop/my-account/help/line-extension-cost/> (accessed: 01/09/2023).
3. *On the electric power industry: 35-FZ. 2023.*
4. Strebkov D.S. Nikola Tesla and Modern Problems of Electrification (to the 150th Anniversary of N. Tesla). *Vestnik VIESKh*, 2006. No. 1. P. 6–16.
5. Tesla N. *Electrical Transformer*: pat. US593138A USA. 1897.
6. Bank M. *It Is Quite Another Electricity: Transmitting by One Wire and without Grounding*. Partridge Publishing Singapore, 2017.
7. Zubrichev IV., Korovchenko M.S., Ryazanov D.Yu. *Single-wire transmission of electricity*. Study of ways to improve the scientific and technical potential of society in the strategic period. 2022, pp. 20–22.
8. Kuligin V.A. *Virtual charges and Tesla currents in electrodynamics*.
9. Strebkov D.S., Nekrasov A.I. *Resonance methods of electric power transmission*. Moscow: GNU VIESH. 2006.
10. Avramenko's fork - cyclopedia [Electronic resource]. URL: https://cyclowiki.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B0_%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE (accessed: 09/02/2022).
11. Gerasimov S.A. Single-wire transmission of electrical energy: calculation and experiment. *Modern science-intensive technologies*, 2011. No. 4. P. 28–31.
12. Kopeikina T.V. Objectivity of the application of single-wire systems for the transmission of electrical energy. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. No. 12–3. pp. 411–414.
13. How to transfer energy over one wire / Habr [Electronic resource]. 2016. URL: <https://habr.com/ru/post/396885/?ysclid=17j04sl11m600979600> (accessed: 09/05/2022).

14. Study of a single-wire power transmission line with a GU-50 radio tube generator [Electronic resource]. *TechnoAttic*. URL: <http://technoattic.by/vttc-gu50-experiments/> (accessed: 09/05/2022).
15. Zaev N. *Transmission of electricity through one wire - fiction or reality?* [Electronic resource]. *Electrician Info*. 2009. URL: <http://elektrik.info/main/praktika/21-peredacha-jelektrojenergii-po-odnomu.html> (accessed: 09/05/2022).
16. Kosinov N.V., Garbaruk V.I. *Single-wire and wireless power transmission with video footage of experiments* [Electronic resource]. URL: <https://www.skif.biz/index.php?name=Pages&op=page&pid=118> (accessed: 09/05/2022).
17. *Energy-saving and resource-saving technology for the transmission of electrical energy over long distances* [Electronic resource]. URL: http://www.greenwatt.ru/free_energy/electrics/d780/ (accessed: 09/05/2022).
18. *How to transmit electricity through one wire? Avramenko's scheme | SamElektrik.ru | Zen* [Electronic resource]. 2022. URL: <https://zen.yandex.ru/media/samelectric/kak-peredavat-elektroenergiu-po-odnomu-provodu-shema-avramenko-62f160ce8a2e872ae56c4d4d> (accessed: 09/05/2022).
19. Avramenko S., Avramenko K. *Method and apparatus for single line electrical transmission*: pat. US6104107A USA. United States, 1993.
20. Strebkov D. et al. *Single-Wire Resonant Electric Power Systems for Renewable-Based Electric Grid. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development* / ed. Kharchenko V., Vasant C. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2018, pp. 449–474.
21. Strebkov D.S., Avramenko S. v, Nekrasov A.I. Single-Wire Electric Power System for Renewable-Based Electric Grid. *New Energy Technol.* 2001, pp. 20–25.
22. Aliev I.I. Energy-saving resonant single-wire transmission line. Energy safety and energy saving. *Moscow Institute of Energy Security and Energy Saving*, 2011;6:27–30.
23. Aliev I., Strebkov D. Peculiarities of energy transfer through a resonant single-wire power transmission line. *Electricity. Transfer and distribution. Limited Liability Company Cable*, 2012;1:40–42.
24. Yuferev L.Yu. et al. Investigation of the resonant power transmission system at an increased frequency. *Alternative Energy and Ecology*. 2014. No. 8 (148). pp. 89–93.
25. Strebkov D.S. et al. *Designing voltage converters for resonant systems of low power transmission of electrical energy*. Collection of scientific reports of VIM, 2010. Vol. 2. S. 332–340.
26. Strebkov D.S. et al. Study of a single-wire power transmission system with resonant Tesla transformers. *Innovations in agriculture*, 2014;4:306–309.
27. Strebkov D.S., Losinets D.S. Resonant methods of electric power transmission on a rectified current through a single-wire line. *Innovations in agriculture*. 2015;5: 42–47.
28. Strebkov D.S. et al. Comparison of resonant single-wire power transmission systems. *Innovations in agriculture*. 2016. No. 1. P. 58–66.
29. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. A set of equipment for a resonant power transmission system with a capacity of 8000 W. *Innovations in agriculture*. 2018;2:29–35.
30. Yuferev L.Yu., Strebkov D.S. *Method and device for transmission of electrical energy (options)*: pat. 2,423,772 USA. RF: Published, 2011.
31. Vasiliev A.V. Single-wire power lines: the road to nowhere or the future of energy? *Electrotechnical market*. 2015. Vol. 4, no. 64.
32. Roshchin O.A. *Development of a resonant power supply system for agricultural consumers of low power*. Moscow: All-Russian Research Institute of Agricultural Electrification, 2006. 151 p.
33. Yuferev L.Yu., Sokolov A.V. Problems of safety of operation of resonant power transmission systems. *Vestnik VIESKh*. 2013;2:74–76.
34. Burke E., Uppenkamp S., Koch C. *A psychoacoustical study to investigate the perceived unpleasantness of infrasound combined with audio-frequency sound*. *Acta Acustica*. EDP Sciences, 2020. Vol. 4, No. 5. S. 20.
35. Yuferev L.Yu., Strebkov D.S., Roshchin O.A. *Experimental models of resonant systems of electrical energy*. ООО «Original Company», 2010.

36. Staseva E. et al. *The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases*. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020;164;01028.
37. Arenas J.P., Suter A.H. *Comparison of occupational noise legislation in the Americas: an overview and analysis*. Noise Health. Medknow Publications, 2014;16;72;306.
38. Okunev A.A. Noise in industrial premises and its impact on humans. *Modern science-intensive technologies*. 2014;5–2;105–106.
39. Shakhramanyan M.A. et al. LED lighting based on a resonant power transmission system. *Alternative Energy and Ecology*, 2012;11;92–94.
40. Strebkov D.S. et al. Resonant systems of LED lighting. *Achievements of Science and Technology of APK*. 2009;10;20–21.
41. Strebkov D.S. et al. Resonant systems of LED lighting. *Achievements of Science and Technology of APK*. 2009;10;20–21.
42. Shakhramanyan M.A. et al. The system of resonant single-wire transmission of electrical energy from renewable energy sources. *Alternative Energy and Ecology*. 2012;11;95–97.
43. Yuferev L.Yu. Improving the efficiency of resonant lighting and irradiation systems. *Vestnik VIESKh*. 2013; 3;12.
44. Yuferev L.Yu., Mikhalev A.A. Microprocessor control unit for resonant lighting system. *Innovations in agriculture*. 2013;3;14–16.
45. Yuferev L.Yu., Sokolov A.V., Yufereva A.A. Resonance lighting system for plants in greenhouses. *Technique in agriculture*. 2014;4;12–15.
46. Yuferev L., Sokolov A., Yufereva A. Resonant LED lighting system for indoor ground. *Semiconductor lighting engineering*. 2014;2(28):78–80.
47. Roshchin O.A., Strebkov D.S., Yuferev L.Yu. On a resonant single-wire power supply system in lighting with LEDs or fluorescent lamps. *Svetotekhnika*. 2015;5;29–32.
48. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Resonant system of park lighting. *Innovations in agriculture*. 2016;1;111–114.
49. Mironov M.P. The possibility of using a resonant single-wire system for power supply of equipment for monitoring engineering structures. *Science and business: ways of development*. 2019;6;65–71.
50. Zhodzishsky A.I., Bol'shakov V.O., Nesterov O.V. System for high-precision monitoring of displacements of engineering structures. 2013.
51. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Test results of a resonant single-wire power transmission system for infrastructure facilities of Russian Railways. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZhT)*. 2018;77;5:295–300.
52. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Test results of a resonant single-wire power transmission system for induction heating of turnout rails. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZhT)*. 2019; 78(1):48–53.
53. Aleksandrov D.A., Yuferev L.Yu. The possibility of using a resonant power supply system for cathodic protection. *Innovations in agriculture*. 2012;2:2.
54. Aleksandrov D.V., Yuferev L.Yu. Calculation of parameters and economic efficiency of the system of cathodic protection of agricultural facilities. *Innovations in agriculture*. 2015;3;44–52.
55. Yuferev L.Yu., Alexandrov D.V. Improving the efficiency of resonant power transmission systems for remote stations of cathodic protection // *Proceedings of the international scientific and technical conference Energy supply and energy saving in agriculture*. 2014;1;271–278.
56. Yuferev L.Yu., Sporov A.P. Resonant power transmission system for creating WI-FI information networks and collecting information from housing and communal services. *Vestnik VIESKH*. 2020;67(4):29–34.
57. Kryukov Yu.A. Model of information interaction of objects of a resonant network for transmission of electricity and data. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2013;13(1): 44–51.
58. Strebkov D., Nekrasov A., Nekrasov A. Resonant Power System for Electric Transport. *Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions*. ed. Kharchenko V., Vasant P. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2019, pp. 342–369.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov – Dr. of Sciences. Associate Professor, Head of Electrical Supply and Heat Supply Laboratory of the Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM. E-mail: winaleksandr@gmail.com

Alexander A. Lansberg – specialist of the laboratory of electricity supply and heat supply of the Federal scientific agro-engineering center VIM. E-mail:lansbergaa@vk.com

Yury D. Volchkov – kand. techn. Sciences, associate professor of the department «Electricity supply» Orel State Agrarian University. E-mail: volchkov.iurij@yandex.ru

Alina V. Vinogradova – kand. techn. Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Electrical Supply and Heat Supply of the Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM. E-mail: alinawin@rambler.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **22.03.2023г.**

Отредактировано **29.03.2023г.**

Принято **03.06.2023г.**

УДК 681.518.54

ПРИМЕНЕНИЕ ПОГРУЖНОГО КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В НЕФТЕДОБЫЧЕ

Сабитов Р.В., Кирпичникова И.М., Горшков К.Е.

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

LPss1@yandex.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* На сегодняшний день большое количество нефти добывается с помощью погружных установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), поэтому вопрос повышения их энергоэффективности очень актуален и важен и является одним из основных показателей при выборе насосов для эксплуатации. **ЦЕЛЬ.** Целью исследований является разработка конструкции погружного компенсирующего устройства (ПКУ) на основе определения эффективности его применения внутри скважины и сравнительного расчета годовых потерь электроэнергии с применением и без применения погружного компенсирующего устройства. **МЕТОДЫ.** В статье используются и анализируются расчеты потребляемой мощности, ее потерь, КПД и величина падения напряжения. Определяются годовые потери электроэнергии с применением погружного компенсирующего устройства и без него. Для исследования был выбран погружной асинхронный электродвигатель компании «Римера» ЭДСТ110-103М3 мощностью 110кВт и номинальным напряжением 2,06кВ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана конструкция погружного компенсирующего устройства, показано его размещение внутри скважины. Оценена эффективность применения погружного компенсирующего устройства в разных точках размещения. Определены показания активной, реактивной, полной мощности и КПД двигателя без применения погружного компенсирующего устройства и с ним, показан график сравнения результатов исследованием двух вариантов работы. Определено снижение годовых потерь электроэнергии после применения погружного компенсирующего устройства. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований показали, что суммарные потери электроэнергии за год в данной системе с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности составили примерно $50,6 \cdot 10^3$ кВт·ч, экономия электроэнергии с одного устройства составила около $22,9 \cdot 10^3$ кВт·ч. Согласно нормам, на один куст (совокупность скважин, сгруппированных на общей площадке на близком расстоянии друг от друга), можно располагать до 24 скважин. Учитывая, что на нефтяных промыслах России в основном группируются от 16 до 24 скважин на куст, экономия может достигать десятков миллионов рублей в год. Установлено, что применение погружного компенсирующего устройства позволяет повысить энергоэффективность нефтедобывающих насосов и снизить энергетические и финансовые затраты.

Ключевые слова: энергоэффективность; снижение затрат; нефтедобыча; потери электроэнергии; погружные устройства.

Для цитирования: Сабитов Р.В., Кирпичникова И.М., Горшков К.Е. Применение погружного компенсирующего устройства в нефтедобыче // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т.15. № 2(58). С. 128-139.

THE USE OF A SUBMERSIBLE COMPENSATING DEVICE IN OIL PRODUCTION

RV. Sabitov, IM. Kirpichnikova, KE. Gorshkov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

LPss1@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Today, a large amount of oil is produced using submersible electric centrifugal pumps (ECP), so the issue of improving their energy efficiency is very relevant and important and is one of the main indicators when choosing pumps for operation. **PURPOSE.** The purpose of the research is to develop the design of a submersible compensating device (SCD)

based on determining the effectiveness of its use inside the well and the comparative calculation of annual electricity losses with and without the use of a submersible compensating device. METHODS. The article uses and analyzes calculations of power consumption, its losses, efficiency and the magnitude of the voltage drop. Annual electricity losses are determined with and without the use of a submersible compensating device. For the study, an EDST110-103M3 submersible asynchronous electric motor of the Rimer company with a capacity of 110 kW and a rated voltage of 2.06 kV was selected. RESULTS. The design of the submersible compensating device is developed, its placement inside the well is shown. The efficiency of using an immersion compensating device at different placement points is evaluated. The indications of active, reactive, full power and efficiency of the engine are determined without the use of an immersion compensating device and with it, a graph is shown comparing the results of the study of two work options. The reduction of annual electricity losses after the use of a submersible compensating device is determined. CONCLUSION. The results of the research showed that the total energy loss per year in this system with the use of a submersible reactive power compensation device was approximately $50,6 \cdot 10^3$ kWh, the energy savings from one device was about $22,9 \cdot 10^3$ kWh. According to the norms, up to 24 wells can be located per one cluster (a set of wells grouped on a common site at a close distance from each other). Taking into account that in the oil fields of Russia, from 16 to 24 wells are generally grouped per well, the savings can reach tens of millions of rubles a year. It has been established that the use of a submersible compensating device makes it possible to increase the energy efficiency of oil pumps and reduce energy and financial costs.

Keywords: energy efficiency; cost reduction; oil production; electricity losses; submersible devices.

For citation: Sabitov RV, Kirpichnikova IM, Gorshkov KE. THE USE OF A SUBMERSIBLE COMPENSATING DEVICE IN OIL PRODUCTION. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN.2023;15;2(58):128-139.

Введение

В нефтедобывающей отрасли при добыче нефти используют установки электроприводного насоса. Эти насосы погружаются в пробуренную скважину, и после этого нефть начинает прокачиваться наружу по насосно-компрессорной трубе. Глубина скважины может достигать нескольких километров (средняя глубина в России 3 км.), следовательно, электродвигатель удален от источника питания на это расстояние. Как известно, при передаче мощности по кабелю возникает реактивная составляющая, которая влияет на падение напряжения в конце кабеля и на потери мощности при передаче от источника до потребителя. В настоящее время эти проблемы решают повышением напряжения передачи электроэнергии, однако это приводит к старению изоляции и усложняет конструкцию двигателя [1,2].

В нефтедобывающей отрасли в сфере электроснабжения остаются актуальными вопросы повышения качества электрической энергии и повышения КПД установок [3]. В работах [4-7] показано, что энергоэффективность установок определяется уровнем потребления электроэнергии насосом и электродвигателем, а также основными ее узлами. При снижении потребления электроэнергии увеличивается надежность работы вследствие снижения нагрузки на указанные узлы и компоненты установки.

Таким образом, повышение энергоэффективности работы приводов погружных устройств и разработка способов компенсации реактивной мощности является актуальной задачей.

Материалы и методы

Исследование и разработка погружных установок электроцентробежных насосов были проведены на основе взаимосвязи проблем, которые вызываются загрузкой сети реактивной мощностью (рис.1). Обобщенная схема показывает влияние повышенного потребления реактивной мощности на энергетические характеристики сети и последствия такого воздействия.

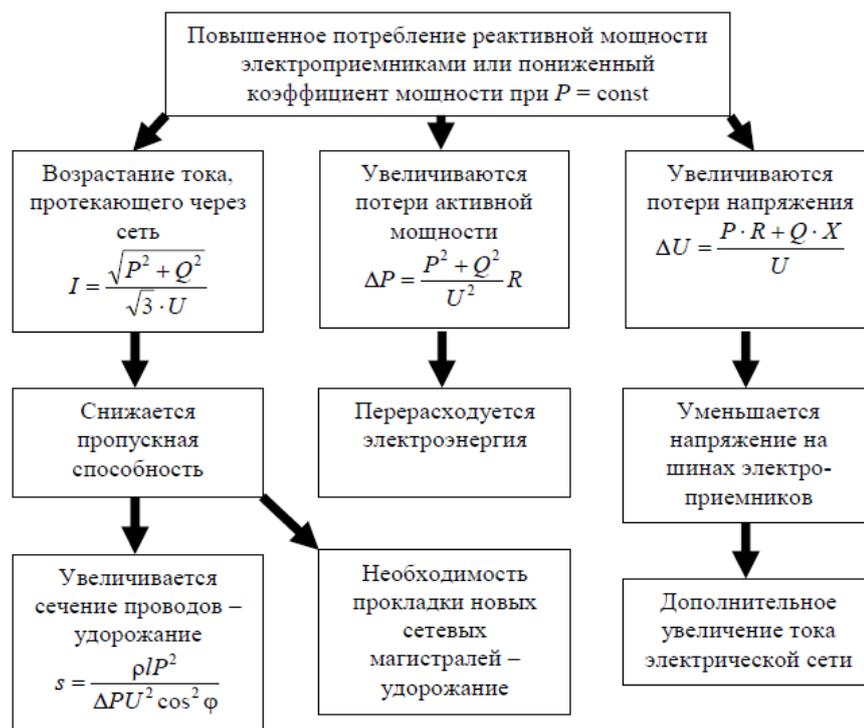


Рис.1. Взаимосвязь проблем повышения *Fig.1. Interrelation of the problems of increasing* потребления реактивной мощности. *reactive power consumption*

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

Учитывая актуальность данной проблемы в источниках литературы можно найти различные варианты способов компенсации реактивной мощности погружных УЭЦН внутри скважины [8-12]. Анализ предлагаемых решений показал, что каждый из рассмотренных вариантов имеет определенные недостатки, связанные, прежде всего, с изменением конструкции установки, а также техническими вопросами монтажа электродвигателей и определением места их крепления. Все это приводит к удорожанию устройства за счет сложности исполнения компонентов и повышения стоимости.

Мы предлагаем использовать погружное устройство для компенсации реактивной мощности с конденсаторами особой формы [13]. Были проведены исследования на основе сравнительных расчетов эффективности работы установки с компенсирующим устройством и без него. В задачи исследования также входило определение места установки устройства для получения максимального эффекта.

Научная и практическая значимость работы заключается в получении положительных результатов при размещении УЭЦН рядом с электродвигателем на насосно-компрессионной трубе внутри скважины. Такое размещение позволяет снизить суммарные годовые потери и сэкономить электроэнергию на процесс перекачки нефти. При этом размеры и масса всего устройства не увеличиваются.

Схема элементов погружного устройства изображена на рис.2. Погружное устройство компенсации реактивной мощности 3 с блоком конденсаторных батарей 4 находится в скважине перед погружным электродвигателем 5, закрепленное на насосно-компрессорной трубе 2. Устройство будет генерировать реактивную мощность и отдавать ее в сеть при наличии напряжения на питающем кабеле 1. При этом электрические потери в питающем кабеле уменьшаются за счет снижения реактивной составляющей тока.

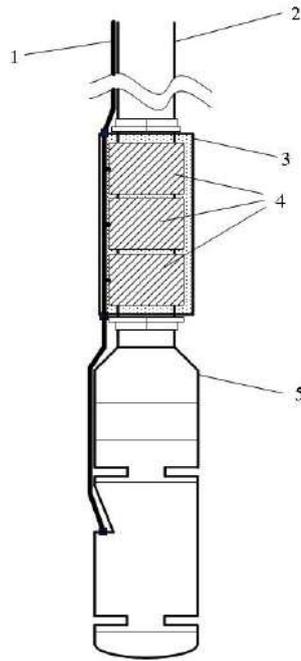


Рис.2. Устройство погружного компенсирующего устройства: 1 – питающий кабель; 2– насосно-компрессорная труба; 3 – компенсирующее устройство; 4 –конденсаторные батареи; 5 – электродвигатель.

Fig.2. The device of the submersible compensating device is: 1 - feeding cable; 2 - pump-compressor pipe; 3 - compensating device; 4 - capacitor batteries; 5 - electric motor.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Определение параметров

Были выбраны и определены параметры питающего кабеля и параметры погружного электродвигателя. В качестве силового был выбран кабель марки КПБП.

Активное и реактивное сопротивление кабеля определялись по выражениям:

$$R = 10^3 \cdot \rho \left(\frac{L}{S} \right) \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 20)] \quad (1)$$

$$X = x_0 \cdot (L) \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника;

L – длина кабеля;

S – сечение кабеля;

T – температура токопроводящих жил;

x_0 – индуктивное сопротивление кабельной линии.

Для расчета был выбран асинхронный погружной электродвигатель (ПЭД) компании «Римера» ЭДСТ110-103М3, параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры погружного электродвигателя
Submersible Motor Parameters

Напряжение, кВ	Мощность, кВт	cosφ	Потребляемая реактивная мощность, квар	Ток, А
2,06	110	0,83	73,92	49

Важной задачей при эксплуатации электротехнических комплексов, позволяющей

снизить энергопотребление, является определение места подключения погружного компенсирующего устройства [14, 15].

Для обоснования места подключения было проведено три расчета: без компенсирующего устройства; с устройством, расположенным в начале участка цепи (точка 1) и с устройством, расположенным в непосредственной близости от электродвигателя, т.е. в конце участка цепи (точка 2).

Источник бесконечной мощности, питающий исследуемую электрическую цепь, имеет напряжение 2,06 кВ и частоту 50 Гц. Необходимый уровень напряжения на погружном электродвигателе регулируется и поддерживается питающим трансформатором с регулируемым коэффициентом трансформации до необходимых значений.

Далее представлены расчеты участка цепи. Потребляемая мощность ПЭД принималась равной активной составляющей мощности в конце цепи P_2 , а потребляемая реактивная мощность равна соответствующей реактивной составляющей мощности Q_2 в конце цепи.

Полная мощность в конце кабеля равна:

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

Ток в электрическом кабеле равен

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (4)$$

Потери напряжения на участке цепи:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \quad (5)$$

Тогда напряжение в начале кабеля будет равно:

$$U_1 = U_2 + \Delta U \quad (6)$$

Активная составляющая потерь полной мощности:

$$\Delta P = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot R \quad (7)$$

Реактивная составляющая потерь полной мощности находится следующим образом:

$$\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot X \quad (8)$$

где U_2 – напряжение сети;

P_2 – активная мощность;

Q_2 – реактивная мощность;

X – реактивное сопротивление кабеля.

Потери полной мощности в питающем электродвигатель кабеле определяются:

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2} \quad (9)$$

Активная мощность в начале участка цепи:

$$P_1 = P_2 + \Delta P \quad (10)$$

Реактивная мощность в начале участка цепи:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q \quad (11)$$

Полная мощность в начале кабеля определяется суммой активной и реактивной составляющих:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (12)$$

Где реактивная составляющая мощности равна: $Q_c = Q_1$, а активная составляющая

равна активной составляющей мощности в начале кабельной линии $P_c = P_1$

Полная мощность сети определяется:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (13)$$

Ток, протекающий в начале электрической сети:

$$I_1 = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot U_c} \quad (14)$$

Коэффициент реактивной мощности сети:

$$\cos \varphi_c = \frac{P_c}{S_c} \quad (15)$$

Результаты расчета участка цепи от управляющей станции до электродвигателя без применения устройства компенсации реактивной мощности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Данные расчета участка цепи без применения погружного устройства компенсации реактивной мощности

S_2 , кВА	132,53
I_2 , А	37,14
ΔU , кВ	0,22
U_1 , кВ	2,28
ΔP , кВ	16,02
ΔQ , квар	0,94
ΔS , кВА	16,05
P_1 , кВт	126,02
Q_1 , квар	74,86
S_1 , кВА	146,58
Q_c , квар	74,86
P_c , кВт	126,02
S_c , кВА	146,58
I_1 , А	37,14
$\cos \varphi_c$	0,86

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Далее были проведены расчеты для этого же участка цепи с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности в начале цепи (рис. 3).

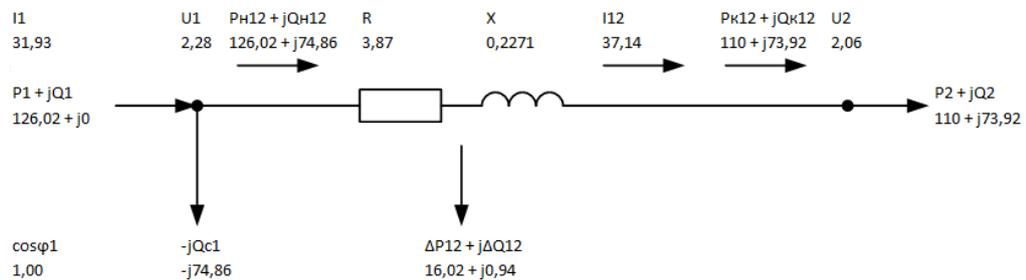


Рис.3 – Схема замещения участка цепи с компенсирующим устройством в начале цепи. Fig. 3 – Circuit replacement of a section of the circuit with a compensating device at the beginning of the circuit

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Мощность компенсаторной установки выбирается равной реактивной мощности в начале участка цепи:

$$Q_{KV} = Q_1$$

Реактивная составляющая мощности сети будет равна:

$$Q_C = Q_1 - Q_{KV}$$

Результаты расчетов параметров участка цепи «управляющая станция – погружной электродвигатель» с применением устройства компенсации реактивной мощности в начале участка цепи приведены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Результаты расчетов участка цепи с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности
Results of the calculation of the chain segment using the reactive power compensation device

S_2 , кВА	132,53
I_2 , А	37,14
ΔU , кВ	0,22
U_1 , кВ	2,28
ΔP , кВ	16,02
ΔQ , квар	0,94
ΔS , кВА	16,05
P_1 , кВт	126,02
Q_1 , квар	74,86
S_1 , кВА	146,58
Q_C , квар	0
P_C , кВт	126,02
S_C , кВА	126,02
I_1 , А	31,93
$\cos\varphi_C$	1

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчеты с установкой погружного устройства компенсации реактивной мощности в непосредственной близости от электродвигателя были проведены в соответствие со схемой (рис.4),



Рис.4 – Схема замещения участка цепи с компенсирующим устройством в непосредственной близости от электродвигателя.

Fig. 4. Circuit diagram of the circuit section with a compensating device in the immediate vicinity of the electric motor

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Реактивная мощность компенсаторной установки компенсации принимается равной реактивной мощности, потребляемой электродвигателем:

$$Q_{KV} = Q_D$$

Результаты расчетов для данного участка цепи показаны в таблице 4.

Таблица 4

Данные расчета участка цепи с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности

Calculation of the chain segment using the reactive power compensation device

S_2 , кВА	110
I_2 , А	30,83
ΔU , кВ	0,21
U_1 , кВ	2,27
ΔP , кВ	11,03
ΔQ , квар	0,65

ΔS , кВА	11,05
P_1 , кВт	121,03
Q_1 , квар	0,65
S_1 , кВА	121,04
Q_C , квар	0,65
P_C , кВт	121,03
S_C , кВА	121,04
I_1 , А	30,78
$\cos\varphi_C$	0,99

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты

Итоги расчетов представлены в таблицах 5 и 6, и на рисунке 5. В таблице 5 приведены абсолютные значения результатов расчета.

Таблица 5
Table 5

Абсолютные значения результатов расчета
Absolute values of calculation results

	S_C , кВА	P_C , кВт	$\cos\varphi_C$	КПД P_C/P_2	ΔU , кВ
Без КУ	146,58	126,02	0,86	0,87	0,22
КУ в точке 1	126,02	126,02	1	0,87	0,22
КУ в точке 2	121,04	121,03	0,99	0,9	0,21

В таблице 6 приведены относительные значения результатов расчета.

Таблица 6
Table 6

Относительные значения результатов расчета
Calculation Ratio

	S_C , кВА	P_C , кВт	ΔU , кВ	$\cos\varphi_C$	КПД P_C/P_2
Без КУ	1	1	1	0,86	0,96
КУ в точке 1	0,86	1	1	1	0,96
КУ в точке 2	0,83	0,96	0,95	0,99	1

Расчеты показали, что нагрузка реактивной составляющей кабеля практически отсутствует, что приводит к уменьшению потери мощности.

Из данных таблиц видно, что после установки погружного устройства активная мощность, потребляемая электродвигателем, уменьшилась с 126,02 кВт до 121,03 кВт. Потребляемая полная мощность снизилась с 146,58 кВА до 121,04 кВА. КПД электрического двигателя увеличился с 87% до 91%. Ток в кабеле снизился с 37,14 А до 30,78 А, что позволит продлить срок службы оборудования и кабеля.

Таким образом, применение погружного компенсирующего устройства в скважинах для добычи нефти позволяет снизить затраты на электроэнергию и снизить сопутствующие затраты на обслуживание оборудования.

На рисунке 5 приведен сравнительный график результатов: *Источник: составлено автором. Source compiled by the author

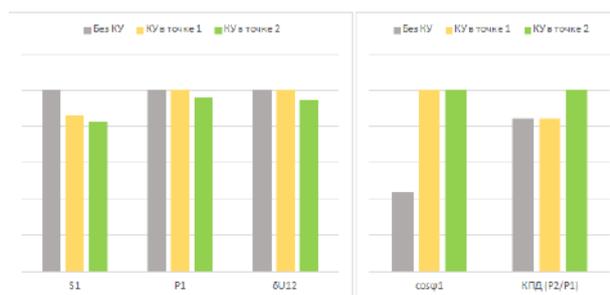


Рис. 5. Сравнение результатов без применения погружного УКРМ, с применением погружного УКРМ в начале цепи (точка 1), с применением погружного УКРМ в непосредственной близости

Fig. 5. Comparison of results without applying submersible UKM, using submersible UKM at the beginning of the chain (point 1), using submersible UKM in the immediate vicinity of the electric motor (point 2).

от электродвигателя (точка 2).

Годовые потери для данной сети были определены на основании максимального числа часов потерь:

$$\delta \mathcal{E} = \delta P \cdot \tau, \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (16)$$

где τ - время максимальных потерь за год;

δP - суммарные потери активной мощности в системе.

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{M_{\text{ср.в}}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760 \text{ ч} \quad (17)$$

где $T_{M_{\text{ср.в}}}$ - средневзвешенное число часов использования максимальной нагрузки, которое определяется по формуле:

$$T_{M_{\text{ср.в}}} = \sum \frac{P}{P_{\text{сум}}} \cdot T_M \text{ ч} \quad (18)$$

где P – мощность узла;

$P_{\text{сум}}$ – суммарная мощность нагрузки;

T_M – число часов использования максимальной нагрузки каждого узла.

Исходя из расчетных данных, средневзвешенное число часов использования максимальной нагрузки равно:

$$T_{M_{\text{ср.в}}} = 6000 \cdot \frac{110}{110} = 6000 \text{ часов};$$

Время максимальных потерь за год:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{6000}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 4592 \text{ ч.}$$

Тогда годовые потери составят:

$$\delta \mathcal{E} = 16,02 \cdot 4592 = 73,5 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч} .$$

Таким образом, суммарные годовые потери электроэнергии в данной системе без применения погружного устройства компенсации реактивной мощности составят $73,5 \cdot 10^3$ кВт·ч

Потери электроэнергии за год в системе с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности в точке 2 составили:

$$\delta \mathcal{E} = 11,03 \cdot 4592 = 50,6 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Снижение потерь электроэнергии за год составило:

$$\delta \mathcal{E} = 73,5 \cdot 10^3 - 50,6 \cdot 10^3 = 22,9 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, проведенное исследование показало, что применение погружного компенсирующего устройства оправдано и имеет хорошие показания энергоэффективности. В результате анализа основных параметров, определяющих энергоэффективность и потери электроэнергии, установлено, что расположение погружного компенсирующего устройства в непосредственной близости от погружного электродвигателя (внутри скважины) позволяет снизить затраты на электроэнергию и снизить сопутствующие затраты на обслуживание оборудования.

Годовые потери электроэнергии в данной системе с применением погружного устройства компенсации реактивной мощности составят $50,6 \cdot 10^3$ кВт·ч, экономия электроэнергии составит $22,9 \cdot 10^3$ кВт·ч с одного устройства.

Согласно нормам, на один куст можно располагать до 24 скважин. Учитывая, что на нефтяных промыслах России в основном группируются от 16 до 24 скважин на куст, экономия может достигать десятков миллионов рублей в год.

В данной статье проведено исследование энергетических и экономических характеристик предлагаемого изобретения. Авторами в дальнейшем планируется провести исследование и моделирование данного устройства на термические, вибрационные и механические воздействия, с целью адаптации, внесения улучшений и выбора материала изготовления данной конструкции. На данный момент планируется изготовление корпуса изделия из эпоксидного компаунда.

Отечественной промышленностью освоены и применяются эпоксидные компаунды. В зависимости от назначения и необходимых термических характеристик для сред с высокой температурой применяют эпоксидно-диановый компаунд ЭД-20 или ЭД-15. Их рабочая температура до 160 и 250 градусов соответственно. Существуют и другие эпоксидные компаунды и смолы, их термические, эксплуатационные и механические характеристики зависят от добавляемых примесей. Так, например, при добавлении таких отвердителей как меламин и дициандиамида получают материалы способные выдерживать свыше 550 градусов. Такие материалы широко применяются в военной и космической промышленности.

Литература

1. Копырин В. А. Индивидуальная компенсация реактивной мощности погружного асинхронного электродвигателя / В. А. Копырин // Конференция НЕФТЬ И ГАЗ 2016: Сборник трудов. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. – С. 336-335.
2. Абрамович Б.Н. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов / Б.Н. Абрамович // Нефтяное хозяйство. – 2010. – №9. – С. 104-106.
3. Смирнов О. В. К вопросу об использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности / О. В. Смирнов, В. А. Копырин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. – № 2. – С. 68-70.
4. Ануфриев, С.Н. Опыт эксплуатации УЭЦН в условиях повышенного содержания мехпримесей / С.Н. Ануфриев, С.В. Погорелов // Производственно-технический нефтегазовый журнал «Инженерная практика». – 2010. – №2. – С. 66-72.
5. Abramovich, V. N. The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms / V. N. Abramovich, Y. A. Sychev // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, Russia, 15-17 November 2016). Article number: 7818962. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818962.
6. Иваноский В.Н. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В.Н. Иваноский, А.А. Сабиров А. В. Деговцов, Ю. А. Донской, А. В. Булат, А. С. Зуев, С. Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. – № 4. – С. 25-30.
7. Мещанков, Г. И. Тепловой расчет кабеля-удлинителя в нефтяной скважине / Г.И. Мещанков // ПТНЖ «Электро». – 2010. – № 1. – С. 33-35.
8. Пат. 2485660 Российская федерация, МПК H02K 5/12, F04D 13/08. Погружной электродвигатель с повышенным коэффициентом мощности / Н. Г. Ибрагимов, Р. Г. Заббаров, И.Д. Фаткуллин, Р. И. Гарифуллин, Д.С. Грабовецкий - №20111388688; заявл. 22.09.2011; опубл. 27.03.2013, Бюл. №9.
9. Пат. 145053 Российская федерация, МПК H02J 3/18, G05F 1/70. Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности / В. А. Копырин, Н. В. Гара, А. Л. Портнягин, О.И. Смирнов - №2014116437/07; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25.
10. Пат. 2595256 Российская федерация, МПК H02J 3/18. Погружное фильтрокомпенсирующее устройство / В. А. Копырин, А. Л. Портнягин, О.И. Смирнов - №2015116849; заявл. 30.04.2015; опубл. 29.08.2016, Бюл. №24.
11. Пат. 159860 Российская федерация, МПК H02J 3/18. Погружной компенсатор реактивной мощности / В. А. Копырин - №2015140690; заявл. 23.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №5.
12. Пат. 159811 Российская федерация, МПК E21B 43/12, F04D 13/10. Погружная

насосная установка с повышенным коэффициентом мощности / В. А. Копырин, А. Л. Портнягин, О.И. Смирнов - №2015140165; заявл. 21.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №5

13. Пат. 2779873 Российская федерация, МПК H02J 3/18, H02K 5/12, F04D 13/10. Погружное устройство компенсации реактивной мощности / Р. В. Сабитов - №2022103208; заявл. 09.02.2022; опубл. 14.09.2022, Бюл. №26.

14. Kovalev, A. Yu. The parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production / A. Yu. Kovalev, Ye. M. Kuznetsov, V. V. Anikin // IEEE Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015 International Siberian Conference. – P. 1-4.

15. Mishra, V. Power loss reduction of 11 kV feeder using capacitor banks to distribution transformers – a case study / V. Mishra, M. P. Sharma, B. Vyas, S. R. Ola // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853164.

Авторы публикации

Сабитов Руслан Валерьевич – аспирант кафедры электрические станции сети и системы электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Кирпичникова Ирина Михайловна – д.т.н., профессор кафедры электрические станции сети и системы электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Горшков Константин Евгеньевич – к.т.н., доцент кафедры электрические станции, сети и системы электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

References

1. Копырин В.А. *Individual'naya kompensaciya reaktivnoj moshchnosti pogruzhnogo asinhronnogo elektrodvigatelya* / V. A. Kopyrin. Konferenciya NEFT' I GAZ 2016: Sbornik trudov. – М.: Izdatel'skij centr RGU nefti i gaza (NIU) im. I. M. Gubkina, 2016. – S. 336-335.

2. Abramovich B.N. Dinamicheskaya ustojchivost' raboty ustanovok elektrocentrobezhnyh nasosov / B.N. Abramovich. *Neftyanoe hozyajstvo*. 2010;9;104-106.

3. Smirnov O. V. K voprosu ob ispol'zovanii vnutriskvazhinnyh kompensatorov reaktivnoj moshchnosti / O. V. Smirnov, V. A. Kopyrin. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz*. 2015;2:68-70.

4. Anufriev S.N. Opyt ekspluatatsii UECN v usloviyah povyshennogo sodержaniya mekhprimesej / S.N. Anufriev, S.V. Pogorelov. *Proizvodstvenno-tekhnicheskij neftegazovyy zhurnal «Inzhenernaya praktika»*. 2010;2:66-72.

5. Abramovich BN. *The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms* / B. N. Abramovich, Y. A. Sychev. IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, Russia, 15-17 November 2016). Article number: 7818962. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7818962.

6. Ivanoskij V.N. Voprosy energoeffektivnosti ustanovok elektroprivodnyh centrobezhnyh nasosov / V.N. Ivanoskij, A.A. Sabirov A. V. Degovcov, YU. A. Donskoj, A. V. Bulat, A. S. Zuev, S. B. YAkimov. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2016;4:25-30.

7. Meshchankov G. I. Teplovoj raschet kabelya-udlinitelya v neftyanoy skvazhine / G.I. Meshchakov. PTNZH «Elektro». 2010;1:33-35.

8. Pat. 2485660 Rossijskaya federaciya, MPK H02K 5/12, F04D 13/08. *Pogruzhnoj elektrodvigatel' s povyshennym koefitsientom moshchnosti* / N. G. Ibragimov, R. G. Zabbarov, I.D. Fatkullin, R. I. Garifullin, D.S. Graboveckij - №20111388688; заявл. 22.09.2011; опубл. 27.03.2013, Бюл. №9.

9. Pat. 145053 Rossijskaya federaciya, MPK H02J 3/18, G05F 1/70. *Vnutriskvazhinnyj kompensator reativnoj moshchnosti* / V. A. Kopyrin, N. V. Gara, A. L. Portnyagin, O.I. Smirnov - №2014116437/07; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25.

10. Pat. 2595256 Rossijskaya federaciya, MPK H02J 3/18. *Pogruzhnoe fil'trokompensiruyushchee ustrojstvo* / V. A. Kopyrin, A. L. Portnyagin, O.I. Smirnov - №2015116849; заявл. 30.04.2015; опубл. 29.08.2016, Бюл. №24.

11. Pat. 159860 Rossijskaya federaciya, MPK H02J 3/18. *Pogruzhnoj kompesator reaktivnoj moshchnosti* / V. A. Kopyrin - №2015140690; заявл. 23.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №5.

12. Pat. 159811 Rossijskaya federaciya, MPK E21B 43/12, F04D 13/10. *Pogruzhnaya nasosnaya ustanovka s povyshennym koefitsientom moshchnosti* / V. A. Kopyrin, A. L.

Portnyagin, O.I. Smirnov - №2015140165; zayavl. 21.09.2015; opubl. 20.02.2016, Byul. №5

13. Pat. 2779873 Rossijskaya federaciya, MPK H02J 3/18, H02K 5/12, F04D 13/10. *Pogruzhnoe ustrojstvo kompensacii reaktivnoj moshchnosti* / R. V. Sabitov - №2022103208; zayavl. 09.02.2022; opubl. 14.09.2022, Byul. №26.

14. Kovalev, A. Yu. *The parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production* / A. Yu. Kovalev, Ye. M. Kuznetsov, V. V. Anikin // IEEE Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015 International Siberian Conference. – P. 1-4.

15. Mishra, V. *Power loss reduction of 11 kV feeder using capacitor banks to distribution transformers – a case study* / V. Mishra, M. P. Sharma, B. Vyas, S. R. Ola // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853164.

Authors of the publication

Ruslan V. Sabitov – Postgraduate Student of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia;

Irina M. Kirpichnikova – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia;

Konstantin E. Gorshkov – Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (Технические науки)

Получено **29.03.2023г.**

Отредактировано **05.06.2023г.**

Принято **09.06.2023г.**

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 338.45:620.9

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОГРАММЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА УРОВЕНЬ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Прусов С.Г., Зорина Т.Г., Юркевич О.И.

Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, РУП «Витебскэнерго»
Республика Беларусь

Резюме: Начиная с 2006 г. в энергетической отрасли Беларуси проводились отдельные мероприятия, связанные с её цифровизацией. Однако они на протяжении длительного времени носили несистемный характер и реализовывались как отдельные программы с узкоспециализированным направлением. Примером таких мероприятий, осуществляемых в объединенной энергосистеме Беларуси, является реализация «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года», в рамках которой осуществляется замена индукционных приборов учета электрической энергии на электронные для возможности последующего их объединения в систему АСКУЭ. При этом исследований, посвященных методологии оценки уровня цифровизации энергетики Беларуси, практически не существовало до настоящего времени. Лишь к 2020 г. появились первые исследования, посвященные методологии оценки уровня цифровизации отраслей национальной экономики. Исследования, посвященные пост-анализу эффективности цифровой трансформации даже в рамках отдельных мероприятий в электроэнергетике, практически отсутствуют. Настоящая статья посвящена освещению вопросов пост-анализа эффективности цифровизации систем учета электрической энергии в Беларуси. В связи с чем исследование является новым и актуальным.

ЦЕЛЬ. Провести экономический анализ влияния программы цифровизации систем учета электрической энергии на уровень тарифов на электроэнергию в Республике Беларусь, а также дать заключение о целесообразности её реализации с точки зрения анализа эффективности. **МЕТОДЫ.** Для осуществления анализа использованы методы статистического наблюдения, сравнения и математического прогнозирования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье приведены результаты пост-анализа эффективности замены индукционных приборов учета на электронные в 2015 - 2023 годах. Сделан сравнительный анализ результатов замены планировавшихся как в технико-экономическом обосновании, послужившим основанием для формирования «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года», которая в настоящее время реализуется в Республике Беларусь, так и с самим обоснованием экономической целесообразности, заложенным в вышеуказанную программу. Проведена оценка эффективности влияния цифровизации данного аспекта деятельности РУП-облэнерго и влияние выполнение «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» на уровень тарифов на энергию. Объектом исследования является РУП «Витебскэнерго». В исследование участвовало более 20 000 домашних хозяйств, а также субъектов хозяйствования Витебской области Республики Беларусь, что позволило распространить среднее значения показаний доучёта электрической энергии на всю выборку заменяемых электронных приборов учета электрической энергии в Республике.

Ключевые слова: последствия цифровой трансформации; тарифы на электрическую энергию; тарифная политика; индукционные и электронные приборы учета; программа модернизации средств учета электрической энергии.

Для цитирования: Малёв Н.А. Исследование цифровых моделей чувствительности следящего электропривода // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С.140-156.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE DIGITALIZATION PROGRAM OF ELECTRIC ENERGY METERING SYSTEMS ON THE LEVEL OF ELECTRICITY TARIFFS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

SG. Prusov, TG. Zorina, OI. Yurkevich

Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, RUE
«Vitsebskenergo»
Republic of Belarus

Abstract: Since 2006, separate events related to its digitalization have been held in the energy sector of Belarus. However, for a long time they were of a non-systemic nature and were implemented as separate programs with a highly specialized direction. An example of such measures carried out in the unified energy system of Belarus is the implementation of the "Program for the modernization of electric energy metering devices until 2023", within the framework of which induction electric energy metering devices are replaced with electronic ones for the possibility of their subsequent integration into the ASKUE system. At the same time, there have been practically no studies devoted to the methodology of assessing the level of digitalization of the Belarusian energy sector until now. It was only by 2020 that the first studies on the methodology for assessing the level of digitalization of sectors of the national economy appeared. There are practically no studies devoted to post-analysis of the effectiveness of digital transformation, even within the framework of individual measures in the electric power industry. This article is devoted to highlighting the issues of post-analysis of the effectiveness of digitalization of electric energy metering systems in Belarus. In this connection, the study is new and relevant.

THE GOAL. To conduct an economic analysis of the impact of the digitalization program of electric energy metering systems on the level of electricity tariffs in the Republic of Belarus, as well as to give a conclusion on the feasibility of its implementation from the point of view of efficiency analysis. **METHODS.** Methods of statistical observation, comparison and mathematical forecasting were used to carry out the analysis. **results.** The article presents the results of a post-analysis of the effectiveness of replacing induction metering devices with electronic ones in 2015-2023. A comparative analysis of the results of the replacement planned in the feasibility study, which served as the basis for the formation of the «Program for the modernization of electric power metering devices electric energy until 2023» at the level of energy tariffs. The object of the study is RUE «Vitsebskenergo». The study involved more than 20,000 households, as well as business entities of the Vitebsk region of the Republic of Belarus, which made it possible to extend the average values of readings before electric energy metering to the entire sample of replaceable electronic electric energy metering devices in the republic.

Keywords: consequences of digital transformation; tariffs for electric energy; tariff policy; induction and electronic metering devices; program of modernization of electric energy metering devices.

For citation: Prusov SG., Zorina TG., Yurkevich OI. Assessment of the impact of the digitalization program of electric energy metering systems on the level of electricity tariffs in the Republic of Belarus. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):140-156.

Введение

С 2006 г. в энергетической отрасли Беларуси проводились отдельные мероприятия, связанные с её цифровизацией. Однако они на протяжении длительного времени носили несистемный характер и реализовывались как отдельные программы с узкоспециализированным направлением. Примером таких мероприятий, осуществляемых в объединенной энергосистеме Беларуси, является реализация «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года», в рамках которой осуществляется

замена индукционных приборов учета электрической энергии на электронные для возможности последующего их объединения в систему АСКУЭ. При этом исследований, посвященных методологии оценки уровня цифровизации энергетики Беларуси, практически не существовало до настоящего времени. Лишь к 2020 г. появились первые исследования, посвященные методологии оценки уровня цифровизации отраслей национальной экономики. Исследования, посвященные пост-анализу эффективности цифровой трансформации даже в рамках отдельных мероприятий в электроэнергетике, практически отсутствуют. Настоящая статья посвящена освещению вопросов пост-анализа эффективности цифровизации систем учета электрической энергии в Беларуси. В связи с чем исследование является новым и актуальным.

Цифровизация, в том числе в энергетике является достаточно востребованным и даже «модным», на сегодняшнее время направлением исследований, которые можно систематизировать или объединить в следующие основные группы:

1. раскрывающие суть процессов цифровизации [1, 2];
2. обосновывающие целесообразность цифровизации основных процессов жизнедеятельности социума [1, 3];
3. основные направления цифровизации [4];
4. регламентирующие на законодательном уровне вопросы цифровой трансформации. Например, необходимость её реализации и основные ориентиры закладываются в ряд нормативно-правовых актов Республики Беларусь [5].;
5. сроки и вопросы финансирования цифровизации электроэнергетики;
6. проблемные вопросы и «стоп-факторы» (риски) цифровизации.

Так, Басуловым А.Н. [1, с.29] суть цифровой электроэнергетики характеризуется как создание информационно-телекоммуникационной инфраструктуры и аппаратно-программных средств, обеспечивающих технологическую возможность применения решений промышленного интернета, мероприятия по совершенствованию нормативно-правовой и нормативно-технической документации, меры по кадровому и информационному обеспечению. При этом основой цифровизации в электроэнергетике является автоматизация, в т. ч. внедрение интеллектуального учёта электроэнергии [2]. Актуальность цифровизации обусловлена распространением распределённой генерации, созданием микросетей, развитием накопителей электроэнергии и возобновляемых источников энергии, которые потребитель может устанавливать у себя и даже становиться производителем электроэнергии [3]. Цифровизация – не самоцель, а средство повышения эффективности отрасли, способ достижения уровней ведущих мировых экономик [1, с. 34]

Согласно [4,с.3-4] Жуковым О.А. систематизированы следующие основные направления цифровизации:

- 1) Расширение использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). По прогнозам «ВВС» к 2050 году весь мир будет полностью обеспечен энергией из ВИЭ;
- 2) Глубокая децентрализация производства электроэнергии, децентрализованные рынки, частные инвестиции;
- 3) Интеллектуализация базовой инфраструктуры, развитие технологий «умных» сетей (smart grids);
- 4) Переход потребителей («просьюмеров») к активным моделям поведения (активный потребитель в центре энергосистемы), развитие гибких систем, адаптирующихся под запросы потребителей;
- 5) Технологии систем накопления, хранения электроэнергии, в том числе хранение энергии в водородном цикле («экспорт водорода»);
- 6) Рост эффективности использования энергии, распространение технологий и практики энергосбережения;
- 7) Углубление электрификации промышленности и транспорта;
- 8) Цифровые подстанции;
- 9) Повышение уровня автоматизации и информатизации;
- 10) Модель новой конфигурации систем – «интернета энергии» («Internet of Energy»);
- 11) Разработка систем хранения и обработки больших баз данных («Big Data»);

- 12) Технология «интернета вещей» - цифровые датчики, сенсоры, актуаторы (исполнительные устройства), средства коммуникации («Internet of Things»);
- 13) Системы предиктивной (прогнозной) аналитики («Predictive analytics»);
- 14) Кибербезопасность электроэнергетических систем;
- 15) Перспективная высоковольтная и высокочастотная электроника.

Данным исследователем в качестве «стоп факторов» цифровизации, применительно к электроэнергетики России выделяются следующие:

- 1) Низкий уровень инноваций, зависимость от импортных технологий, оборудования и программного обеспечения. Электроэнергетика внедряет инновации с опозданием в 10-20 лет;
- 2) Недостаточно развитые государственные и частные институты, финансовый рынок;
- 3) Отсутствие полноценной рыночной конкуренции, осложняемое большими масштабами перекрёстного субсидирования;
- 4) Невелик объём возобновляемых источников энергии;
- 5) Распределённая генерация пока представлена слабо;
- 6) Наличие многочисленных «добавок» к цене мощности на оптовом рынке;
- 7) Повышение тарифов и цен на электроэнергию для потребителей;
- 8) Низкая плотность потребления электроэнергии;
- 9) Высокая стоимость строительства;
- 10) Низкая производительность труда;
- 11) Фрагментарность усилий по продвижению новых технологий в отрасли;
- 12) Мало ещё успешных примеров в РФ по внедрению цифровизации с возможностью их тиражирования. Например, в энергетике РФ пока практически нет посчитанных результатов внедрения «интернета вещей»;
- 13) Не завершён ещё процесс стандартизации информационной безопасности решений по развитию «интернета вещей»;
- 14) Не решены вопросы возможности прогнозирования опасных ситуаций в отрасли;
- 15) Не проработана задача онлайн-учёта данных с датчиков, установленных на энергообъектах. Не решён вопрос универсальности данных. Сегодня на энергорынке имеется много протоколов передачи данных, и набор собираемых показателей у каждого свой. Нехватка опыта работы с большим объёмом данных;
- 16) Моральное и физическое старение всего парка работающего оборудования (более 50 % активов сетей единой национальной энергетической сети имеют сверхнормативный срок эксплуатации — более 25 лет, а износ электроэнергетических систем в РФ составляет от 50 до 70 %);
- 17) Преобладание импортных поставок систем управления и автоматизации предыдущего поколения (80 % инвестиций идёт в развитие зарубежных технологий и поставку устаревших решений);
- 18) Настороженное отношение ко всему новому, недостаточный интерес участников рынка к цифровизации;
- 19) Недостаточность инвестиций в цифровизацию. По самым оптимистичным оценкам, в ближайшие годы модернизация энергетики РФ потребует инвестиций в размере 300 млрд. \$;
- 20) Отсутствие доверия и координации между ключевыми участниками рынка электроэнергетики. Необходима тонкая настройка организационно-договорной модели взаимоотношений внутри электросетевого комплекса;
- 21) Нехватка квалификации и опыта практического внедрения новых технологий. Необходима регулярная модернизация образовательных программ для подготовки специалистов по современным информационным технологиям и технологиями цифровой энергетики;

22) В РФ сегодня лишь небольшой процент компаний приступил к практическому внедрению технологий по цифровизации отрасли;

23) Недостаточность нормативной базы для развития цифровой энергетики. Отсутствие единой терминологии по цифровизации;

24) Необходимость обеспечения управляемости, устойчивости и живучести энергетических систем, свойства которых радикально изменяются под влиянием интеллектуализации и цифровизации энергетики;

25) Высокая себестоимость электроэнергии. В России 1 кВт•ч без учёта топливной составляющей и возврата инвестиций более чем в 5 раз превышает аналогичный показатель в европейских странах и США.

В тоже время при детальном анализе авторами, как правило, не осуществляется оценка экономического влияния цифровизации энергетики. Так Ковалевым М.М. в источнике [6] рассматривается преимущество построения «умных сетей», как экономический эффект от их построения отмечается снижение удельных топливных затрат на производство электрической и тепловой энергии за счет модернизации неэкономичных, морально и физически устаревших основных производственных средств ТЭК. В зарубежной литературе в большей мере в качестве последствий цифровизации и обоснованности её целесообразности в энергетике рассматриваются вопросы декарбонизации и децентрализации энергетического сектора с отказом от ископаемого углеводородного топлива, достижение климатической нейтральности и как следствие необходимость трансформации рабочей силы с традиционных профессий в энергетике, на IT-специалистов [7, 8].

Учитывая, что следующие десятилетия процессы цифровизации в энергетической отрасли будут расширяться, её вовлеченность в различные аспекты бизнес-процессов энергокомпаний увеличиваться и, соответственно, расширяться объемы инвестиционных затрат, направляемых на цифровую трансформацию, представляется необходимым до принятия тех или иных решений осуществлять предварительную проработку данных решений с последующим пост-анализом эффективности.

Соответственно, целью настоящего исследования, проведенного авторами было проведение экономического анализа влияния отдельных направлений цифровизации (модернизация приборного парка учета электрической энергии) на уровень тарифов на электрическую энергию, окупаемость данных мероприятий. До настоящего времени в Беларуси подобные исследования не проводились, поскольку сам процесс цифровой трансформации средств учета электрической энергии ещё в настоящее время не закончен, но близиться к своему логическому завершению. Поэтому оценка вышеуказанных аспектов является актуальной как с точки зрения практической, так и научной значимости, поскольку позволит накапливать стоимостную оценку экономических *последствий отдельных бизнес-процессов цифровой трансформации*.

Так к 2010 году для Республики Беларусь встала остро проблема замены морально и физически устаревших индукционных приборов учета электрической энергии. При этом отдельными РУП-облэнерго стали рассматриваться различные варианты данной замены (рисунок 1).

Так, например, на базе цеха технического обслуживания и ремонта приборов учета электрической энергии (далее – ЦТОиРПУЭЭ) филиала «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго» в 2010 году было проведено исследование, обосновывающее необходимость и целесообразность замены индукционных приборов учета на электронные [9].

Обоснование и результаты исследований, являвшихся обоснованием реализации «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» в Республике Беларусь.

В исследовании участвовала выборка из более чем 30 тыс. приборов учета (далее – ПУ), поступивших в ЦТОиРПУЭЭ.

В качестве основных аргументов целесообразности осуществления замены индукционных приборов учета электрической энергии на электронные по результатам исследования обозначились следующие:

1. Согласно ГОСТ 6570-96 [10] с изменениями №1 от 01.09.2004 г. с 01.07.1997 г. [11] прекращен выпуск индукционных счетчиков электроэнергии класса точности 2,5. Их эксплуатация была разрешена данным изменением до истечения первого межповерочного интервала. То есть счетчики класса точности 2,5 должны быть полностью исключены из обращения с 01.09.2012 г.

Согласно письму Комитета по стандартизации, метрологии и сертификации при Совмине РБ от 17.04.2006 г. №03-24/517-р, адресованного ГПО «Белэнерго», было указано на необходимость замены счетчиков класса 2,5 (это, по сути, все счетчики со сроком эксплуатации более 32 лет) после прохождения первого межповерочного интервала после введения данного изменения №1.

Все счетчики (ГОСТ 6570-96) по достижению ими срока эксплуатации 32 года должны пройти перед их проверкой капитальный ремонт. Плановый ремонт и госповерка данных счетчиков согласно ч.2 п.4.7 Правил пользования электрической энергии должны лечь на затраты энергосистемы.



Рис. 1 Варианты замены индукционных приборов учета электрической энергии класса точности 2,5.

Fig. 1 Options for replacing induction electric energy meters of accuracy class 2.5.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В Витебской области на момент исследования индукционные счетчики активной энергии находились в эксплуатации, как у юридических лиц, так и у населения.

В типовых договорах на электроснабжения юридических лиц отсутствует пункт об обезличивании принадлежащего Потребителю электросчетчика. Следовательно, филиал «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго» может путем выдачи предписаний произвести замену на счетчик соответствующего класса точности за счет Потребителя (на основании требований ГОСТ 6570-96 с изменениями №1). Применить данную практику к бытовой группе не представляется возможным из-за наличия в типовых договорах на электроснабжение населения пункта об обезличивании электросчетчиков.

В 2010 г. у населения по Витебской области эксплуатировалось более 500 тыс. шт. электронных приборов учета электрической энергии. Их динамика приведена (согласно ведомственного отчета «Сведения о количестве потребителей электрической и тепловой энергии, обслуживаемых филиалом Энергосбыт») на рисунке 2.

2. Анализ данных о ремонтах счетчиков (приблизительно 82-83 тыс. в год) за 2008 – 8 мес. 2010 г., поступивших на ремонт в ЦТОиРПУЭЭ показал, что более 96% всех поступающих счетчиков в цех является индукционными, из них более 70% старше 32 лет. Таким образом, исходя из установленных у населения 589,1 тыс. счетчиков получилось, что

около 414 тыс. эксплуатируемых в быту ПУ (589,1 тыс. шт. × 70,3%) имели возраст более 32 лет с классом точности, как правило, 2,5 (производились до 1980 г.).

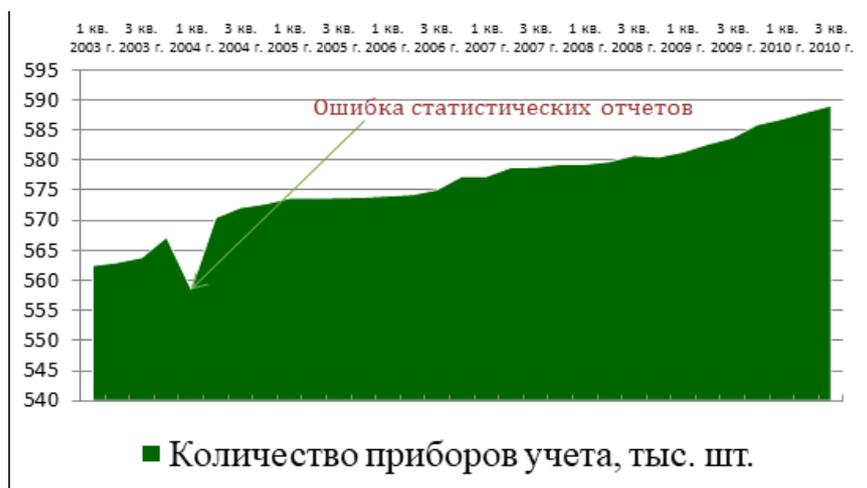


Рис. 2 – Динамика количества электрических счетчиков, эксплуатируемых у населения Витебской области к середине 2010 г. [9]

Fig.2. Dynamics of the number of electric meters operated by the population of the Vitebsk region by mid-2010 [9]

3. Затраты на капитальный ремонт в части переменных затрат на тот момент составляли 91,1% приобретения нового индукционного счетчика классом точности 2.0, а электронный прибор учета стоил в 3 раза дороже индукционного.

4. Фактическая погрешность приборов, поступивших в ЦТОиРПУЭЭ, составляла на момент исследования 6,8%, вместо заявленных 2,5% (отклонение 4,3 п.п.). Основной причиной является наличие трущихся деталей (подшипник, подпятник, счетный механизм), которые со временем изнашиваются, устаревание смазки, попадающая пыль и грязь.

Таким образом, окупаемость мероприятия планировалась за счет следующих эффектов:

- уменьшение переменных затрат на капитальный ремонт (25% стоимости электросчетчика) – сразу после замены;
- снижение потерь электроэнергии на 1,5% – сразу после замены;
- снижение потерь электроэнергии в течение срока эксплуатации (32 года).

Исходными данными для расчета потерь в 2010 г. являлись следующие данные:

- среднее потребление одной точкой учета (с динамикой изменения за один межповерочный интервал) (рисунок 3);

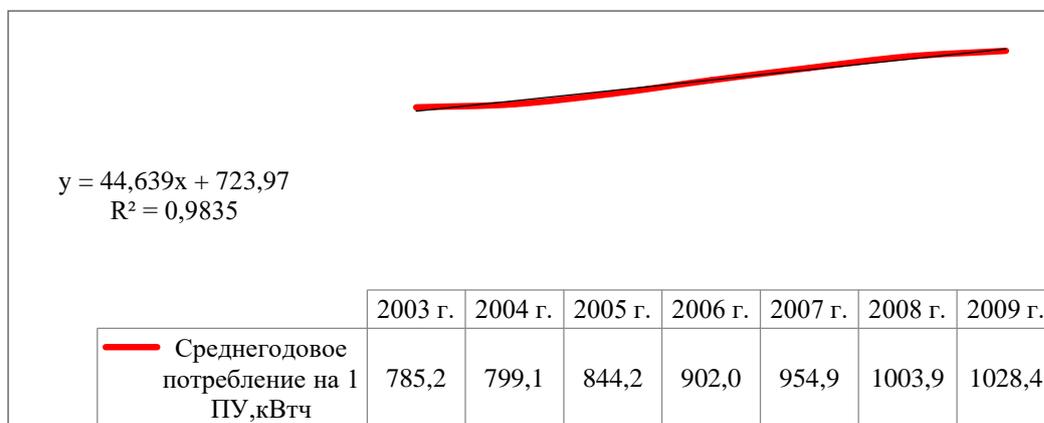


Рис. 3 – Динамика среднегодового

Fig.3 – Dynamics of average annual

потребление 1 ПУ, кВт×ч [9]

consumption of 1 PU, kWh [9]

- среднеотпускной тариф по населению (с динамикой изменения за один межповерочный интервал) (рисунок 4);

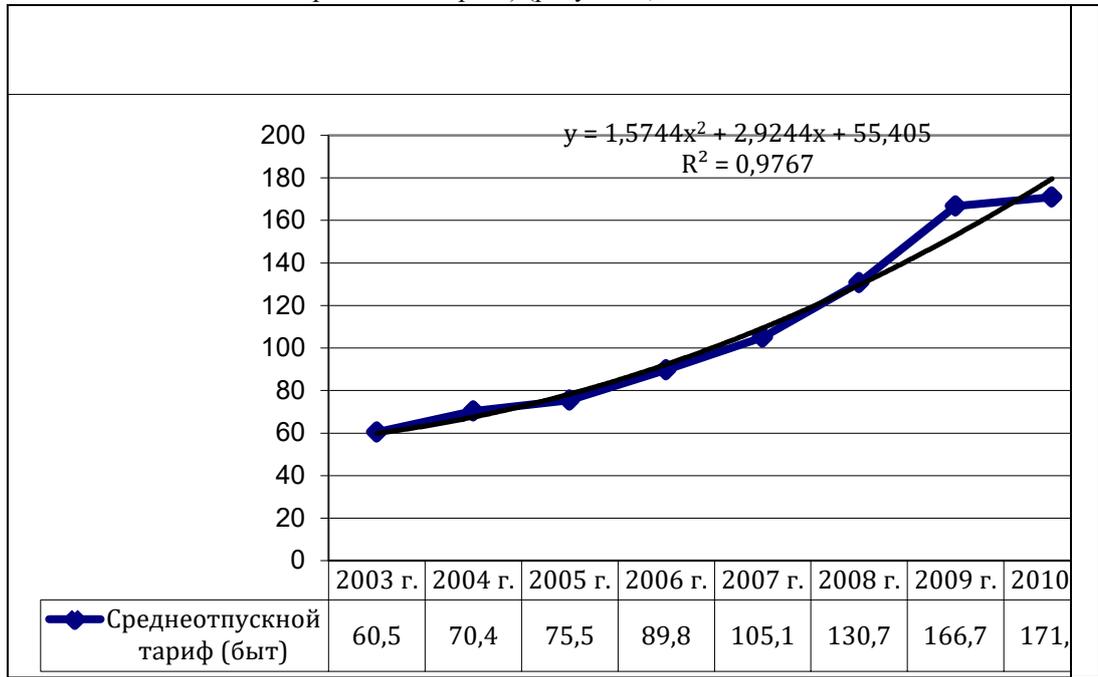
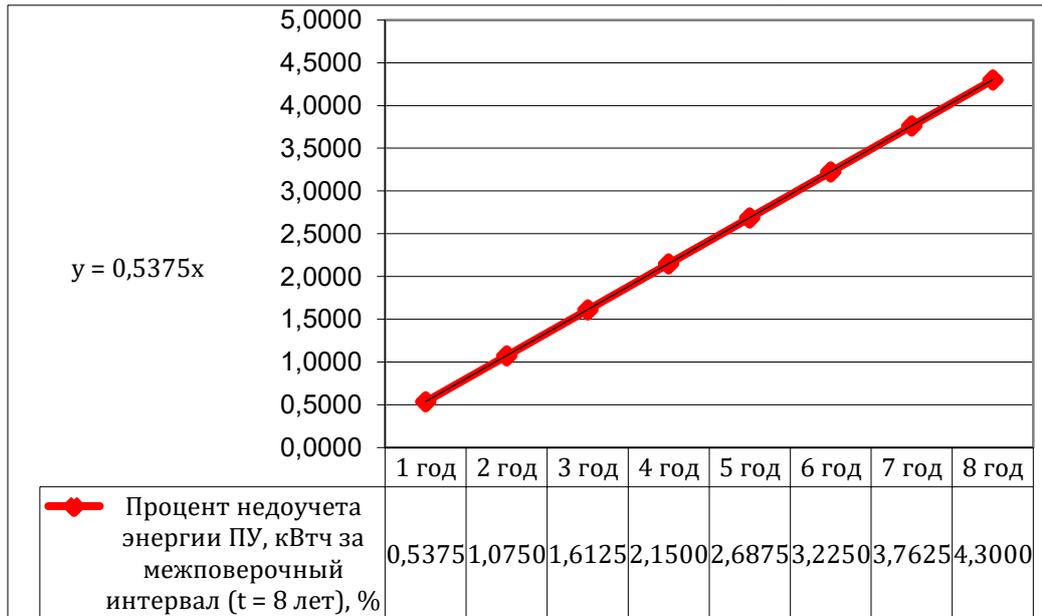


Рис. 4. Динамика изменения среднеотпускных тарифов по бытовой группе потребителей в 2010 г. [9]

Fig. 4 – Dynamics of changes in average discharge tariffs for a household group of consumers in 2010 [9]

- величина недоучета одной точкой учета (фиксированная на момент перехода на другой вид счетчика и величина «ухода» индукционного счетчика, рассчитанная по линейной зависимости) (рисунок 5).



По результатам расчетов простой срок окупаемости мероприятия должен был составить 7,5 лет при эксплуатационном – 32 года.

Рис.5 – Динамика увеличения

Fig. 5 – Dynamics of the increase in the

процента недоучета энергии ПУ за
межповерочный интервал, % [9]

*percentage of underestimation of PU energy
over the verification interval, % [9]*

На основании данного технико-экономического обоснование (далее – ТЭО) в РУП «Витебскэнерго» были сделаны следующие выводы.

1. О целесообразности замены индукционных приборов учета на электронные изначально в промышленной группе. Таким образом, была утверждена «Программа развития приборного парка учета электроэнергии РУП «Витебскэнерго» на 2011 – 2012 гг.» [12].

В данной программе был произведен детализированный расчет потребления на 1 ПУ и осуществлена классификация промышленных потребителей по уровням потребления в среднем в месяц и по видам установленных ПУ (1-фазный, 3-фазный):

- 300 – 500 кВт×ч;
- 500 – 700 кВт×ч;
- более 700 кВт×ч.

Также были детализированы сроки окупаемости по 6 вышеуказанным направлениям, они составили для 1-фазных приборов учета от 2,2 до 4,5 лет, для 3-фазных от 3,2 до 7,4 лет.

2. Отсутствие собственного источника средств для реализации данного мероприятия у потребителей, относимых к населенческой тарифной группе. Данные затраты не были включены в обоснование уровня тарифов на электрическую энергию.

3. Необходимость обоснования целесообразности данного мероприятия в целом по Республике Беларусь, учитывая, что в энергосистеме сложился устойчивый стереотип, основанный на исследованиях данного же подразделения 1980 г., что величина «ухода» индукционного прибора учета за межповерочный интервал составляет не более 1,5% и, соответственно, счетчики, настроенные в пределах класса точности с величиной +2,5%, за межповерочный интервал показывали среднее потребление + 1%.

Итогом данной работы стало утверждение в целом по ГПО «Белэнерго» в 2015 году «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» [13].

«Программа модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» в Республики Беларусь.

В рамках данной программы осуществляется замена индукционных приборов учета электрической энергии на электронные для возможности последующего их объединения в систему АСКУЭ по следующему графику замены (рисунок 6) [13].

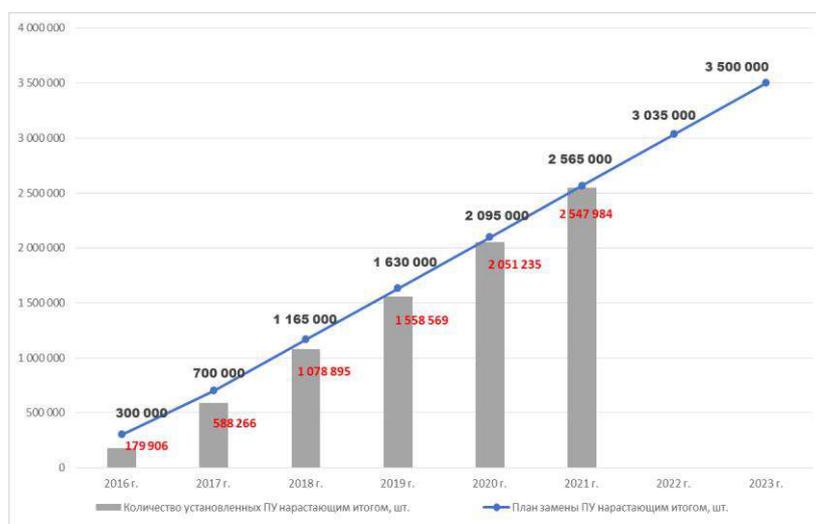
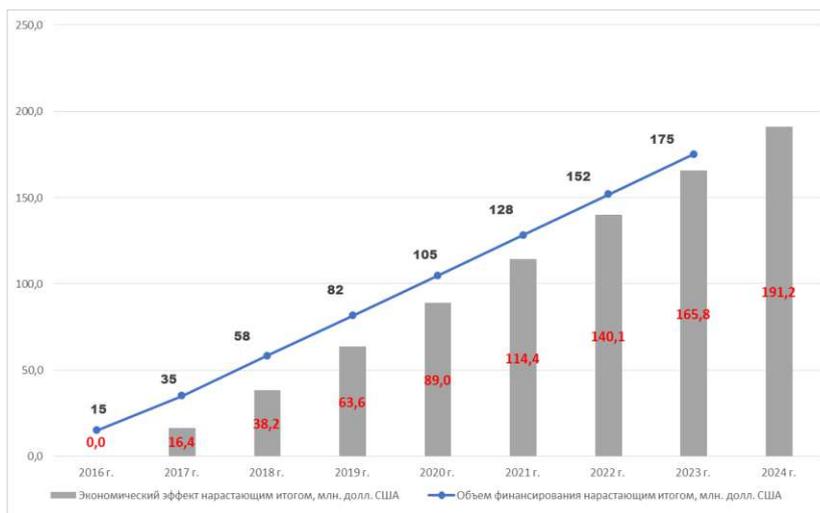


Рис. 6 – Реализация программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года

Fig. 6 – Implementation of the electric energy metering modernization program until 2023

На финансирование данной программы было предусмотрено 175 млн. долл. США, с экономическим эффектом от её реализации к 2024 году на уровне 191,2 млн. долл. США [13]

(рисунок



7).

Рис. 7 – Объем финансирования программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года и ожидаемый эффект от её реализации к 2024 г.

Fig. 7 – The amount of financing for the modernization of electric energy metering facilities until 2023 and the expected effect of its implementation by 2024

В качестве основных факторов получения эффектов рассматривались:

1. Экономия за счет увеличения точности учета. При этом было отмечено, что при нагрузках в 10% и 20%, при которых в основном идет потребление у населения при проведении контрольных замеров в целом по республике погрешность индукционных счетчиков по истечении межповерочного интервала составляла не 6,8% как в исследованиях ЦТОиРПУЭЭ в 2010 г., а 16,8%. При этом для упрощения в расчете экономической эффективности принималось 10%.

Среднее потребление принималось на уровне 1 344 кВт×ч в год, при тарифе для населения 7 цент. США за 1 кВт×ч.

Таким образом, общая экономия по республике должна была составить к 2024 г. с учетом графика замен 141,0259 млн. долл. США.

2. Экономия за счет снижения уровня хищений электрической энергии оценивалась на уровне 10% от годового потребления в бытовом секторе, что эквивалентно 117,7 тыс. долл. США в год и, соответственно, 0,934 млн. долл. США по программе.

3. Экономия за счет ремонтов счетчиков должна была составить приблизительно 20 млн. долл. США.

4. Экономия за счет фонда оплаты труда электромонтеров, занятых заменой приборов учета электрической энергии, рабочих, занятых ремонтом индукционных приборов учета, а также контролеров оценивалась в 29,218 млн. долл. США.

Таким образом, простой срок окупаемости программы должен был составить 8 лет или 1 межповерочный интервал.

Пост-анализ эффективности реализации «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года».

В 2022 г. было проведено исследование, в котором участвовало более 20 тыс. счетчиков, установленных в рамках вышеуказанной программы модернизации. Объектом исследования служили домашние хозяйства, территориально расположенные в Витебской области (рисунок 8).

В выборку были включены как квартиры в многоквартирных жилых домах, так и индивидуальные жилые дома, расположенные в городах областного, районного подчинения и в сельской местности.



Рис. 8 – Территориальное расположение объектов исследования в Витебской области

Fig. . Territorial location of research objects in the Vitebsk region

При этом выбирались квартиры, у которых совпадали сроки окончания межповерочного интервала индукционного прибора учета и дата установки нового электронного. Производился анализ потребления данными объектами ежемесячно за 3 года до данной даты и 3 года после (рисунок 9).

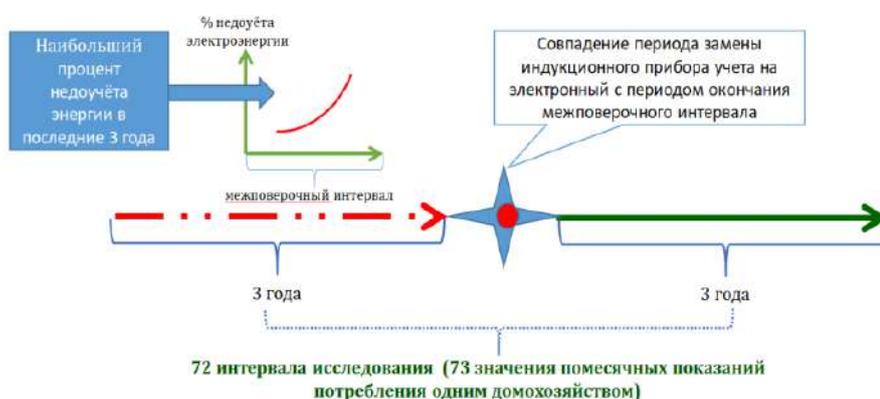


Рис .9. Критерии отбора электронных приборов для исследования

Fig. 9. Criteria for the selection of electronic devices for research

Из выборки исключались квартиры с непостоянным потреблением, осуществляющие оплату равными показаниями, с отсутствующим потреблением в какие-либо периоды и т.п., которые бы искажали данные исследования.

Результаты исследования

В результате было оставлено более 8,3 тыс. квартир в Витебской области в различных её районах, городах, сёлах и деревнях с различным уровнем потребления.

По результатам были получены следующие величины изменения полезного отпуска – +3,9% в среднем за 3 года. Данная величина несколько ниже заложенной в технико-экономическое обоснование, для которого она составляла для последних 3 лет – +5,3% (отклонение минус 1,4 п.п.). И, соответственно, данная величина значительно ниже включенной в Программу модернизации на уровне 10% (отклонение минус 6,1 п.п.).

Фактическая стоимость приобретенных приборов учета за данный период при 50 долл. США, включенных в программу, составила по данным заключенных договоров по Витебской области порядка 45 долл. США. Сравнительный анализ эффективности реализуемого в настоящее время мероприятия приведен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Сравнительный анализ эффективности замены индукционных приборов учета на электронные

Comparative analysis of efficiency of replacement of induction meters with electronic

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Вариант ТЭО	Программа модернизации	Фактический анализ по РУП "Витебск-энерго"	В целом по республике в условиях данных о доучете Витебской области
1	Средняя стоимость электронного прибора учета	долл. США	44,6	50	45,0	45,0
2	Среднее потребление в год на 1 прибор учета	кВт×ч	1052,4	1344	1215,45	1470,40
3	Средний прирост доучета ПУ в год	кВт×ч	55,4	72,4	47,4	57,3
4	Средний тариф для населения	цент США	5,8	7	6,53	6,53
5	Снижение затрат на ремонт в расчете на 1 прибор	долл. США	18,4	5,0	18,4	5,0
6	Экономия в год за счет прироста потребления и снижения затрат на ремонты	долл. США	5,51	5,69	5,40	4,37
7	Окупаемость (простой срок)*	Лет	8,1	8,8	8,3	10,3

* - 8,8 лет срок окупаемости по программе модернизации отличается в связи с исключением из оценки экономии от сокращения штатной численности для сопоставимости анализа.

(*составлено авторами с использованием [9, 13]).

Расчеты эффективности осуществлялись в соответствии с методологией, изложенной в источниках [14, 15].

Таким образом, можно сделать следующие основные выводы:

1. В целом с учетом полученных результатов можно говорить об эффективности реализации данной программы.
2. Фактически получено меньшее значение доучета потребления, чем ожидалось, особенно по сравнению с Программой модернизации. Значения в первоначальном ТЭО отклонились на 14,4% с фактически полученными через 10 лет, и 34,5% по сравнению с программой модернизации, в том числе из-за изменения средней величины потребления (рисунок 10).

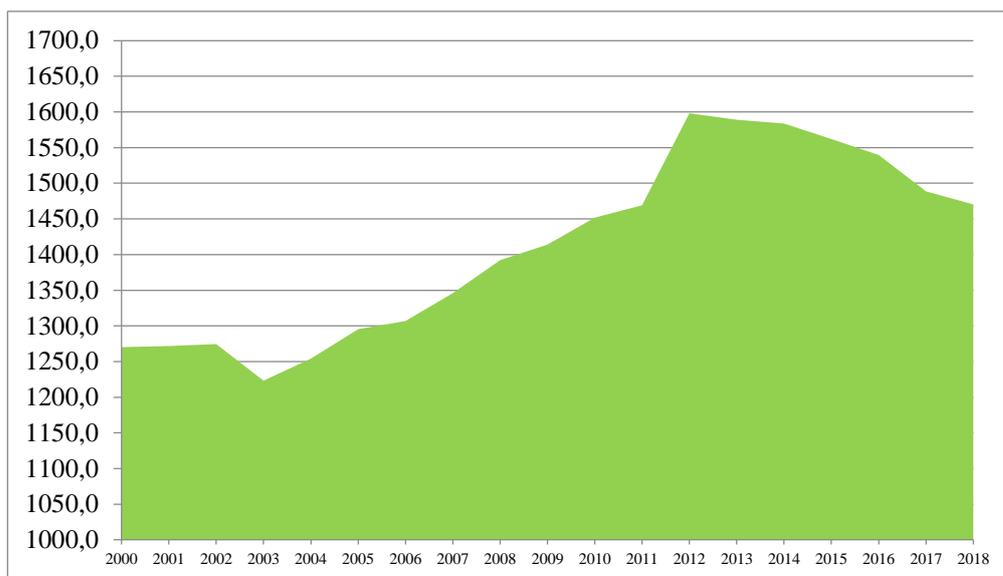


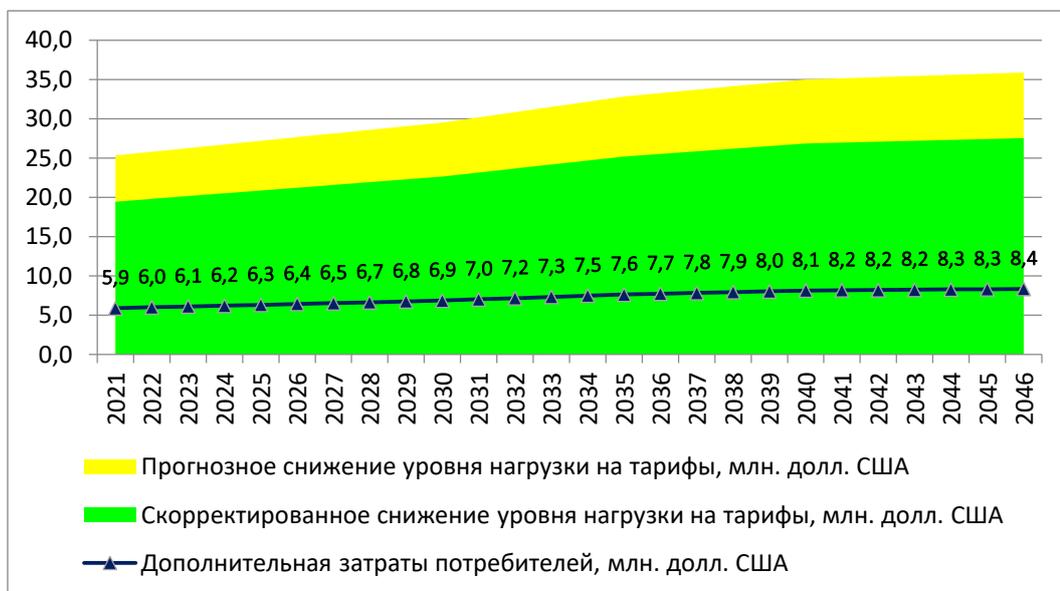
Рис.10 – Динамика среднего потребления населения в год на 1 прибор учета, кВт×ч

Fig.10 – Dynamics of the average consumption of the population per year for 1 metering device, kWh

3. Неоднозначным фактором является оценка переменной составляющей величины ремонта индукционных приборов учета, поскольку РУП «Витебскэнерго» несло данные затраты в 2010 г., а ряд РУП-облэнерго – нет. Вследствие чего, получены различные оценки для РУП «Витебскэнерго» и в целом по Беларуси сроков окупаемости, которые в совокупности со средним потреблением (таблица 1) дали увеличение сроков окупаемости программы для Беларуси.

4. Смещение «вправо» в целом сроков окупаемости по рассмотренным факторам является обычным явлением для большинства инвестиционных проектов, при этом данное смещение не является критичным поскольку срок эксплуатации электронных приборов учета значительно превышает расчетные сроки окупаемости.

5. Смещение вправо сроков окупаемости от заложенных в Программу модернизации свидетельствует об увеличении нагрузки на тариф по сравнению с планировавшимся. Она прогнозируется на уровне 0,015 цент. США / кВт×ч.



Так при базовом сценарии роста потребления по Республике Беларусь до 2046 г. (рисунок 11) совокупные дополнительные затраты ожидаются на уровне 2,9-8,4 млн. долл. США в среднем за год.

Рис.11 – Дополнительные затраты потребителей энергии Республики Беларусь, связанные с цифровизацией приборов учета электрической энергии при базовом сценарии роста потребления

Fig. 11 – Additional costs of energy consumers of the Republic of Belarus associated with digitalization of electric energy metering devices under the basic scenario of consumption growth

При консервативном сценарии роста потребления по Республике Беларусь до 2046 г. (рисунок 12) совокупные дополнительные затраты ожидаются на уровне 2,9-8,1 млн. долл. США в среднем за г

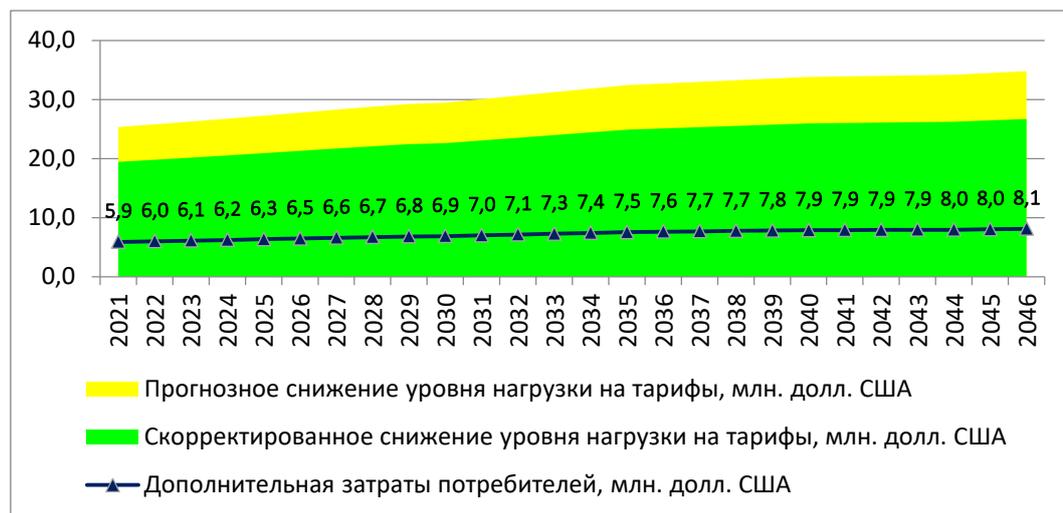
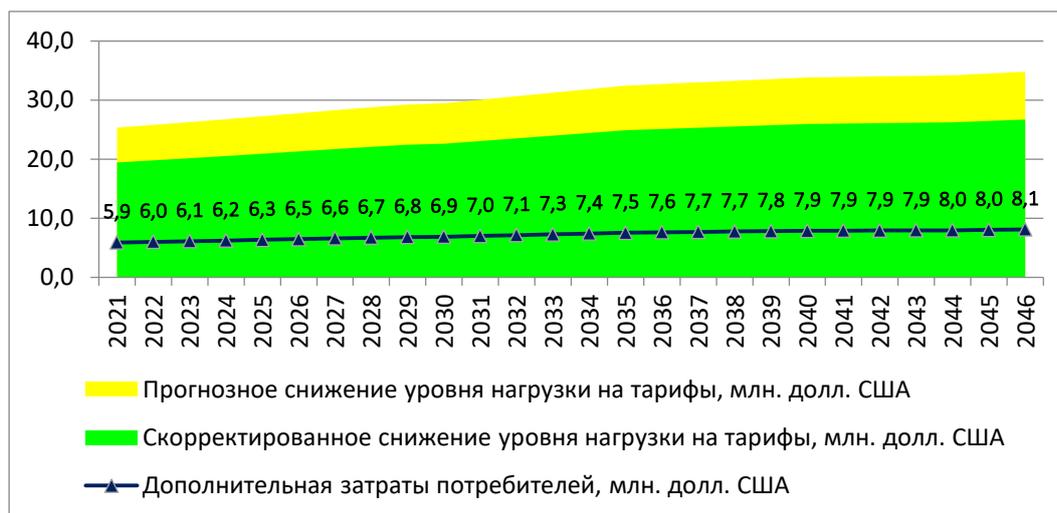


Рис.12 – Дополнительные затраты потребителей энергии Республики Беларусь, связанные с цифровизацией приборов учета электрической энергии при консервативном сценарии роста потребления

Fig. 12 – Additional costs of energy consumers of the Republic of Belarus associated with digitalization of electric energy metering devices under a conservative scenario of consumption growth



Это свидетельствует о неоднозначных последствиях реализации мероприятий цифровизации на технологической стадии «распределение» в энергетическом производстве Республики Беларусь, которые при всех положительных аспектах имеют также и негативные с точки зрения потребителей энергии экономические результаты (рост тарифов). Отдельные аспекты данной проблематики отражены по другим стадиям энергетического производства в [16, 17]. Также необходимо отметить, что

Литература

1. Буслов А.Н. Практическая цифровизация // Энергия единой сети. 2018. № 4 (39). – с. 28-34.
2. Ливинский, П. Основой для будущих процессов трансформации в электроэнергетике станет цифровизация сетей: // Источник [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <http://www.rosseti.ru/> — Дата доступа: 01.04.2023.
3. Чистова, Е. Передавать с умом // Атомный эксперт. 2018. № 7 (октябрь). – с. 22-27.
4. Жуков, О.А. Аспекты цифровизации электроэнергетики и электротехнической экспертизы // Источник [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.esa-conference.ru/> — Дата доступа: 01.04.2023.
5. Стратегия информатизации и цифровой трансформации государственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» на период 2021 – 2025 годы : приказ ГПО «Белэнерго» от 9.04.2021 г. №75 // Бизнес-инфо [Электронный ресурс] / ООО «Профессиональные правовые системы», Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. Минск, 2020.
6. Ковалев, М.М. Цифровая экономика – шанс для Беларуси : моногр. / М.М. Ковалев, Г.Г. Головенчик. – Минск : Изд. центр БГУ, 2018. – 327 с.
7. Thomson, J. Decarbonized workforce in the energy sector Источник [Электронный ресурс]. – 2021. Available at: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/decarbonization-strategy-power-workforce.html> — Accessed to: 01.04.2023.
8. Marco Zaccello, Theo van Andel Digital transformation in Energy and Utilities sector – 2021. – Available at: <https://blog.equinox.com/blog/2021/03/19/digital-transformation-in-the-energy-and-utilities-sector/> Accessed to: 01.04.2023.
9. Прусов Г.В., Прусов С.Г. Техничко-экономическое обоснование замены индукционных счетчиков со сроком эксплуатации свыше 32 лет. Вариант 1 Индукционные, классом точности 2.0. Вариант 2. Электронные, классом точности 1.0. / Г.В. Прусов, С.Г. Прусов // Филиал «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго. – 2010. – 13 с.
10. ГОСТ 6570-96 Межгосударственный стандарт. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Общие технические условия. Electrical induction active and reactive energy meters. General specifications ОКС 17.220. ОКП 42 2820, 42 2830, 42 2840 Дата введения 1997-07-01 // ИПК Издательство стандартов. – М. – 69 с.
11. Изменение № 1 ГОСТ 6570-96 Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Общие технические условия. Группа П32 МКС 17.220.20 Дата введения 1 июня 2004 года Принято Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (Протокол № 23 от 22.05.2003) – М. – 1 с.

12. Программа развития приборного парка учета электроэнергии РУП «Витебскэнерго» на 2011 – 2012 годы // РУП «Витебскэнерго». – 2010. – 37 с.
13. Программа модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года, утвержденная Первым заместителем генерального директора – главным инженером ГПО «Белэнерго» А.В. Сиваком от 28.09.2015 г.
14. Прусов, С.Г. Оценка эффективности инвестиционных проектов в электроэнергетике: моногр. / С. Г. Прусов. — Минск : Мисанта, 2016. 228 с.
15. Прусов, С.Г. Разработка бизнес-плана инвестиционного проекта с учетом анализа рисков / С.Г. Прусов. – Минск : Бестпринт, 2018. – 183 с.
16. Большев, В.Е., Виноградов, А.В. Перспективные коммуникационные технологии для автоматизации сетей электроснабжения / В.Е. Большев, А.В. Виноградов // Вестник КГЭУ. – 2019. - №2 (42). – С. 65 – 82.
17. Шубина, С.К., Логачева, А.Г. Концепция единой системы управления состоянием энергетического оборудования / С.К. Шубина, А.Г. Логачева // Вестник КГЭУ. – 2019. - №2 (42). – С. 24 – 37.

Авторы публикации

Прусов Станислав Геннадьевич – канд. экон. наук, ведущий научный сотрудник сектора «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Беларусь), prusovstas@mail.ru

Зорина Татьяна Геннадьевна – д-р экон. наук, доцент, заведующий сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Беларусь); tanyazorina@tut.by

Юркевич Ольга Ивановна – аспирант БГЭУ (Минск, Беларусь), oi.yurkevich@yandex.by

Reference

1. Buslov A.N. Practical digitalization. *The energy of a single network*. 2018;4 (39):28-34.
2. Livinsky P. *Digitalization of networks will become the basis for future transformation processes in the electric power industry*: Source [Electronic resource]. 2022. Access mode: <http://www.rosseti.ru/> / Access date: 01.04.2023.
3. Chistova, E. Transmit wisely. *Atomic Expert*. 2018. No. 7 (October). – pp. 22-27.
4. Zhukov O.A. *Aspects of digitalization of electric power industry and electrotechnical expertise*. Source [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: <https://www.esa-conference.ru/> — Access date: 01.04.2023.
5. *Strategy of informatization and digital transformation of the State Association of electric power industry Belenergo for the period 2021-2025* : order of GPO Belenergo dated 9.04.2021 No. 75. Business info [Electronic resource] / LLC "Professional legal Systems", National Legal Information Center of the Republic of Belarus. — Minsk, 2020.
6. Kovalev M.M. Digital economy – a chance for Belarus: monograph / M.M. Kovalev, G.G. Golovenchik. – Minsk : Publishing House of the BSU Center, 2018. – 327 p.
7. Thomson, J. Decarbonized workforce in the energy sector Источник [Электронный ресурс]. – 2021. Available at: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/decarbonization-strategy-power-workforce.html/> Accessed to: 01.04.2023.
8. Marco Zaccello, Theo van Andel Digital transformation in Energy and Utilities sector – 2021. – Available at: <https://blog.equinox.com/blog/2021/03/19/digital-transformation-in-the-energy-and-utilities-sector/> Accessed to: 01.04.2023.
9. Prusov G.V., Prusov S.G. *Feasibility study of replacement of induction meters with a service life of over 32 years*. Option 1 Induction, accuracy class 2.0. Option 2. Electronic, accuracy class 1.0. / G.V. Prusov, S.G. Prusov. Branch «Energotrade» RUE «Vitsebskenergo». – 2010. – 13 p.
10. GOST 6570-96 Interstate standard. Electric active and reactive energy induction meters. General technical conditions. Electrical induction active and reactive energy meters. General specifications ACS 17.220. ОКР 42 2820, 42 2830, 42 2840 Date of introduction 1997-07-01. ИПК Publishing House of Standards. – М. – 69 p.
11. Change No. 1 GOST 6570-96 Electric active and reactive energy induction meters. General technical conditions. Group P32 ISS 17.220.20 Date of introduction June 1, 2004 Adopted

by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (Protocol No. 23 of 22.05.2003) – М. – 1 p.

12. The program of development of the instrument park of electricity metering RUE «Vitsebskenergo» for 2011 – 2012 // RUE «Vitsebskenergo». – 2010. – 37 p.

13. The program of modernization of electric energy metering devices until 2023, approved by the First Deputy General Director – Chief Engineer of GPO «Belenergo» A.V. Sivak dated 28.09.2015.

14. Prusov S. *Evaluation of the efficiency of investment projects in the electric power industry*: monograph. Misanta, 2016. 228 p.

15. Prusov S. *Development of a business plan for an investment project taking into account risk analysis*. Bestprint, 2018. 183 p.

16. Bolshev V., Vinogradov, A. Perspective communication technologies for automation of power supply networks. *Bulletin of KSPEU*. 2019. 2 (42): 65-82.

17. Shubina S., Logacheva, A. The concept of a unified control system for the state of power equipment. *Bulletin of KSPEU*. 2019. 2 (42): 24 - 37.

Authors of the publication

Stanislav G. Prusov – Phd in economics s, leading researcher of the sector «Energy Economics» of the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus). prusovstas@mail.ru.

Tatiana G. Zorina – Doctor of Economics, Associate Professor, Head of the sector «Energy Economics» of the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus); tanyazorina@tut.by.

Olga I.Yurkevich – graduate student of BSEU (Minsk, Belarus). oi.yurkevich@yandex.by.

Шифр научной специальности: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

Получено **15.05.2023г.**

Отредактировано **29.05.2023г.**

Принято **06.06.2023г.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Малёв Н.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>, maleev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Одним из основных требований к следящим электроприводам является обеспечение высокой точности воспроизведения произвольного входного сигнала. В условиях влияния параметрических и координатных возмущений удовлетворение данного требования может быть достигнуто за счет применения адаптивного управления. При синтезе адаптивных управляющих алгоритмов следящих электроприводов широкое применение находит беспоисковый градиентный метод, обеспечивающий экстремум выбранного показателя качества функционирования электропривода. Для построения адаптивных систем управления данного типа необходимо вычислять уравнения чувствительности, как правило, высокого порядка. Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что практическая реализация уравнений чувствительности высокого порядка возможна только в форме цифровых моделей. Цифровые модели, в свою очередь, позволяют получить соответствующее программное обеспечение, на основе которого разрабатываются цифровые алгоритмы адаптивного управления следящих электроприводов на базе микропроцессорной техники. Таким образом, задача формирования и исследования цифровых моделей чувствительности при синтезе градиентных алгоритмов управления следящих электроприводов является важной и актуальной. *МЕТОДЫ.* При решении задачи исследования применялись методы теории чувствительности, векторно-матричные уравнения в форме пространств состояний, методы дискретных преобразований и моделирования уравнений состояния и выхода цифровых моделей чувствительности в программной среде MatLab. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе решается задача анализа цифровых моделей чувствительности следящего электропривода, полученных с помощью различных методов дискретной аппроксимации. На основании рассмотренных методов экстраполяции нулевого и первого порядка, инвариантной импульсной характеристики и билинейного преобразования (Тастина) показано, что наименьшую погрешность в переходном и установившемся режимах обеспечивает метод билинейного преобразования, реализуемый в программной среде MatLab с помощью функции *bilinear*. При этом высокая точность билинейного преобразования в динамическом режиме достигается при дискретизации с запасом по частоте, что позволяет, помимо прочего, избежать эффекта наложения спектров при дискретной аппроксимации и снизить минимальное значение шума АЦП за счет распределения шума квантования по более широкой полосе частот. Полученная в форме пространства состояний цифровая модель чувствительности следящего электропривода может быть использована при формировании беспоискового градиентного алгоритма управления и реализована на базе микропроцессорной техники. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Исследование аналоговой и цифровых моделей чувствительности в программной среде MatLab показало высокую степень совпадения результатов моделирования аналоговой модели и цифровой модели, полученной на основе билинейного преобразования. Необходимым условием при дискретном преобразовании в среде MatLab является запись полного уравнения выхода аналоговой модели, с учетом матрицы выхода и матрицы обхода, даже если последняя является нулевой. Показанная в работе процедура получения цифровой модели чувствительности отличается сравнительной простотой, не требует существенных вычислительных затрат и позволяет получить соответствующий программный код на языке MatLab либо на любом другом языке программирования высокого уровня. Цифровая модель чувствительности является наиболее сложным вычислительным аспектом при синтезе беспоискового градиентного алгоритма управления следящего электропривода, поэтому решенная в настоящей работе задача по исследованию цифровых моделей чувствительности позволяет упростить и автоматизировать процесс формирования эффективных алгоритмов управления электротехнических комплексов и систем, функционирующих в условиях параметрической неопределенности.

Ключевые слова: цифровая модель; модель чувствительности; следящий электропривод; пространство состояний; дискретная аппроксимация; погрешность преобразования.

Для цитирования: Малёв Н.А. Исследование цифровых моделей чувствительности следящего электропривода // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С.157-174.

RESEARCH OF DIGITAL SENSITIVITY MODELS OF A SERVO DRIVE

NA. Malev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>, maleev@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* One of the main requirements for servo drives is to ensure high fidelity in the reproduction of an arbitrary input signal. Under the influence of parametric and coordinate disturbances, the satisfaction of this requirement can be achieved through the use of adaptive control. When synthesizing adaptive control algorithms for servo drives, the searchless gradient method is widely used, which provides the extremum of the selected indicator of the quality of the operation of the electric drive. To build adaptive control systems of this type, it is necessary to calculate sensitivity equations of a high order. The relevance of this research is due to the fact that the practical implementation of high-order sensitivity equations is possible only in the form of digital models. Digital models, in turn, make it possible to obtain appropriate software, on the basis of which digital algorithms for adaptive control of servo drives based on microprocessor technology are developed. Thus, the task of forming and studying digital models of sensitivity in the synthesis of gradient control algorithms for servo drives is important and relevant. *METHODS.* When solving the research problem, methods of sensitivity theory, vector-matrix equations as state spaces, methods of discrete transformations and modeling of equations of state and output of digital sensitivity models in the MatLab software environment were used. *RESULTS.* The paper solves the problem of analyzing digital models of the sensitivity of a servo drive got using various methods of discrete approximation. Based on the considered zero and first order extrapolation methods, invariant impulse response and bilinear transformation (Tustin), it is shown that the smallest error in transient and steady state is provided by the bilinear transformation method implemented in the MatLab software environment using the function "bilinear". The high accuracy of the bilinear transformation in dynamic mode is achieved with sampling with a frequency margin, which allows to avoid the effect of aliasing in discrete approximation and reduce the minimum value of the ADC noise because of the distribution of quantization noise over a wider frequency band. The digital model of the sensitivity of the servo drive got as a state space can be used in the formation of a searchless gradient control algorithm and implemented based on microprocessor technology. *CONCLUSION.* The research of analog and digital sensitivity models in the MatLab software environment showed high agreement between the results of modeling the analog model and the digital model got based on a bilinear transformation. A necessary condition for a discrete transformation in the MatLab environment is to write the full output equation of the analog model, considering the output matrix and the bypass matrix, even if the latter is zero. The procedure for obtaining a digital sensitivity model shown in the work is relatively simple, does not require significant computational costs, and allows you to get the corresponding program code in the MatLab language or in any other high-level programming language. The digital sensitivity model is the most complex computational aspect in the synthesis of a searchless gradient control algorithm for a servo drive. The problem solved in this work on the research of digital sensitivity models allows us to simplify and automate forming effective control algorithms for electrical sets and systems operating under conditions of parametric uncertainty.

Keywords: digital model; sensitivity model; servo drive; state space; discrete approximation; conversion error.

For citation: Malev NA. Research of digital sensitivity models of a servo drive. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):157-174.

Введение

Следящий электропривод как сложная гетерогенная электромеханическая система, функционирующая, как правило, в условиях непрерывно изменяющихся переменных состояния [1, 2] и координатных возмущений [2, 3], подвержен не только внешним дестабилизирующим воздействиям, но и внутренним «шумам» и возмущениям [3], вызванным нестационарностью параметров в процессе эксплуатации [4, 5], и в этом смысле является типичным объектом с параметрической неопределенностью. Так, момент инерции

нагрузки может изменяться относительно номинального (расчетного) значения в сравнительно широких пределах от допустимой минимальной до допустимой максимальной величин [6, 7], что приводит к получению математической модели следящего электропривода с параметрической неопределенностью интервального типа [8, 9]. Нестационарность параметров уравнения электрического равновесия электропривода, активного сопротивления и индуктивности обмоток электродвигателя, соответствует неопределенности, параметризованной временем [6, 10]. В настоящей работе не рассматриваются сигнальные, функциональные и структурные неопределенности, обусловленные неизвестными внешними сигналами и функциональными зависимостями переменных состояния, а также наличием у математической модели электропривода элементов немоделируемой динамики [11, 12]. Тем не менее, при необходимости сигнальная, функциональная и структурная неопределенности могут быть сведены к параметрической неопределенности [11, 13], что позволяет рассматривать следящий электропривод в качестве объекта исследования с параметрической неопределенностью как определяющим фактором возможных сингулярных проявлений.

Задача определения оценок нестабильных параметров χ_{var} либо их вариаций $\Delta\chi$ относительно номинальных значений χ_0 может быть решена с применением методов теории чувствительности и представлена в аддитивной $\chi_{\text{var}}(\Delta\chi) = \chi_0 + \Delta\chi$ форме [14, 15]. Рассматриваемые в работе методы теории чувствительности модели следящего электропривода к вариациям параметров относительно номинальных значений представляют собой частную задачу решения проблемы параметрической неопределенности при формировании беспоискового градиентного алгоритма управления электропривода. Данный алгоритм основан на минимизации квадрата невязки между эталонной моделью и объектом с параметрической неопределенностью и предполагает определение модели чувствительности по нестабильным параметрам [16, 17]. Порядок модели чувствительности определяется произведением порядка уравнений динамики объекта исследования на количество нестабильных параметров и может быть довольно высоким, что приводит к усложнению вычислительных процедур. Целью настоящего исследования является определение цифровой модели чувствительности следящего электропривода к вариациям нестабильных параметров и ее детальный анализ. Важность и актуальность решения данной задачи проявляется при формировании цифровых алгоритмов управления электроприводов с параметрической неопределенностью. Научная и практическая ценность исследования состоит в определении метода дискретной аппроксимации, позволяющего получить цифровую модель чувствительности, наиболее точно соответствующую аналоговому прототипу. Кроме того, математическое описание цифровой модели чувствительности формируется в автоматическом режиме, а полученные разностные уравнения в векторно-матричной форме могут быть реализованы в виде рабочей программы для соответствующих микропроцессорных устройств.

Методы

Для формулировки метода формирования моделей чувствительности рассмотрим следящий электропривод как непрерывную динамическую систему с вектором состояния $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, вектором выходных координат $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ и вектором нестабильных квазистационарных параметров $\chi, (\dot{\chi}(t) = 0)$, вызывающим вариацию $\Delta\chi$, при которой $\chi = \chi_0 + \Delta\chi, \chi \in \mathbb{R}^p$.

Полное движение исследуемого объекта по состоянию и выходу описывается уравнениями

$$\mathbf{x}(t, \chi = \chi_0 + \Delta\chi) = \mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{x}(t, \chi_0, \Delta\chi); \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t, \chi = \chi_0 + \Delta\chi) = \mathbf{y}(t) + \Delta\mathbf{y}(t, \chi_0, \Delta\chi), \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(t) \stackrel{\Delta}{=} \mathbf{x}(t, \chi_0)$ и $\mathbf{y}(t) \stackrel{\Delta}{=} \mathbf{y}(t, \chi_0)$ – номинальное движение переменных состояния и выходных координат объекта исследования; $\Delta\mathbf{x}(t, \chi_0, \Delta\chi)$ и $\Delta\mathbf{y}(t, \chi_0, \Delta\chi)$ – дополнительное движение переменных состояния и выходных координат, вызванное как номинальным значением вектора параметров χ_0 , так и вариацией $\Delta\chi$.

Полагая, что норма вариаций вектора параметров $\Delta\chi$ мала, а номинальные движения $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{y}(t)$ дифференцируемы по вектору параметров χ в точке $\chi = \chi_0$ в каждый момент времени, перепишем выражения (1) и (2):

$$x(t, \chi) = x(t) + \frac{\partial x(t, \chi)}{\partial \chi} \Big|_{\chi=\chi_0} \Delta \chi + \Lambda_x^2(\Delta \chi), \quad (3)$$

$$y(t, \chi) = y(t) + \frac{\partial y(t, \chi)}{\partial \chi} \Big|_{\chi=\chi_0} \Delta \chi + \Lambda_y^2(\Delta \chi), \quad (4)$$

причем

$$\lim_{\|\Delta \chi\| \rightarrow 0} \frac{\|\Lambda_x^2(\Delta \chi)\|}{\|\Delta \chi\|} = 0; \quad \lim_{\|\Delta \chi\| \rightarrow 0} \frac{\|\Lambda_y^2(\Delta \chi)\|}{\|\Delta \chi\|} = 0. \quad (5)$$

С учетом выражений (3) – (5) дополнительные движения $\Delta x(t, \chi_0, \Delta \chi)$ и $\Delta y(t, \chi_0, \Delta \chi)$ объекта исследования с параметрической неопределенностью запишем как

$$x(t, \chi_0, \Delta \chi) = \Sigma(t) \Delta \chi, \quad (6)$$

$$y(t, \chi_0, \Delta \chi) = \Xi(t) \Delta \chi. \quad (7)$$

В выражениях (6), (7) матрицы чувствительности $\Sigma(t)$ и $\Xi(t)$ – это матрицы Якоби по переменным состояния и выходным координатам соответственно, такие, что

$$\Sigma(t) = \text{row} \left\{ \sigma_j(t) = \frac{\Delta \partial x(t, \chi)}{\partial \chi_j} \Big|_{\chi=\chi_0} ; j = \overline{1, p} \right\}, \quad (6)$$

$$\Xi(t) = \text{row} \left\{ \eta_j(t) = \frac{\Delta \partial y(t, \chi)}{\partial \chi_j} \Big|_{\chi=\chi_0} ; j = \overline{1, p} \right\}, \quad (7)$$

где $\sigma_j(t)$ и $\eta_j(t)$ – это функции чувствительности первого порядка по состоянию и выходу.

Формирование модели чувствительности рассмотрим на примере линейного непрерывного объекта исследования с математическим описанием в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t, \chi) &= \mathbf{A}(\chi) \mathbf{x}(t, \chi) + \mathbf{B}(\chi) \mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t, \chi) &= \mathbf{C}(\chi) \mathbf{x}(t, \chi), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{x} \in \square^n, \mathbf{u} \in \square^r, \mathbf{y} \in \square^m \forall \chi, t.$$

Продифференцируем систему уравнений (8) по компоненту χ_j вектора параметров χ в точке $\chi = \chi_0$:

$$\frac{\partial}{\partial \chi_j} \left[\dot{\mathbf{x}}(t, \chi) \right] \Big|_{\chi=\chi_0} = \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left(\frac{d\mathbf{x}(t, \chi)}{dt} \right) \Big|_{\chi=\chi_0} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{x}(t, \chi)}{\partial \chi_j} \right) \Big|_{\chi=\chi_0} = \dot{\sigma}_j(t). \quad (9)$$

Введём обозначения

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\chi_j} &= \frac{\Delta \partial \mathbf{A}(\chi)}{\partial \chi_j} \Big|_{\chi=\chi_0}; \quad \mathbf{B}_{\chi_j} = \frac{\Delta \partial \mathbf{B}(\chi)}{\partial \chi_j} \Big|_{\chi=\chi_0}; \quad \mathbf{C}_{\chi_j} = \frac{\Delta \partial \mathbf{C}(\chi)}{\partial \chi_j} \Big|_{\chi=\chi_0}; \\ \mathbf{A}(\chi) \Big|_{\chi=\chi_0} &= \mathbf{A}; \quad \mathbf{B}(\chi) \Big|_{\chi=\chi_0} = \mathbf{B}; \quad \mathbf{C}(\chi) \Big|_{\chi=\chi_0} = \mathbf{C}; \\ x(t, \chi) \Big|_{\chi=\chi_0} &= x(t); \quad y(t, \chi) \Big|_{\chi=\chi_0} = y(t) \end{aligned}$$

и для модели чувствительности по компоненту χ_j получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_j(t) &= \mathbf{A} \sigma_j(t) + \mathbf{A}_{\chi_j} x(t) + \mathbf{B}_{\chi_j} u(t); \\ \dot{\eta}_j(t, \chi) &= \mathbf{C} \eta_j(t) + \mathbf{C}_{\chi_j} x(t). \end{aligned} \quad (10)$$

От общей формы записи уравнений чувствительности перейдем к конкретному объекту исследования и рассмотрим следящий электропривод, сформированная автором функциональная схема которого представлена на рис. 1.

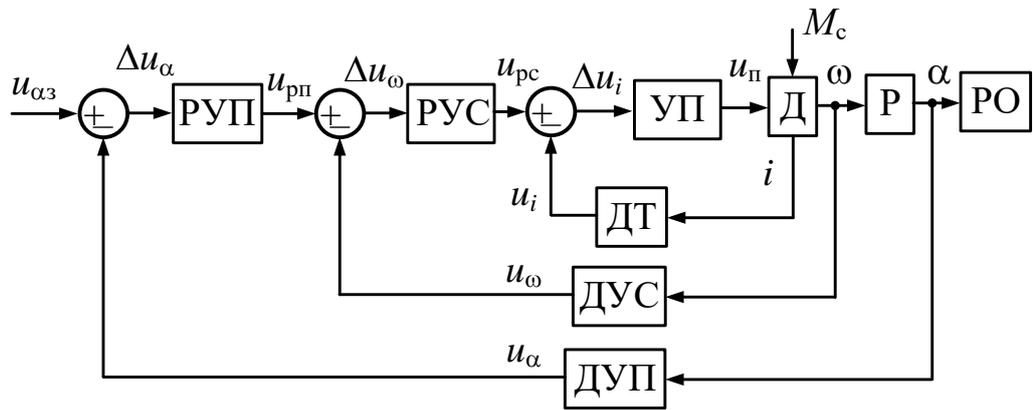


Рис. 1. Функциональная схема следящего электропривода

Fig. 1. Functional diagram of the servo drive

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

На схеме приняты следующие обозначения: РУП – регулятор углового перемещения; РУС – регулятор угловой скорости; УП – управляемый преобразователь; Д – двигатель постоянного тока; Р – редуктор; РО – рабочий орган; ДТ – датчик тока; ДУС – датчик угловой скорости; ДУП – датчик углового перемещения.

Переменные состояния и входные воздействия следящего электропривода обозначены следующими величинами: $u_{\alpha 3}$ – напряжение задания углового перемещения; Δu_{α} – сигнал рассогласования угловых перемещений; $u_{рп}$ – напряжение на выходе регулятора углового перемещения; Δu_{ω} – сигнал рассогласования угловых скоростей; $u_{рс}$ – напряжение на выходе регулятора угловой скорости; $u_{п}$ – напряжение на входе управляемого преобразователя; $u_{д}$ – напряжение питания двигателя; M_c – момент сопротивления нагрузки; ω – угловая скорость вращения двигателя; α – угловое перемещение рабочей оси; i – ток якоря двигателя; u_{α} – напряжение на выходе датчика углового перемещения; u_{ω} – напряжение на выходе датчика угловой скорости; u_i – напряжение на выходе датчика тока.

В целях упрощения решаемой задачи примем следующие допущения: нелинейности элементов следящего электропривода отсутствуют либо не проявляются; координаты электропривода находятся в допустимых пределах; датчики переменных состояния, регуляторы и управляемый преобразователь представлены безынерционными звеньями.

Структурная схема динамической модели следящего электропривода с двигателем постоянного тока с учетом принятых допущений представлена на рис. 2.

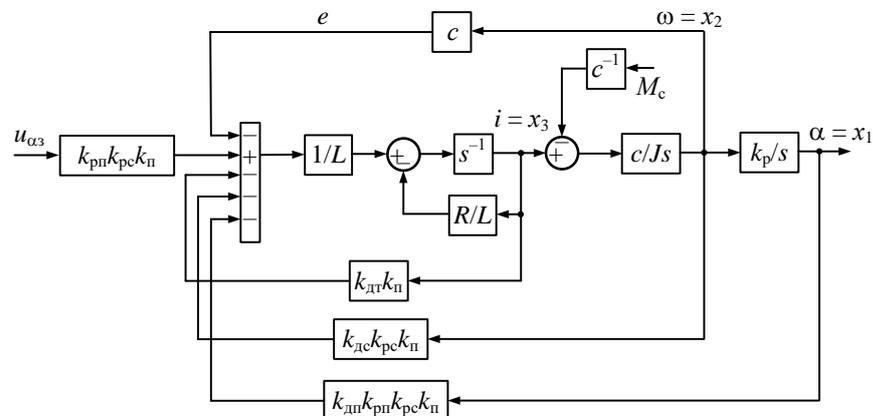


Рис. 2. Структурная схема следящего электропривода

Fig. 2. Structural diagram of the servo drive

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Структурная схема следящего электропривода соответствует функциональной схеме, показанной на рис. 1. Для удобства последующих вычислений при записи уравнений

состояния автором вынесены на вход регуляторы переменных состояния и объединены сумматоры контуров углового перемещения, угловой скорости и тока якоря. Схема учитывает внутреннюю обратную связь по противо-ЭДС e и представляет собой схему непосредственного моделирования [17 – 19].

К параметрам динамической модели следящего электропривода относятся следующие величины: $k_{рп}$ – коэффициент передачи регулятора углового перемещения; $k_{рс}$ – коэффициент передачи регулятора угловой скорости; $k_{п}$ – коэффициент передачи управляемого преобразователя; R – активное сопротивление якорной цепи; L – индуктивность якорной цепи; c – коэффициент противо-ЭДС; J – приведенный момент инерции $k_{р}$ – коэффициент передачи редуктора; $k_{дп}$ – коэффициент передачи датчика углового перемещения; $k_{дс}$ – коэффициент передачи датчика угловой скорости; $k_{дт}$ – коэффициент передачи датчика тока.

Обозначим переменные состояния следящего электропривода $\alpha = x_1$, $\omega = x_2$, $i = x_3$ и на основе структурной схемы на рис. 2 запишем систему дифференциальных уравнений электропривода в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = k_p x_2; \\ \dot{x}_2 = \frac{c}{J} x_3 - \frac{1}{c} M_c; \\ \dot{x}_3 = -\frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L} x_1 - \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L} x_2 - \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L} x_3 + \frac{k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L} u_{\alpha 3}. \end{cases} \quad (11)$$

Для получения уравнений чувствительности необходимо продифференцировать каждое из уравнений системы (11) по нестабильным параметрам, в качестве которых будем рассматривать активное сопротивление якорной цепи R , индуктивность якорной цепи L и момент инерции J . Поскольку порядок уравнений объекта исследования $n = 3$ и количество нестабильных параметров $p = 3$, модель чувствительности будет иметь девятый порядок. Переменные состояния модели чувствительности обозначим следующим образом: $\alpha_R = x_{1\chi}$, $\alpha_L = x_{2\chi}$, $\alpha_J = x_{3\chi}$, $\omega_R = x_{4\chi}$, $\omega_L = x_{5\chi}$, $\omega_J = x_{6\chi}$, $i_R = x_{7\chi}$, $i_L = x_{8\chi}$, $i_J = x_{9\chi}$.

Рассматриваемый пример формирования модели чувствительности следящего электропривода можно отнести к разряду частных задач, когда функции чувствительности по переменным состояния $\sigma_j(t)$ и функции чувствительности по выходу $\eta_j(t)$ суть одно и то же, поскольку ток якоря, скорость вращения и угловое перемещения относятся к регулируемым выходным координатам в системе подчиненного регулирования. В этой связи компактная векторно-матричная форма записи уравнений чувствительности может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\chi} &= \mathbf{A}_{\chi} \mathbf{x}_{\chi} + \mathbf{B}_{\chi} \mathbf{u}_0; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_{\chi} \mathbf{x}_{\chi} + \mathbf{D}_{\chi} \mathbf{u}_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Дифференцируя систему (11) по указанным параметрам, получим:

$$\begin{cases}
 \dot{x}_{1\chi} = k_p x_{4\chi}; \\
 \dot{x}_{2\chi} = k_p x_{5\chi}; \\
 \dot{x}_{3\chi} = k_p x_{6\chi}; \\
 \dot{x}_{4\chi} = \frac{c}{J} x_{7\chi}; \\
 \dot{x}_{5\chi} = \frac{c}{J} x_{8\chi}; \\
 \dot{x}_{6\chi} = \frac{c}{J} x_{9\chi} - \frac{c}{J^2} i_0 - \frac{1}{c} M_{c0}; \\
 \dot{x}_{7\chi} = -\frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L} x_{1\chi} - \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L} x_{4\chi} - \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L} x_{7\chi} - \frac{1}{L} i_0; \\
 \dot{x}_{8\chi} = -\frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L} x_{2\chi} - \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L} x_{5\chi} - \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L} x_{8\chi} + \\
 + \frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L^2} \alpha_0 + \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L^2} \omega_0 + \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L^2} i_0 - \frac{k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L^2} u_{\alpha 30}; \\
 \dot{x}_{9\chi} = -\frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L} x_{3\chi} - \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L} x_{6\chi} - \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L} x_{9\chi}.
 \end{cases} \quad (13)$$

Приведем систему дифференциальных уравнений чувствительности (13) к форме (12):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1\chi} \\ \dot{x}_{2\chi} \\ \dot{x}_{3\chi} \\ \dot{x}_{4\chi} \\ \dot{x}_{5\chi} \\ \dot{x}_{6\chi} \\ \dot{x}_{7\chi} \\ \dot{x}_{8\chi} \\ \dot{x}_{9\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} \\ -a_{71} & 0 & 0 & -a_{74} & 0 & 0 & -a_{77} & 0 & 0 \\ 0 & -a_{82} & 0 & 0 & -a_{85} & 0 & 0 & -a_{88} & 0 \\ 0 & 0 & -a_{93} & 0 & 0 & -a_{96} & 0 & 0 & -a_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1\chi} \\ x_{2\chi} \\ x_{3\chi} \\ x_{4\chi} \\ x_{5\chi} \\ x_{6\chi} \\ x_{7\chi} \\ x_{8\chi} \\ x_{9\chi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{J^2} & 0 & -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L^2} & \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L^2} & \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L^2} & \frac{k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \omega_0 \\ I_0 \\ u_{\alpha 30} \\ M_{c0} \end{bmatrix},$$

$$a_{71} = a_{82} = a_{93} = \frac{k_{дп} k_{рп} k_{рс} k_{п}}{L}; \quad a_{74} = a_{85} = a_{96} = \frac{k_{дс} k_{рс} k_{п} + c}{L}; \quad a_{77} = a_{88} = a_{99} = \frac{k_{дт} k_{п} + R}{L}.$$

Матрица выхода S_{χ} в рассматриваемом случае является единичной, а матрица обхода D_{χ} – нулевой. Необходимость записи четырех матриц уравнений состояния и выхода обусловлена последующей дискретной аппроксимацией, как будет показано ниже.

Результаты и обсуждение

В следящем электроприводе в качестве исполнительного элемента применен двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г [17, 18]. Номинальные значения параметров следящего электропривода в соответствии со схемой на рис. 2 записываются в командном окне программной среды MatLab, численные значения параметров указаны в системе СИ:

$$R=1.47; c=0.663; L=0.011; J=0.015; K_{um}=10; K_{dt}=0.2; K_{ds}=0.4; K_{dp}=6; K_{rp}=30; K_{rs}=15; K_p=10;$$

Аналоговая модель чувствительности следящего электропривода, полученная автором, в виде соответствующей Simulink-модели представлена на рис. 3.

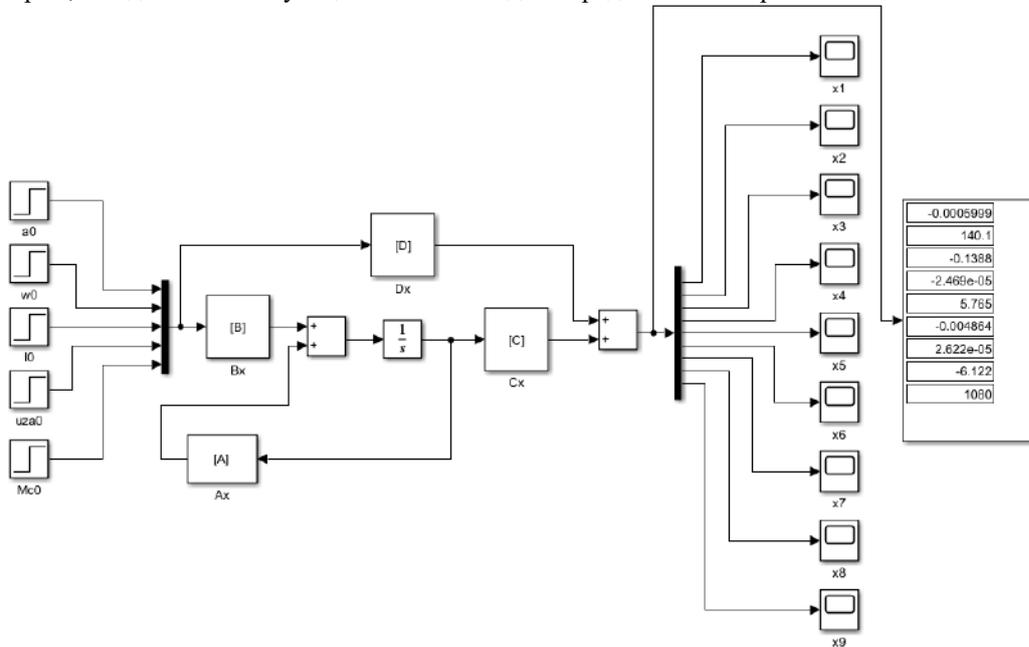


Рис. 3. Аналоговая модель чувствительности следящего электропривода в приложении Simulink

Fig. 3. Analog model of the servo drive sensitivity in the application Simulink

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Номинальные значения входных координат подаются на мультиплексор с применением блоков a0, w0, I0, uza0, Mc0 и объединяются в вектор входных координат $\mathbf{u}_0 = [\alpha_0 \ \omega_0 \ I_0 \ u_{z\alpha 0} \ M_{c0}]^T$. Основная матрица системы \mathbf{A}_χ , матрица входа \mathbf{B}_χ , матрица выхода \mathbf{C}_χ и матрица обхода \mathbf{D}_χ задаются в командном окне по уравнениям (12) и реализуются в блоках Ax, Bx, Cx, и Dx соответственно. Демultipлексор разделяет вектор выхода на переменные $x_{1\chi} \dots x_{9\chi}$, отображаемые в соответствующих блоках x1...x9, а блок Display регистрирует установившиеся значения функций чувствительности. Из анализа рис. 3 следует, что координаты $\alpha_R = x_{1\chi}$, $\omega_R = x_{4\chi}$, $\omega_J = x_{6\chi}$, $i_R = x_{7\chi}$ имеют установившиеся значения $x_{i\chi_{уст}}$, близкие к нулю (см. Display), остальные координаты имеют отличные от нуля установившиеся значения. Величина $x_{i\chi_{уст}}$ свидетельствует о влиянии соответствующего нестабильного параметра на i-ю выходную координату тем большее, чем больше значение $x_{i\chi_{уст}}$. Так, из рис. 3 видно, что максимальное влияние оказывают изменения момента инерции и индуктивности якорной цепи, что главным образом сказывается на токе якоря и в меньшей степени на скорости вращения и угловом перемещении вследствие свойства естественной робастности замкнутых систем управления.

Следует отметить, что значительную роль при формировании адаптивного алгоритма управления играют также динамические изменения координат $x_{1\chi} \dots x_{9\chi}$, которые под действием вариаций параметров достигают существенных значений. Количественную оценку влияния нестабильных параметров на выходные координаты следящего электропривода осуществим с применением квадратичного интегрального критерия

$$\delta_{i\chi} = \int_0^t x_{i\chi}^2 dt.$$

Соответствующие графики, полученные автором в результате моделирования, представлены на рис. 4, 5.

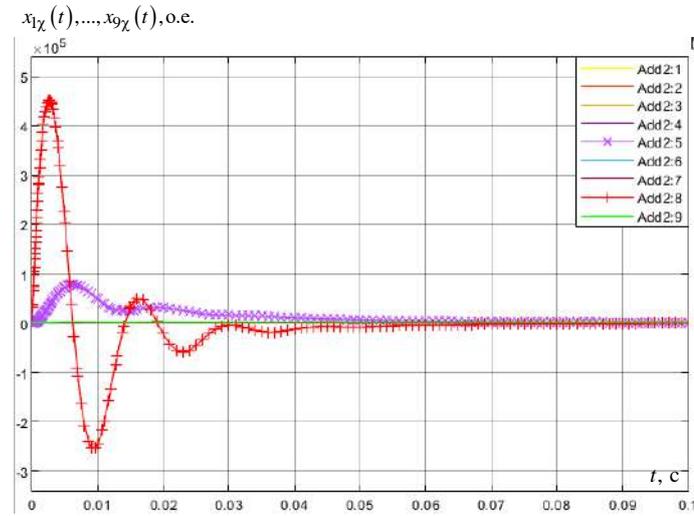


Рис. 4. Графики функций чувствительности

Fig. 4. Graphs of sensitivity functions

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

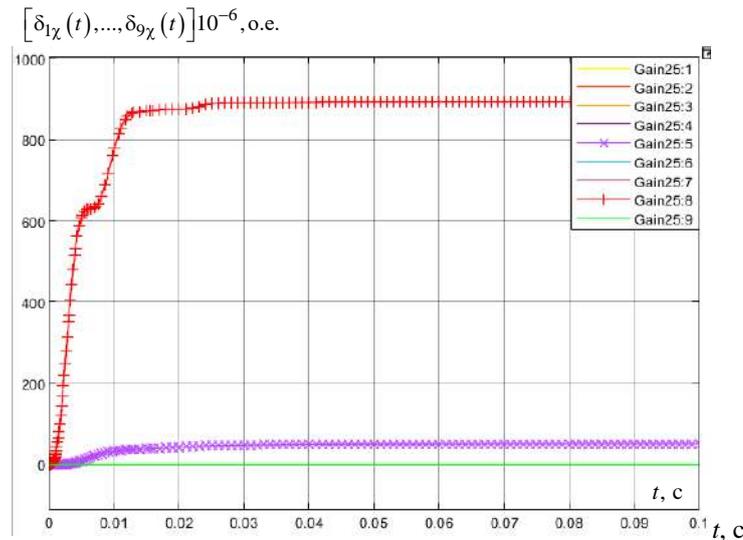


Рис. 5. Графики количественных оценок функций чувствительности

Fig. 5. Graphs of quantitative estimates of sensitivity functions

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

На рис. 4, 5 зависимости Add2:5, Add2:8 (Gain25:5, Gain25:8) соответствуют изменениям скорости вращения $\omega_L = x_{5\chi}$ и тока якоря $i_L = x_{8\chi}$ при вариациях индуктивности якорной цепи, что подтверждается рядом исследований [10, 14, 17, 18]. При этом в установившихся режимах на выходные координаты модели чувствительности главным образом влияют изменения приведенного момента инерции, как было отмечено выше (рис. 3).

Таким образом, вариации нестабильных параметров приводят к изменениям показателей качества переходных процессов следящего электропривода, а также вызывают изменения установившихся значений выходных координат. Оба фактора негативно сказываются на функционировании электропривода и могут привести к нежелательным динамическим выбросам и ошибкам слежения.

При формировании параметрически инвариантной системы управления следящего электропривода на основе градиентного алгоритма с применением модели чувствительности [20, 21] необходимо произвести дискретную аппроксимацию системы уравнений (12), что позволит реализовать соответствующую модель в виде программного кода [22, 23].

Решение уравнения состояния модели чувствительности (первого уравнения системы (12)) представляет собой сумму свободной и вынужденной составляющих и может быть записано в виде [24, 25]:

$$\mathbf{x}(t) = e^{-\mathbf{A}_\chi t} \mathbf{x}_\chi(0) + \int_{\tau=0}^t e^{-\mathbf{A}_\chi \tau} \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau = \Phi(t) \mathbf{x}_\chi(0) + \int_{\tau=0}^t \Phi(t-\tau) \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau, \quad (14)$$

где $e^{\mathbf{A}_\chi(t)} = \Phi(t)$ – фундаментальная матрица решений (переходная матрица).

Полагаем, что входной сигнал на шаге квантования с периодом дискретности T_0 неизменен, т.е. $u(t) = u(kT_0)$ на интервале $kT_0 \leq t < (k+1)T_0$ и уравнение состояния на указанном интервале

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t - kT_0) \mathbf{x}_\chi(kT_0) + u(kT_0) \int_{\tau=0}^t \Phi(t - \tau) \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (15)$$

В момент времени $t = (k+1)T_0$ уравнение состояния

$$\mathbf{x}[(k+1)T_0] = \Phi(T_0) \mathbf{x}_\chi(kT_0) + u(kT_0) \int_{kT_0}^{(k+1)T_0} \Phi[(k+1)T_0 - \tau] \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (16)$$

Введем замену $(k+1)T_0 - \tau = q$ и окончательно запишем

$$\mathbf{x}_\chi(k+1) = \Phi(T_0) \mathbf{x}_\chi(k) + u(k) \int_0^{T_0} \Phi(q) \mathbf{B} \mathbf{u} dq. \quad (17)$$

В результате соответствие между матрицами аналоговой и цифровой моделей чувствительности можно выразить следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_d &= \Phi(T_0) = e^{\mathbf{A}T_0}; \\ \mathbf{B}_d &= \int_0^{T_0} \Phi(q) \mathbf{B} dq = e^{\mathbf{A}T_0} \mathbf{B}; \\ \mathbf{C}_d &= \mathbf{C}; \quad \mathbf{D}_d = \mathbf{D}. \end{aligned} \quad (18)$$

Основной сложностью при дискретном преобразовании аналоговой модели чувствительности является вычисление матричной экспоненты и ее последующее интегрирование. Известны методы разложения матричной экспоненты в ряд

$$\Phi(T_0) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\mathbf{A}T_0)^i}{i!}; \quad \mathbf{B}_d = \mathbf{A}^{-1} \left[\frac{(\mathbf{A}T_0)}{i!} - \mathbf{E} \right] \mathbf{B},$$

методы, основанные на преобразовании Лапласа $L[e^{\mathbf{A}T_0}] = (s\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}$ или теореме Кэли-Гамильтона и др. [26, 27]. Для дискретного преобразования уравнений высокого порядка целесообразно воспользоваться одним из методов дискретизации, интегрированным в программную среду *MatLab*.

Для многомерных систем (*MIMO*) в *MatLab* предусмотрены следующие приближенные методы дискретных преобразований: 1) *zoh* (*zero-order hold*) – экстраполяция нулевого порядка. Для данного метода $u(t) = u(kT_0)$ на интервале $kT_0 \leq t < (k+1)T_0$; 2) *foh* (*first-order hold*) – экстраполяция первого порядка. Для данного метода $u(t) = u(k) + \frac{t - kT_0}{T_0} [u(k+1) - u(k)]$ на интервале $kT_0 \leq t < (k+1)T_0$; 3) *impulse* –

метод инвариантного преобразования импульсной характеристики, обеспечивающий совпадение выходных координат аналогового объекта с соответствующими координатами цифрового объекта во временной области в моменты дискретизации. Недостатком метода является проявление эффекта наложения частот и искажение частотных характеристик цифрового объекта на частотах, близких к частоте Найквиста; 4) *tustin* – метод трапеций, обеспечивающий лучшее соответствие частотного диапазона между непрерывной и аналоговой системами за счет нелинейного преобразования шкалы частот, при котором

бесконечный частотный диапазон аналоговой области конформно отображается в конечный диапазон частот дискретной области, ограниченный частотой Найквиста.

Таким образом, наименьших вычислительных затрат при дискретной аппроксимации требует метод экстраполяции нулевого порядка, но при этом является и наименее точным, тогда как метод трапеций приводит к нелинейному отображению частотной шкалы, но обеспечивает наибольшее совпадение частотных характеристик аналоговой и цифровой систем.

Указанные методы дискретных преобразований реализуются в среде *MatLab* с применением функции *c2d* – *continuous-to-discrete*. Соответствующие скрипты и результаты вычислений для методов *zoh* и *tustin* представлены ниже в виде изображений командного окна *MatLab* и соответствующих таблиц.

```
Command Window
>> sys1=ss(A,B,C,D); % коэффициенты матриц (12)
Ts=0.001; % период дискретности
sys2=c2d(sys1, Ts, 'zoh')

sys2 =
```

A									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x1	0.9983	0	0	9.624e-05	0	0	1.955e-06	0	0
x2	0	0.9983	0	0	9.624e-05	0	0	1.955e-06	0
x3	0	0	0.9983	0	0	9.624e-05	0	0	1.955e-06
x4	-47.99	0	0	0.8905	0	0	0.03637	0	0
x5	0	-47.99	0	0	0.8905	0	0	0.03637	0
x6	0	0	-47.99	0	0	0.8905	0	0	0.03637
x7	-2020	0	0	-4.647	0	0	0.6309	0	0
x8	0	-2020	0	0	-4.647	0	0	0.6309	0
x9	0	0	-2020	0	0	-4.647	0	0	0.6309
B									
	u1	u2	u3	u4	u5				
x1	0	0	-6.127e-08	0	0				
x2	0.1504	0.0003379	1.933e-05	-0.02506	0				
x3	0	0	-0.0001445	0	-7.397e-08				
x4	0	0	-0.001777	0	0				
x5	4363	9.802	0.5607	-727.1	0				
x6	0	0	-2.836	0	-0.001452				
x7	0	0	-0.07481	0	0				
x8	1.836e+05	412.5	23.6	-3.06e+04	0				
x9	0	0	7.299	0	0.003736				
C									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
y1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
y2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
y3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
y4	0	0	0	1	0	0	0	0	0
y5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
y6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
y7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
y8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
y9	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D									
	u1	u2	u3	u4	u5				
y1	0	0	0	0	0				
y2	0	0	0	0	0				
y3	0	0	0	0	0				
y4	0	0	0	0	0				
y5	0	0	0	0	0				
y6	0	0	0	0	0				
y7	0	0	0	0	0				

y8	0	0	0	0	0
y9	0	0	0	0	0

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

```

Command Window
>> sys1=ss(A,B,C,D); % коэффициенты матриц (12)
Ts=0.001; % период дискретности
sys2=c2d(sys1, Ts, 'tustin')

sys2 =
    
```

A									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x1	0.9978	0	0	9.489e-05	0	0	1.811e-06	0	0
x2	0	0.9978	0	0	9.489e-05	0	0	1.811e-06	0
x3	0	0	0.9978	0	0	9.489e-05	0	0	1.811e-06
x4	-44.46	0	0	0.8979	0	0	0.03623	0	0
x5	0	-44.46	0	0	0.8979	0	0	0.03623	0
x6	0	0	-44.46	0	0	0.8979	0	0	0.03623
x7	-2012	0	0	-4.621	0	0	0.6393	0	0
x8	0	-2012	0	0	-4.621	0	0	0.6393	0
x9	0	0	-2012	0	0	-4.621	0	0	0.6393
B									
	u1	u2	u3	u4	u5				
x1	0	0	-8.234e-08	0	0				
x2	0.2021	0.0004541	2.597e-05	-0.03368	0				
x3	0	0	-0.0001398	0	-7.156e-08				
x4	0	0	-0.001647	0	0				
x5	4042	9.802	0.5195	-673.7	0				
x6	0	0	-2.796	0	-0.001431				
x7	0	0	-0.07451	0	0				
x8	1.829e+05	410.9	23.51	-3.048e+04	0				
x9	0	0	6.808	0	0.003485				
C									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
y1	0.9989	0	0	4.745e-05	0	0	9.057e-07	0	0
y2	0	0.9989	0	0	4.745e-05	0	0	9.057e-07	0
y3	0	0	0.9989	0	0	4.745e-05	0	0	9.057e-07
y4	-22.23	0	0	0.9489	0	0	0.01811	0	0
y5	0	-22.23	0	0	0.9489	0	0	0.01811	0
y6	0	0	-22.23	0	0	0.9489	0	0	0.01811
y7	-1006	0	0	-2.31	0	0	0.8197	0	0
y8	0	-1006	0	0	-2.31	0	0	0.8197	0
y9	0	0	-1006	0	0	-2.31	0	0	0.8197
D									
	u1	u2	u3	u4	u5				
y1	0	0	-4.117e-08	0	0				
y2	0.1011	0.000227	1.299e-05	-0.01684	0				
y3	0	0	-6.991e-05	0	-3.578e-08				
y4	0	0	-0.0008234	0	0				
y5	2021	4.541	0.2597	-336.8	0				
y6	0	0	-1.398	0	-0.0007156				
y7	0	0	-0.03726	0	0				
y8	9.145e+04	205.5	11.75	-1.524e+04	0				
y9	0	0	3.404	0	0.001742				

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Как видно из результатов, дискретное преобразование методом zoh соответствует выражению (18), тогда как при преобразовании Тастина $C_d \neq C$; $D_d \neq D$. Необходимым условием для возможности использования функции $c2d$ является запись матриц C и D в аналоговой модели, даже если они не влияют на динамику объекта исследования.

На рис. 6 показана сформированная автором в приложении *Simulink* схема для анализа аналоговой и цифровых моделей чувствительности.

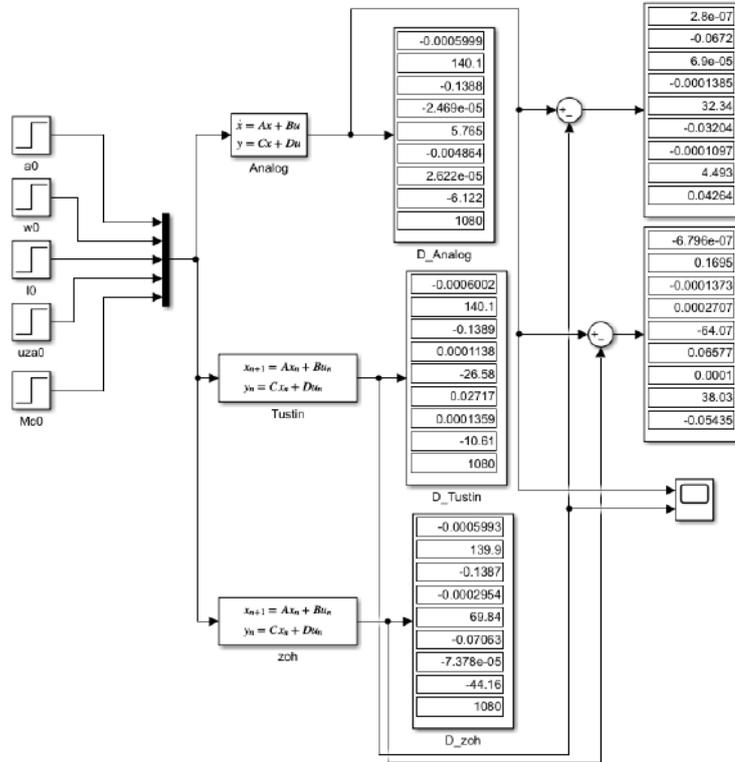


Рис. 6. Аналоговая и цифровые модели чувствительности в приложении *Simulink*

Fig. 6. Analog and digital sensitivity models in a *Simulink* application

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Модели чувствительности на рис. 6 представлены блоками *State Space* “Analog” для аналоговой модели и *Discrete State Space* “Tustin”, “zoh” соответственно. Установившиеся значения выходных координат аналоговой и цифровых моделей чувствительности имеют существенные различия и для переменных $\omega_L = x_{5\chi}$ и $i_L = x_{8\chi}$ максимальные значения абсолютных погрешностей составляют $\Delta_{zoh}^{x_{5\chi}} = -64,07$ о.е., $\Delta_{ustin}^{x_{5\chi}} = 32,34$ о.е. и $\Delta_{zoh}^{x_{8\chi}} = 38,03$ о.е., $\Delta_{ustin}^{x_{8\chi}} = 4,493$ о.е. На рис. 7 показаны полученные автором графики функций чувствительности для аналоговой модели и цифровой модели, полученной методом трапеций.

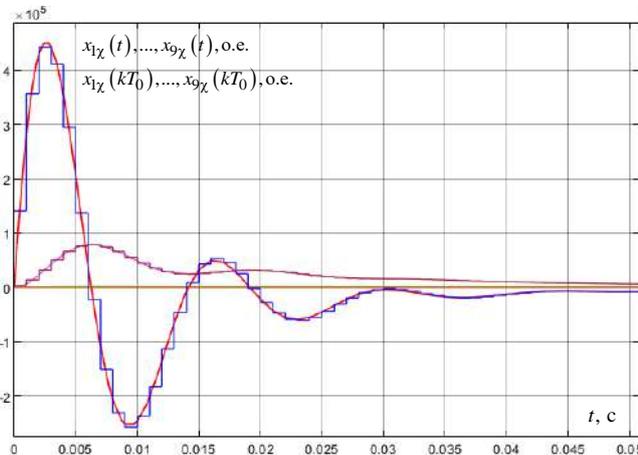


Рис. 7. Графики функций чувствительности моделей *Analog* и *Tustin*

Fig. 7. Plots of sensitivity functions for *Analog* and *Tustin* models

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что погрешность произведенных дискретных преобразований достигает существенных значений в установившемся режиме, а выбранный период дискретности $T_0 = 0,001$ с приводит к значительным динамическим погрешностям.

Таким образом, для повышения точности преобразования следует увеличивать частоту дискретизации и, при необходимости, использовать другие функции преобразования в программной среде *MatLab*. Одной из таких функций является функция *bilinear*, реализующая следующий вычислительный алгоритм:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_d &= \left(\mathbf{E} - \mathbf{A} \frac{1}{2\lambda}\right)^{-1} \left(\mathbf{E} + \mathbf{A} \frac{1}{2\lambda}\right); \mathbf{B}_d = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left(\mathbf{E} - \mathbf{A} \frac{1}{2\lambda}\right)^{-1} \mathbf{B}; \\ \mathbf{C}_d &= \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \mathbf{C} \left(\mathbf{E} - \mathbf{A} \frac{1}{2\lambda}\right)^{-1}; \mathbf{D}_d = \frac{1}{2\lambda} \mathbf{C} \left(\mathbf{E} - \mathbf{A} \frac{1}{2\lambda}\right)^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\lambda = \frac{\pi f_c}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi f_c}{f_0}\right)}$ – коэффициент, который зависит от частоты среза f_c и частоты дискретизации f_0 .

Скрипт с применением функции *bilinear* представлен ниже:

```
A=[0 0 0 Kp 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 Kp 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 Kp 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 c/J 0 0; 0 0 0 0 0 0 0 c/J
0; 0 0 0 0 0 0 0 c/J; -a71 0 0 -a74 0 0 -a77 0 0; 0 -a82 0 0 -a85 0 0 -a88 0; 0 0 -a93 0 0 -a96 0 0
-a99];
V=[0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 -c/J^2 0 -1/c; 0 0 -1/L 0 0;
(Kdp*Krp*Krs*Kp)/L^2 (Kds*Krs*Kp +c)/L^2 (Kdt*Kp+R)/L^2 -(30*15*10)/L^2 0; 0 0 0 0 0];
C=[1 0 0 0 0 0 0 0; 0 1 0 0 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0 0 0; 0 0 0 0 1 0 0 0; 0 0 0 0
0 1 0 0 0; 0 0 0 0 0 1 0 0; 0 0 0 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 0 0 0 1];
D=[0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0];
Fs=10000;
[Ad, Bd, Cd, Dd]=bilinear(A, B, C, D, Fs)
```

Результат выполнения скрипта не показан в силу громоздкости результатов вычисления. На рис. 8 показан фрагмент полученных автором функций чувствительности аналоговой модели и цифровой модели, полученной с применением билинейного преобразования.

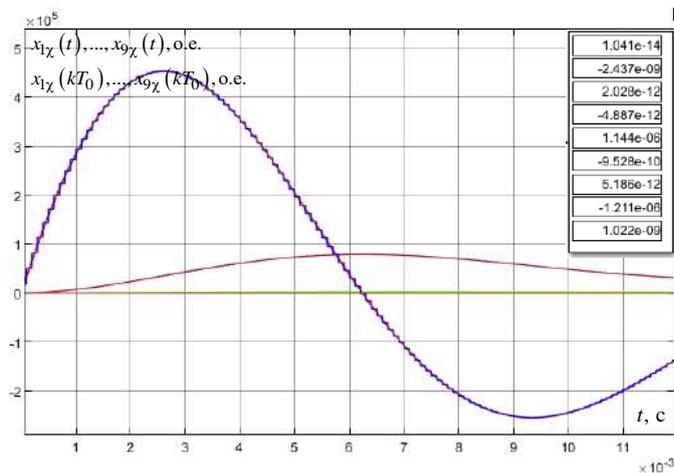


Рис. 8. Графики функций чувствительности моделей *Analog* и *Bilinear*

Fig. 8. Plots of sensitivity functions for *Analog* and *Bilinear* models

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Из анализа приведенных зависимостей видно, что графики аналоговой и цифровой моделей чувствительности при частоте дискретизации 10 кГц практически совпадают, а абсолютные погрешности установившихся значений, показанные в верхней правой части рис. 8 пренебрежимо малы.

Таким образом, исследование цифровых моделей чувствительности следящего электропривода показало преимущество билинейного дискретного преобразования

аналоговой модели чувствительности с применением функции *bilinear* с запасом по частоте дискретизации, что позволило получить соответствующую цифровую модель, практически идентичную исходной аналоговой модели.

Выводы

В работе сформулированы основные теоретические положения по формированию моделей чувствительности объектов с параметрической неопределенностью, описываемых уравнениями динамики в векторно-матричной форме. На основании структурной схемы непосредственного моделирования записаны дифференциальные уравнения следящего электропривода в форме Коши и получены соответствующие уравнения чувствительности координат электропривода по нестабильным параметрам электромеханического преобразователя постоянного тока: индуктивности и активного сопротивления якорной цепи и приведенного момента инерции. Получена многомерная аналоговая модель чувствительности следящего электропривода в форме пространства состояний, позволяющая выявить наиболее чувствительные к параметрическим возмущениям координаты объекта исследования, а также нестабильные параметры, оказывающие максимальное влияние на переходные и установившиеся режимы работы электропривода. Показано, что наибольшее влияние на функционирование следящего электропривода оказывают изменения индуктивности якорной цепи и приведенного момента инерции, а координатой с наибольшим дополнительным движением при параметрических возмущениях является ток якоря.

Рассмотрены методы дискретной аппроксимации аналоговой модели чувствительности, позволяющие получить соответствующие уравнения состояния цифровых моделей чувствительности в форме программного кода на языке *MatLab* с возможностью реализации полученных уравнений «в железе» с помощью микропроцессорных устройств. На основании анализа рассмотренных методов дискретной аппроксимации многомерных систем показано, что наилучшие результаты в смысле совпадения выходных координат цифровой модели чувствительности с исходной аналоговой моделью обеспечивает билинейное преобразование с частотой дискретизации, значительно превышающей частоту Найквиста (выборка с запасом по частоте).

Таким образом, в работе сформулирована сравнительно простая процедура по получению цифровой модели чувствительности на основании математического описания объекта исследования, функционирующего в условиях параметрической неопределенности, что позволяет сформировать беспойсковый градиентный алгоритм управления следящего электропривода и реализовать его на базе современной микропроцессорной техники.

Литература

1. Langley R.S., Legault J., Woodhouse J. et al. On the applicability of the lognormal distribution in random dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*. 2013. V.332(13). pp. 3289-3302.
2. Bhaduri A., He Y., Shields M.D. et al. Stochastic collocation approach with adaptive mesh refinement for parametric uncertainty analysis. *Journal of Computational Physics*. 2018. V.371. pp.732-750.
3. Паршуков А.Н. Критерий робастной устойчивости и качества управления линейной замкнутой системой в условиях структурно-параметрической неопределенности описания в передаточной функции объекта управления. *Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2017. V.15(1). pp.59-69.
4. Garatti S., Campi M.C. Modulating Robustness in Control Design: Principles and Algorithms. *IEEE Cont. Syst. Mag.* 2013. V.33(2). pp.36-51.
5. Gryazina E., Polyak B. Random Sampling: Billiard Walk Algorithm. *Europ. J. Oper. Res.* 2014. V.238(2). pp.497-504.
6. Panda A.K., Modak S.V. An FRF-based perturbation approach for stochastic updating of mass, stiffness and damping matrices. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022.V.166.pp.08416.
7. Garg S., Gupta H., Chakraborty S. Assessment of DeepONet for time dependent reliability analysis of dynamical systems subjected to stochastic loading. *Engineering Structures*. 2022.V.270.pp.114811.
8. Ping Q., Yizhong W., Jianwan D. et al. A new sequential sampling method of surrogate models for design and optimization of dynamic systems. *Mechanism and Machine Theory*.2021.V.158. pp.104248.
9. Елсуков В.С., Лачин В.И., Павлов В.В. Синтез систем управления со знакопеременной компенсирующей обратной связью в условиях ограниченной неопределенности. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2020. V.63(5). pp.40-45.

10. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели. Вестник КГЭУ. 2019. №1. С.60-67.
11. Tsvetkov V. Ya. Framework of Correlative Analysis. European researcher. Series A. 2012;№6-1 (23). С. 839-844.
12. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. №24(17). С.2774-2784.
13. Панферов В.И. Параметрическая идентификация модели объекта управления по переходной функции работающей системы автоматического регулирования. Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».2019. №19(3). С. 52-59.
14. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. №24(1). С.126-140.
15. Goncalves M., Sousa P., Mendes J. et al. Real-Time Event-Driven Learning in Highly Volatile Systems: A Case for Embedded Machine Learning for SCADA Systems, IEEE Access. 2022.1 №10. С. 50794-50806.
16. Hülsmann J., Barbosa J., Steinke F. Local Interpretable Explanations of Energy System Designs. Energies. 2023. №16(5). pp. 2161.
17. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования Q-таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 22(2). С. 86-97.
18. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. №21(6). С.101-110.
19. Maler O., Manna Z., Pnueli A.: From Timed to Hybrid systems. Real Time: Theory in Practice, Lecture Notes in Comp.Sc. 1992. V.600. pp. 447-484.
20. Pan J., Jiang X., Wan X. et al. A filtering based multi-innovation extended stochastic gradient algorithm for multivariable control systems. Int. J. Control Autom. Syst. 2017.V.15. pp.1189-1197.
21. Ma J. X., Xiong W. L., Ding F. Iterative identification algorithms for input nonlinear output error autoregressive systems. International Journal of Control, Automation, and Systems. 2016. V.14(1). pp.140-147.
22. Xu L., Ding F. The parameter estimation algorithms for dynamical response signals based on the multiinnovation theory and the hierarchical principle. IET Signal Processing. 2017. №11(2). pp.228-237.
23. Dincel E., Mutlu İ., Schrödel F. et al. Further Results on Dominant Pole Placement via Stability Mapping Approach. IFAC-PapersOnLine, 2018. №51(4). pp. 918-923.
24. Duman-Mammadov A., Dincel E., Söylemez M.T. Design of decentralized proportional–integral proportional–retarded controllers in discrete-time domain for two-input two-output processes. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2023. №45(3). pp.427-439.
25. Das S., Halder K., Gupta A. Delay handling method in dominant pole placement based PID controller design. IEEE Transactions on Industrial Informatics.2019. V.16(2). pp.980-991.
26. Derksen H., Makam V. Invariant Theory and wheeled PROPs. Journal of Pure and Applied Algebra. 2023. V.227(9). pp. 107302.
27. Kemper G. Computing quotients by connected solvable groups. Journal of Symbolic Computation. 2022. V.109. pp. 426-440.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Langley RS, Legault J, Woodhouse J. et al. On the applicability of the lognormal distribution in random dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*. 2013;332(13):3289-3302.
2. Bhaduri A, He Y, Shields MD. et al. Stochastic collocation approach with adaptive mesh refinement for parametric uncertainty analysis. *Journal of Computational Physics*. 2018; 371: 732-750.
3. Parshukov AN. New Robust Stability and Robust Performance Criterion for Linear Closed Loop Systems with Indeterminacy of Structure and Parametric Uncertainty into Transfer Function of Object Control. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2017;15(1):59–69 (in Russ.).
4. Garatti S, Campi MC. Modulating Robustness in Control Design: Principles and Algorithms. *IEEE Cont. Syst. Mag*. 2013;33(2):36–51.
5. Gryazina E, Polyak B. Random Sampling: Billiard Walk Algorithm. *Europ. J. Oper. Res*. 2014;238(2):497–504.
6. Panda AK, Modak SV. An FRF-based perturbation approach for stochastic updating of mass, stiffness and damping matrices. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;166:108416.
7. Garg S, Gupta H, Chakraborty S. Assessment of DeepONet for time dependent reliability analysis of dynamical systems subjected to stochastic loading. *Engineering Structures*. 2022;270:114811.
8. Ping Q, Yizhong W, Jianwan D. et al. A new sequential sampling method of surrogate models for design and optimization of dynamic systems. *Mechanism and Machine Theory*. 2021;158:104248.
9. Elsukov VS, Lachin VI, Pavlov VV. Synthesis of Control Systems with Sign-To-Effect Compensating Feedback in Conditions of Limited Uncertainty. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika, Russian Electromechanics*. 2020; 63(5):40-45.
10. Malev NA, Pogoditsky OV. Research and synthesis of the modal regulator of the two-mass electromechanical system of the crane lifting mechanism. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018; 20(7-8):99-106.
11. Tsvetkov VYa. Framework of Correlative Analysis. *European researcher. Series A*. 2012; 6-1 (23):839-844.
12. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.
13. Panferov VI, Panferov SV, Haldin KS. Parametric Identification of the Model of Object Management by Transitional Function Working System Automatic Regulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(3):52–59. (in Russ.).
14. Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV, Malacion AS. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):126-140.
15. Goncalves M, Sousa P, Mendes J. et al. Real-Time Event-Driven Learning in Highly Volatile Systems: A Case for Embedded Machine Learning for SCADA Systems, *IEEE Access*. 2022;10: 50794-50806.
16. Hülsmann J, Barbosa J, Steinke F. Local Interpretable Explanations of Energy System Designs. *Energies*. 2023; 16(5):2161.
17. Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):86-97.
18. Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):101-110
19. Maler O, Manna Z, Pnueli A.: From Timed to Hybrid systems. Real Time: Theory in Practice, *Lecture Notes in Comp.Sc*. 1992; 600:447-484.
20. Pan J, Jiang X, Wan X. et al. A filtering based multi-innovation extended stochastic gradient algorithm for multivariable control systems. *Int. J. Control Autom. Syst*. 2017;15:1189-1197.

21. Ma JX, Xiong WL, Ding F. Iterative identification algorithms for input nonlinear output error autoregressive systems. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2016;14(1):140-147.

22. Xu L, Ding F. The parameter estimation algorithms for dynamical response signals based on the multiinnovation theory and the hierarchical principle. *IET Signal Processing*. 2017; 11(2):228-237.

23. Dincel E, Mutlu İ, Schrödel F. et al. Further Results on Dominant Pole Placement via Stability Mapping Approach. *IFAC-PapersOnLine*, 2018; 51(4):918-923.

24. Duman-Mammadov A, Dincel E, Söylemez MT. Design of decentralized proportional–integral proportional–retarded controllers in discrete-time domain for two-input two-output processes. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2023;45(3):427-439.

25. Das S, Halder K, Gupta A. Delay handling method in dominant pole placement based PID controller design. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.2019; 16(2):980-991.

26. Derksen H, Makam V. Invariant Theory and wheeled PROPs. *Journal of Pure and Applied Algebra*. 2023; 227(9):107302.

27. Kemper G. Computing quotients by connected solvable groups. *Journal of Symbolic Computation*. 2022;109:426-440.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – docent, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

Получено

12.05.2023г.

Отредактировано

26.05.2023г.

Принято

29.05.2023г.

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 332.14

ВНУТРЕННЕЕ УГЛЕРОДНОЕ ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ МИРОВЫХ И РОССИЙСКИХ ЭНЕРГОКОМПАНИЙ

Ивашкин Д.С.¹, Чиркова И.Г.²

^{1,2} Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
¹ivashkin@corp.nstu.ru, ²chirkova@corp.nstu.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Глобальная климатическая повестка по сокращению выбросов парниковых газов, а также геополитическая конъюнктура, направленная на постепенный отказ от потребления углеводородов и энергоресурсов из России, требуют серьезной трансформации промышленного бизнеса России, в особенности – компаний топливно-энергетического комплекса, являющихся крупнейшими эмитентами CO_{2-экв} и подверженных риску странового и трансграничного углеродного регулирования. ЦЕЛЬ. Определить величины внутренних цен на углерод, основные меры и способы декарбонизации, применяемые энергокомпаниями; на основе анализа международного опыта разработать рекомендации по оценке целесообразности и внедрению механизма внутреннего углеродного ценообразования в бизнес-процессы инвестиционного планирования и риск-менеджмента электрогенерирующих предприятий РФ. МЕТОДЫ. При проведении исследования использовались системный подход, аналитический, статистический и метод интервьюирования. На основе информации Росстата, отчетности российских и зарубежных энергокомпаний, научных трудов отечественных и зарубежных ученых проведен анализ данных по внутреннему углеродному ценообразованию мировых и российских энергокомпаний. РЕЗУЛЬТАТЫ. Представлен обзор научных исследований в области внутреннего ценового регулирования и влияния углеродного регулирования на электроэнергетику, приведены структурированные данные по величинам внутренних цен на углерод и интенсивности выбросов парниковых газов, представлены рекомендации для российских энергокомпаний по оценке целесообразности реализации внутреннего углеродного ценообразования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Внутренняя цена на углерод у подавляющего большинства крупнейших электрогенерирующих компаний России равна нулю; отсутствуют цели типа near-zero и net-zero. Временной горизонт целеполагания декарбонизации российской электрогенерации – 5-10 лет. Внутренняя цена на углерод рассмотренных зарубежных энергокомпаний лежит в диапазоне 3-101 долларов США за 1 тонну CO_{2-экв}.

Ключевые слова: внешние отрицательные эффекты; интернализация внешних эффектов; внутренняя цена на углерод, выбросы CO_{2-экв}; инвестиционная политика; декарбонизация; интенсивность выбросов; углеродное регулирование.

Для цитирования: Ивашкин Д.С., Чиркова И.Г. Внутреннее углеродное ценообразование мировых и российских энергокомпаний // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2 (58). С. 175-191.

INTERNAL CARBON PRICING OF FOREIGN AND RUSSIAN ENERGY COMPANIES

DS. Ivashkin¹, I.G. Chirkova²

Novosibirsk state technical university", Novosibirsk, Novosibirsk Region

¹ivashkin@corp.nstu.ru, ²chirkova@corp.nstu.ru

Abstract: RELEVANCE. The global climate agenda to reduce greenhouse gas emissions, as well as the geopolitical situation aimed at gradually phasing out the consumption of hydrocarbons and energy resources from Russia, require a serious transformation of the Russian industrial business, in particular, companies in the fuel and energy complex, which are the largest emitters of CO_{2-eq} and are subject to risk of country and cross-border carbon regulation. THE PURPOSE. To

determine internal carbon prices. To determine the main measures and methods of decarbonization applied by energy companies. To establish external and internal drivers and barriers for the implementation of internal price regulation by power generating companies in Russia and the world. METHODS. When conducting the study, a systematic approach, analytical and interviewing methods were used. Based on information from Rosstat, reports of Russian and foreign energy companies, scientific works of domestic and foreign scientists, an analysis of data on the internal carbon pricing of world and Russian energy companies was carried out. RESULTS. An overview of scientific research in the field of internal price regulation and the impact of carbon regulation on the electric power industry is presented, structured data on the values of internal carbon prices and the intensity of greenhouse gas emissions are presented, the main theses are highlighted and key conclusions are formed on decarbonization methods, barriers and incentives for Russian and foreign power generation companies. in matters of implementation of internal price regulation of CO₂-eq emissions. CONCLUSION. The domestic price of carbon for the vast majority of Russia's largest power generating companies is zero; there are no near-zero and net-zero targets. The time horizon for setting goals for the decarbonization of Russian power generation is 5-10 years. The domestic price for carbon of the considered foreign energy companies lies in the range of 3-101 USD per 1 tonne of CO₂-eq.

Key words: *negative externalities; internalization of external effects; internal carbon price; CO₂-eq emissions; investment policy; decarbonization; energy transition; carbon intensity; carbon dioxide regulation.*

For citation: Ivashkin DS, Chirkova IG. Internal carbon pricing of foreign and russian energy companies. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):175-191.

Введение и литературный обзор

Сокращение выбросов парниковых газов является одной из ключевых задач мирового сообщества и основным драйвером к осуществлению энергетического перехода и трансформации промышленности в плоскость устойчивого развития и низкоуглеродной экономики. В России на национальном уровне определен предельный показатель выбросов парниковых газов в 2,212 млрд тонн эквивалента углекислого газа на 2030 г [1], фактическое значение за 2020г составило 2,051 млрд. т CO₂-экв. В структуре выбросов парниковых газов в 2020 г. энергетическая отрасль занимает 80% от всего объема [2].

Одна из ключевых мер сокращения выбросов углерода и смягчения последствий изменения климата – это введение ценового регулирования выбросов углекислого газа на различных институциональных уровнях. Цены на углерод могут устанавливаться органами власти в форме налога на выбросы углерода или в виде системы торговли квотами на выбросы (ETS) на различных уровнях: регионов, городов, государств и на наднациональном уровне. Согласно отчета Всемирного банка по ценовому углеродному регулированию [3], по состоянию на апрель 2021г всего в мире существует 59 различных юрисдикций, где функционируют системы ценового регулирования выбросов углерода с диапазоном цен от 1 до 137 долларов США за 1 тонну выбросов CO₂-экв. Кроме того, выделены юрисдикции, где ценовое регулирование выбросов CO₂-экв находится в стадии рассмотрения или внедрения, в частности: Бразилия, Украина, о. Сахалин (Россия), Турция, Пакистан.

Одна из базовых теоретико-методологических основ формирования цены на углерод – это социальная стоимость углерода (SCC), которая определяется как чистая приведенная стоимость ущерба климату от еще одной тонны углерода, обусловленная траекторией глобальных выбросов с течением времени [4]. Принцип, лежащий в основе этого метода, состоит в том, чтобы интернализировать затраты, возникающие в результате последующего ущерба от изменения климата. С корпоративной точки зрения, SCC включает в себя расходы, связанные с недопущением нанесения ущерба окружающей среде в результате ее выбросов, и с усилиями, направленными на минимизацию ущерба, связанного с изменением климата [5].

Таким образом, ценовое регулирование выбросов углекислого газа является способом интернализации отрицательных внешних эффектов, а именно - величины издержек третьих лиц в результате производства (потребления) блага, которые не отражены в его рыночной цене. Среди авторов, занимающихся исследованием внешних эффектов и их интернализации, можно выделить Р. Коуза, Н. Стиглера, А.Пигу, А. Минееву.

Регулирование внешних эффектов – экстерналий – можно осуществить рыночными и не рыночными способами. Среди рыночных способов выделяют следующие виды: слияние фирм, теорема Коуза-Стиглера, рынок прав на вредные выбросы. В контексте регулирования сокращения выбросов углерода актуальным является рынок прав на вредные выбросы, где осуществляется торговля квотами на выбросы.

Иной способ интернализации внешних эффектов может быть реализован посредством государственного регулирования экономической деятельности предприятий, осуществляющих эмиссию $\text{CO}_2\text{-экв}$ в виде установления пределов объема производимых внешних эффектов – квот на выбросы $\text{CO}_2\text{-экв}$. Отличительная особенность введения квот от торговли выбросами заключается в том, что система квотирования выбросов устанавливает твердую цену, но при этом сохраняется гибкость в объемах эмиссий; система торговли выбросами $\text{CO}_2\text{-экв}$ в чистом виде гарантирует, что лимит выбросов четко ограничен, но при этом имеется гибкое ценообразование [6].

На данный момент в России проводится работа по оценке эффективности внедрения и применимости мероприятий, направленных на интернализацию внешних эффектов в части регулирования выбросов и поглощения парниковых газов на острове Сахалин, с целью достижения углеродной нейтральности данного региона в срок до 2025 года и для дальнейшего распространения регулирующих воздействий на иные субъекты РФ. По результатам эксперимента будут определены методы учета и инструменты регулирования выбросов и поглощения парниковых газов: квотирование выбросов парниковых газов, обязательное предоставление углеродной отчетности и ее верификация [7]. Иными словами, в среднесрочной перспективе перед промышленными предприятиями, в том числе энергокомпаниями, может возникнуть дополнительная финансовая нагрузка в части осуществления платы за выбросы $\text{CO}_2\text{-экв}$. Необходимо так же отметить, что в связи с планируемым вводом трансграничного углеродного регулирования Европейским союзом существует риск снижения объемов производства компаниями, продукция которых попадает под данное регулирование, что в конечном счете приведет не только к сокращению выручки экспортеров, но так же и к снижению спроса на промежуточные товары для производства продукции, попадающей под трансграничный налог, в частности, на электроэнергию: снижение выручки при различных сценариях ввода трансграничного налога на электроэнергетическую отрасль может составить от 70 до 91 млрд. руб. [8].

Научные исследования в области углеродного ценообразования в первую очередь направлены на изучение влияния механизмов внешнего регулирования выбросов $\text{CO}_2\text{-экв}$ (системы торговли квотами на выбросы, государственные и трансграничные налоги и сборы) на экономику стран, отдельных регионов, отраслей промышленности и компаний. Установлено, что система внешнего регулирования выбросов может прямым образом оказывать воздействие на реализацию механизмов внутреннего углеродного ценообразования компаниями: исследователями Н. Бэнто и др. делаются выводы, что национальные и наднациональные цены на выбросы углерода могут оказывать влияние на решение компаний установить внутреннюю цену на углерод [9]. Здесь же необходимо отметить представленные эмпирические доказательства А. Тринкс и др., что корпоративные действия на основе внутренних цен на углерод связаны в первую очередь с ожиданиями относительно будущих внешних углеродных ограничений [10].

Необходимо упомянуть ряд российских исследований, посвященных вопросу влияния углеродного регулирования на экономику промышленных предприятий России. Михеевым П.Н. [11] отмечается, что новыми угрозами для предприятия становятся политические и регуляторные изменения, которые могут вызвать рост затрат, снижение спроса на продукцию и услуги в результате штрафов и судебных решений. В электроэнергетике углеродное регулирование так же может привести к негативным финансовым последствиям в особенности для углеродоёмких предприятий: введение углеродных платежей даже на невысоком уровне (1300-2600 руб. 2019 г./т $\text{CO}_2\text{-экв}$) критическим образом снизит конкурентоспособность не только новых, но и действующих угольных электростанций, а также будет способствовать масштабному технологическому обновлению газовых электростанций с переходом на парогазовое оборудование и когенерационные установки [12]. Так же отмечается, что включение углеродного сбора в стоимость генерации значительно увеличивает ее себестоимость: при цене на углерод в размере 40 долл. за 1 т $\text{CO}_2\text{-экв}$ себестоимость производства на газовых и на угольных электростанциях вырастет в 1,3 и в 1,9 раза соответственно [13].

Один из способов учета возможных финансовых последствий вследствие распределения инвестиционных затрат в пользу углеродно-эффективных проектов – применение внутренней цены на углерод (internal carbon price - ICP). В Европе 28 %

компаний используют внутреннюю цену на углерод, в Японии – 24 %, в Великобритании – 20 %, в США – 15 %; в энергетике у 40% компаний имеется внутренняя цена на углерод [14].

Внутренние цены на углерод подразделяются на внутреннюю плату (комиссии), скрытую и неявную цену. В то время как механизм внутренних комиссий генерирует доход за счет определения фактической денежной стоимости выбросов и отнесения этих затрат на операционные расходы, теневая цена и неявная цена не подразумевают фактических финансовых операций. Скрытая (теневая) цена (ICP) — это гипотетическая цена, назначаемая за выбросы углерода для поддержки принятия стратегических инвестиционных решений путем выявления скрытых рисков и возможностей, связанных с климатом. Неявная цена — это расчетная предельная стоимость сокращения выбросов компании, включая затраты на соблюдение нормативных требований. Скрытая цена – наиболее распространённый тип внутренней цены на углерод в. В 2020 году 50,8% компаний, внедривших ICP, использовали теневую цену. Разброс медианных цен варьировался от 7,85 долл. США (информационные технологии) до 40 долл. США/тCO_{2-экв} (энергия) в 2015 г., а в 2020 г. – от 16 долл. США/тCO_{2-экв} в производстве товаров потребительского назначения до 43 долл. США/тCO_{2-экв} в медицине [15].

Внутренняя цена на углерод позиционируется как один из ключевых инструментов управления климатическими рисками, которые, необходимо отметить, уже перерастают в финансовые негативные последствия для компаний [8]. Так, М.М. Балашовым отмечается, что в связи с нарастающим влиянием механизмов углеродного регулирования на развитие промышленности России одно из ключевых направлений проактивных действий для российских компаний-экспортеров – это введение внутреннего учета с использованием условных (внутренних) цен на углерод, использование результатов для принятия решений, оценка устойчивости производства при различных сценариях цен на CO_{2-экв} [16].

В контексте электроэнергетической отрасли применение внутренней цены на углерод может иметь несколько преимуществ [17]:

- возможность прогнозирования будущей политики в части установления обязательной цены на выбросы углерода или возникновения требований в развёртывании технологий с низким или нулевым выбросом CO_{2-экв};
- управление рисками, связанными с неэффективно распределённым капиталом с позиции углеродоемкости проектов;
- подготовка к новым рынкам и обслуживанию клиентов, которые будут развиваться по мере декарбонизации электроэнергетического сектора;
- реагирование на интересы клиентов или инвесторов в отношении сокращения выбросов.

Помимо преимуществ с позиции риск-менеджмента, внутренняя цена на углерод может так же положительным образом влиять на финансово-экономические и производственные показатели компаний, внедривших данный инструмент. В частности, Дж. Ма и Дж. Куо в своем исследовании приходят к выводу, что применение внутренней цены на углерод может повысить прибыльность компаний за счет снижения операционных затрат [18]. Дж. Бёрд в своем исследовании приводит доказательства, что для капиталоемких и углеродоемких отраслей компании, использующие внутреннюю цену на выбросы углерода, имеют более значительное сокращение выбросов, чем компании, не использующие углеродное ценообразование в этих отраслях [19]. При этом с позиции влияния применения внутренней цены на углерод на технико-экономические показатели энергосистемы необходимо отметить работу группы исследователей во главе с О.Г. Горбач, которые делают вывод, что внедрение внутренней цены на углерод может привести к росту цены на электроэнергию в регионах присутствия [20].

Цель настоящего исследования - определить величины внутренних цен на углерод, основные меры и способы декарбонизации, применяемые энергокомпаниями России и регионов мировой экономики, и на основе анализа международного опыта разработать рекомендации по оценке целесообразности и внедрению механизма внутреннего углеродного ценообразования в бизнес-процессы инвестиционного планирования и риск-менеджмента предприятий электрогенерации России.

Научная новизна настоящей работы заключается в применении существующих методов исследования к новым проблемам: анализ международного опыта внедрения внутренних цен на углерод, интервьюирование представителей компаний электрогенерации России, а также аналитическая оценка стратегий декарбонизации российских и мировых энергокомпаний с дальнейшей разработкой практических рекомендаций в вопросах

интернализации внешних отрицательных эффектов, выраженных в эмиссии парниковых газов электрогенерирующими компаниями России.

Материалы и методы

В рамках проведенного анализа отчетов по раскрытию информации в области углеродного регулирования ведущих зарубежных энергокомпаний [21 – 38], определен перечень электрогенерирующих компаний с внутренней ценой на углерод в странах, имеющих внешнее углеродное регулирование (Таблица 1). На основании данной информации осуществлен статистический анализ для целей проверки гипотезы, что национальные и наднациональные цены на выбросы CO_{2-экв} могут оказывать первоочередное влияние на решение компаний установить и определить величину внутренней цены на углерод.

Сбор и систематизация информации осуществлялась с учетом следующих ограничений:

- наличие опубликованной информации о внутренней цене на углерод в 2021 г в открытых источниках электрогенерирующими компаниями или энергокомпаниями с правом собственности на объекты генерации электроэнергии;
- принадлежность электрогенерирующих компаний к странам, установившим внешнее ценовое регулирование выбросов CO_{2-экв} в 2021 г [3];
- в случае отсутствия указания в отчетах конкретной величины внутренней цены на углерод, значение принималось с учетом вводных данных, определенных в этих отчетах (в частности, равной внешней цене на углерод).

Таблица 1
Table 1

Внутренние цены на углерод в электроэнергетических компаниях
Internal carbon prices in electric utilities

№	Компания	Страна	внутренняя цена на углерод, долл США /тCO ₂	внешняя цена на углерод, долл США /тCO ₂
1	Marubeni corp	Япония	3	3
2	Tokyo Electric Power Co Holdings Inc	Япония	14	3
3	SEPCO	Южная Корея	25	16
4	american electric power	США (Калифорния)	15	18
5	Endesa	Испания	25	18
6	Iberdrola	Испания	59	18
7	Siemens AG	Великобритания	13	25
8	Scottish and Southern Energy plc	Великобритания	78	25
9	Centrica	Великобритания	101	25
10	Eni	Италия	45	45
11	Enel	Евросоюз	12	50
12	Fortum	Евросоюз	33	50
13	Uniper	Евросоюз	50	50
14	E.ON	Евросоюз	50	50
15	EDF	Франция	52	52
16	Engie SA	Евросоюз	53	53
17	Norsk Hydro	Норвегия	69	69

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

На основе приведенных в Таблице 1 данных построена диаграмма рассеивания, где в качестве признак-фактора приняты данные по внешним ценам на углерод, в качестве

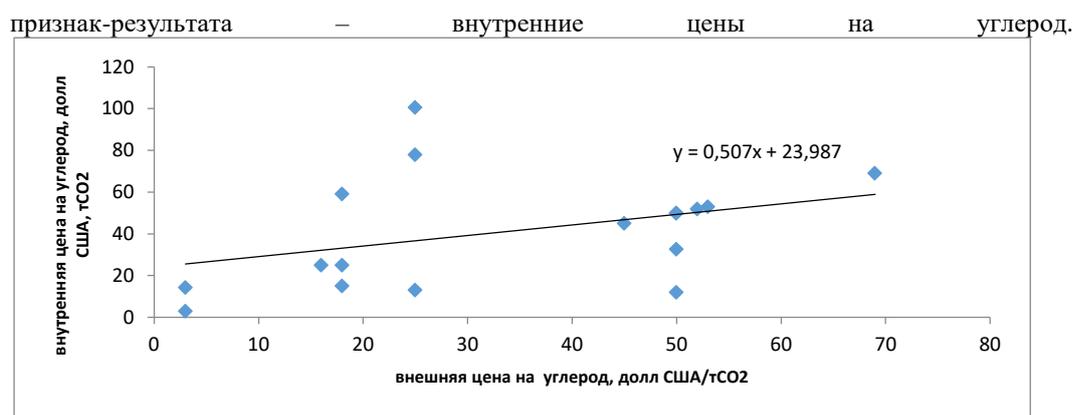


Рис.1. Диаграмма рассеивания внутренней цены на углерод

Fig.2. Scatterplot of Internal carbon prices

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

На основе построенной диаграммы и полученного уравнения регрессии определены величины коэффициентов линейной корреляции, равного 0,3753, и детерминации, равного 0,1409. Таким образом, по шкале Чеддока фиксируется умеренная сила связи между внешней и внутренней ценами на углерод, и внутренняя цена на 14% зависит от величины внешней цены на углерод в рамках сформированной модели.

Интенсивность выбросов парниковых газов при производстве электроэнергии является одним из ключевых индикаторов для электрогенерирующих компаний в контексте декарбонизации. В связи с чем осуществлен статистический анализ данных (Таблица 2) в части оценки корреляционной взаимосвязи между величиной интенсивности выбросов CO₂-экв при производстве электроэнергии и внутренней ценой на углерод в рамках настоящей выборки¹.

Таблица 2

Table 2

Интенсивность выбросов электрогенерирующих компаний и их регионов присутствия
Carbon intensity of electric utilities and host countries

компания	интенсивность выбросов, гCO ₂ -экв /кВт.час по Охвату 1 в 2021 г.	страна присутствия	Средняя интенсивность выбросов в стране в 2021г, гCO ₂ -экв /кВт.час [51]
Tokyo Electric Power Co Holdings Inc	452	Япония	479
SEPCO	649,83	Южная Корея	458
American electric power	569	США	379
Endesa	180	Испания	194
Iberdrola	101	Испания	194
Scottish and Southern Energy plc	255	Великобритания	268
Centrica	408	Великобритания	268
Enel	227	Евросоюз	229
Fortum	312	Евросоюз	229
Uniper	456,71	Евросоюз	229
EDF	48	Франция	67

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

¹ исключены 6 компаний в силу отсутствия с их стороны опубликованной информации касательно фактических величин интенсивности выбросов CO₂-экв при производстве электроэнергии

Определено, что линейная корреляционная зависимость между величиной интенсивности выбросов $\text{CO}_2\text{-экв}$ и внутренней ценой на углерод является слабой - с коэффициентом корреляции, равным -0,24.

Помимо проведенной корреляционной оценки между описанными выше параметрами, выделены ключевые аспекты, указанные в публичных отчетах электрогенерирующими компаниями в качестве определяющих при формировании величины внутренней цены на углерод, в частности:

- Компанией *Enel* внутренняя цена на $\text{CO}_2\text{-экв}$ установлена в соответствии с международными рекомендациями и руководящими принципами для системы торговли квотами на выбросы $\text{CO}_2\text{-экв}$ в Европе [31];

- *ENDESA* использует эталон цен на углерод, связывая стоимость с выбросами $\text{CO}_2\text{-экв}$, чтобы оптимизировать процесс принятия решений при выборе проектов с соответствующими капиталовложениями, управлении рисками или планировании бизнес-стратегии [25];

- *AEP* интегрирует цену на углерод в свое прогнозирование товаров в качестве показателя будущего регулирования климата. Цена на углерод начинается с 15 долларов США за метрическую тонну выбросов $\text{CO}_2\text{-экв}$, увеличиваясь на 3,5% в год в номинальном выражении [38];

- *Tokyo Electric Power* использует внутреннюю цену на углерод для моделирования стоимости электроэнергии при превышении интенсивности выбросов электростанциями свыше 550 г $\text{CO}_2\text{-экв}$ / кВт.час для осуществления дальнейшей контрактации [22];

- *KEPCO* использует внутреннюю цену в качестве эталона для инвестиций в зарубежные и внутренние проекты компенсации выбросов углерода или затрат на соблюдение требований системы торговли квотами в Южной Корее [23];

- *Iberdrola* применяет внутреннюю цену для принятия инвестиционных и операционных решений по отношению к планированию НИОКР [26];

- *Uniper* учитывает цену на углерод в финансовых моделях проектов, подпадающих под действие EU ETS, а также при необходимости соблюдения требований ESG в соответствии с Таксономией ЕС по критериям отбора устойчивого финансирования [33];

- *Norsk Hydro* включает стоимости углерода в анализ затрат, связанных с выбросами $\text{CO}_2\text{-экв}$, которые становятся переменными эксплуатационными расходами на уровне электростанции [37];

- *Scottish and Southern Energy plc* отражает цену на углерод в решениях об инвестировании и текущей эксплуатации тепловых электростанций и технологий возобновляемой генерации. Так же отмечается, что качественное ценообразование на углерод будет особенно важно для поддержки инвестиционной деятельности компании в области систем улавливания и хранения углерода и водородных технологий [28].

Изложенные выше аспекты применения внутренней цены на углерод отражают общий факт принятия обязательств со стороны электрогенерирующих компаний по интернализации издержек, связанных с выбросами парниковых газов, путем применения внутренней цены на углерод в первую очередь на этапах инвестиционного планирования развития бизнеса. Таким образом, средне- и долгосрочная стратегия развития бизнеса данных компаний неразрывно связана с планированием потенциальных издержек, связанных с платой за выбросы углерода.

По результатам проведенного анализа отчетов устойчивого развития в части декарбонизации бизнеса и применения механизмов ценового регулирования выбросов парниковых газов установлено, что среди крупнейших электрогенерирующих компаний России [39] применение механизма внутренней цены на углерод осуществляется только компанией «Евросибэнерго», которая входит в состав компании En+, то есть указанная величина внутренней цены на углерод (20 долл. США за 1т $\text{CO}_2\text{-экв}$) относится не только к энергетическому, но и к металлургическому бизнесу данной компании. Помимо этого, компания «Юнипро» так же сообщает, что в планы компании на 2022-23 годы включено развитие системы корпоративного углеродного регулирования [40]. Иных упоминаний и отражения информации касательного ценового углеродного регулирования в публичных отчетах электрогенерирующими компаниями не представлено.

С учетом ранее изложенного вывода, что все выше упомянутые зарубежные энергокомпании применяют внутреннюю цену на углерод в первую очередь на этапе инвестиционного планирования и стратегического развития бизнеса, проведен анализ наличия стратегий декарбонизации и конкретных количественных целей в области снижения интенсивности выбросов электрогенерирующими компаниями РФ на основе отчетов об устойчивом развитии [40-45].

Таблица 3

Table 3

Фактическая и целевая интенсивность выбросов парниковых газов электрогенерирующих компаний России, $\text{гСО}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}^*$

Actual and target greenhouse gas emission intensity of Russian power generating companies, $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$

Компания	фактическая интенсивность выбросов, $\text{гСО}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}$ в 2021 г.	цель в абсолютных величинах, $\text{гСО}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}$	целевой срок достижения (год)
Интер РАО	430	414,78	2025
РусГидро	737,1	729,17	2035
Эл5 Энерго	449,31	412	2024
Евросибэнерго (Еп+)	10,5	7,43	2050
Газпромэнергохолдинг	306,5 ²	303,5	2021
Юнипро	539	-	-

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

По итогам анализа фактической и целевой интенсивности выбросов $\text{CO}_{2\text{-экв}}$ электрогенерации России можно сделать следующие выводы:

– подавляющее большинство компаний не установило целей типа near-zero (баланс выбросов $\text{CO}_{2\text{-экв}}$, близкий к нулевому) и net-zero (углеродная нейтральность). Временной горизонт целеполагания – 10-15 лет; большая часть из целевых показателей по отношению к фактической величине интенсивности выбросов 2021 года составляет не более 10%. Так, компанией «Газпромэнергохолдинг» в отчете об устойчивом развитии за 2020 год [44] указаны достигнутые дочерними структурами величины углеродоемкости, а также целевые значения на 2021 год, откуда можно сделать вывод, что цели по снижению углеродного следа компаниями уже достигнуты: фактическое значение углеродоемкости в 2020 году компании «ТГК-1», «МОЭК» равно целевому значению 2021 года - 202 г $\text{CO}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}$, 215 г $\text{CO}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}$ соответственно.

– необходимо отдельно выделить компанию «Евросибэнерго», которая в составе Еп+ планирует выйти на нулевой углеродный баланс в том числе с применением компенсационных мероприятий [45] к 2050 году, при этом энергетический бизнес компании, основанный на гидрогенерации и имеющий один из наиболее низких показателей углеродоемкости (10,5 г $\text{CO}_{2\text{-экв}}/\text{кВт.час}$), в планах достичь снижения эмиссии парниковых газов на 30% относительно 2021 года.

– часть крупнейших электрогенерирующих компаний не установили (или не отразили в публичных отчетах) целевых значений по сокращению выбросов $\text{CO}_{2\text{-экв}}$: компания «Юнипро» в своём отчете [40] отразила информацию о фактических выбросах и углеродоемкости производства электроэнергии, а также сообщила о способах декарбонизации бизнеса, в частности, о планировании разработки проектов в сфере ВИЭ и проведении масштабной модернизации для сокращения выбросов $\text{CO}_{2\text{-экв}}$, но при этом не сообщив количественных целей декарбонизации бизнеса. ООО «Сибирская генерирующая компания», обладающая доминирующим положением как на рынке труда энергетического сектора Сибирских регионов [46], так и на оптовом рынке электроэнергии и мощности второй ценовой зоны, оказывающая таким образом существенное социальное, экологическое и экономическое влияние на регион присутствия, так же не представила в открытом доступе информации об обязательствах по декарбонизации бизнеса в виде конкретных количественных показателей. При этом компания отразила актуальные для предприятия мероприятия по снижению выбросов $\text{CO}_{2\text{-экв}}$: замещение угольных котельных комбинированных источником электрической и тепловой энергии с суммарным экологическим эффектом в размере 425 тыс. т $\text{CO}_{2\text{-экв}}$ в год [47].

² Отражено среднее значение по показателям дочерних компаний «Мосэнерго», «ТГК-1», «ОГК-2», «МОЭК» по 2020 г.

Компания «РусГидро», являющаяся крупнейшим собственником гидрогенерации в России, имеет максимальный показатель углеродоемкости выработки электроэнергии по причине предприятий дочерней группы «РАО ЭС Востока». Компания установила довольно скромные целевые показатели по декарбонизации электрогенерации: снижение эмиссии CO_{2-экв} на 7,7% относительно 2015 года. Среди основных способов декарбонизации компания выделяет строительство малых ГЭС (179,2 МВт к 2028 году), переход тепловых станций от сжигания угля на газ, внедрение энергосервисной модели реализации проектов модернизации локальной генерации с применением ВИЭ и систем накопления энергии, а также определение углеродного баланса водохранилищ гидроэлектростанций России для установления критериев отнесения ГЭС к «зеленым» проектам [48].

Компания «Росатом» имеет долю в общем объеме выбросов парниковых газов России на уровне 0,04%, прямые выбросы Компании от работы атомных электростанций равны нулю. И несмотря на минимальный углеродный след компании, «Росатом» планирует реализовать суммарный портфель объектов ветроэнергетики в размере 1,7 ГВт к 2027 году [49].

В силу ограниченной информации в публичных отчетах российских энергокомпаний, проведено офлайн-интервью с представителями российских электро- и теплогенерации по вопросам углеродного регулирования и его влияния на бизнес: из 10 направленных запросов на заполнение анкеты получены ответы от трех компаний, занимающихся производством электрической и тепловой энергии; суммарная установленная электрическая мощность генерирующих активов данных трех компаний-респондентов составляет порядка 75 ГВт. Ответы респондентов на ключевые вопросы представлены в Таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты анкетирования*

Survey results

№	Вопрос	Компания №1	Компания №2	Компания №3
1	Планирует ли Ваша компания применять внутреннюю цену на углерод?	нет	нет	нет
2	Какие основные внешние факторы являются барьерами в вопросах снижения выбросов CO ₂ -экв для Вашей организации?	1. Загрузка системным оператором неэффективных блоков тепловой генерации; 2. Неблагоприятные погодные условия, снижающие выработку энергии от ВИЭ	Доступность и цена технологий	Нет стратегии декарбонизации, ценовое регулирование выбросов ПГ также не осуществляется в связи отсутствием бизнес-потребности
3	Какие основные внутренние факторы являются барьерами в вопросах снижения выбросов CO ₂ -экв для Вашей организации?	Недостаток финансирования для выполнения модернизации действующего оборудования тепловой генерации		
4	Учитываются ли риски, связанные с установлением платы за выбросы CO ₂ -экв, при формировании инвестиционной программы	Компания планирует наращивать долю возобновляемых источников энергии. В 2021 году компания приступила к разработке собственной климатической стратегии. Проведена оценка климатических	нет	

		рисков в кратко-, средне- и долгосрочной перспективах.		
--	--	--	--	--

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

Резюмируя результаты полученных ответов по итогам проведенного офлайн-интервью, можно отметить, что компаниями-респондентами не определена долгосрочная стратегия декарбонизации, и механизм внутреннего углеродного ценообразования неактуален. Помимо этого компании выделили барьеры, препятствующие активной декарбонизации бизнеса. Среди внешних барьеров для снижения выбросов CO_{2-экв} отмечены техническая незрелость и стоимость технологий, а также несовершенство рыночных механизмов, связанных с выбором генерирующего оборудования к включению в сеть. Среди внутренних барьеров: недостаток финансирования для выполнения модернизации действующего оборудования тепловой генерации; доступность и цена технологий.

Результаты и обсуждение

По итогам проведенного исследования, включавшего в себя этапы проведения аналитического и статистического анализа, интервьюирования представителей энергокомпаний России и дальнейшей систематизации полученной информации, установлено следующее:

- внутренняя цена на углерод для большинства крупнейших электроэнергетических компаний России равна 0; единственная электрогенерирующая компания из рассмотренных, установившая внутреннюю цену на углерод, – «Евросибэнерго»;
- механизм внутреннего ценового регулирования выбросов CO_{2-экв} не определяется как планируемый к внедрению кроме компании «Юнипро»;
- респондентами с суммарным объемом установленной мощности порядка 75 ГВт заявлено, что установление платы за углерод не идентифицируется как ключевой риск;
- подавляющее большинство российских энергокомпаний не установило целей net-zero (баланс выбросов CO_{2-экв}, близкий к нулевому) и net-zero (углеродная нейтральность). Временной горизонт целеполагания – до 15 лет; большая часть из целевых показателей по отношению к фактической величине интенсивности выбросов 2021 года составляет не более 10%;
- компании планируют реализовывать мероприятия по декарбонизации по профильному – энергетическому направлению: строительство ВИЭ, низкоуглеродной генерации, замещение угольной генерации. С другой стороны, зарубежными энергокомпаниями (American electric power, Fortum, KESCO) достижение целей по снижению углеродного следа предполагается осуществлять в том числе с использованием карбоновых офсетов из других секторов экономики [23, 32, 50].
- наблюдается умеренная зависимость между внешней и внутренней ценой на углерод зарубежных компаний; 41% предприятий из настоящей выборки установили цену на углерод в компании равной внешней цене региона присутствия;
- в рамках настоящей выборки показатель интенсивности выбросов не влияет на величину внутренней цены на углерод: коэффициент линейной корреляции между настоящими параметрами равен -0,24;
- средне- и долгосрочная стратегия развития бизнеса зарубежных электрогенерирующих компаний неразрывно связана с планированием интернализации издержек, связанных с платой за выбросы углерода.

Таким образом, российскими электрогенерирующими компаниями в отличие от иностранных, в рамках стратегии развития бизнеса не предполагается учет экстерналий в виде выбросов парниковых газов вследствие их производственной деятельности посредством установления цены на углерод. Но принимая во внимание тот факт, что введение платы за углерод может наступить после реализации «Сахалинского эксперимента», вопрос о необходимости учета роста потенциальных издержек в средне- и долгосрочной перспективе остается актуальным. В связи с этим в рамках оценки целесообразности реализации внутреннего углеродного ценообразования электрогенерирующими компаниями возможно руководствоваться следующими аспектами:

1. исходя из опыта зарубежных энергокомпаний, внутреннее углеродное ценообразование актуально на этапе инвестиционного планирования, соответственно, необходимо в первую очередь сформировать стратегию декарбонизации с определением ключевых количественных целей на средне- и долгосрочных горизонтах планирования;

2. осуществить оценку возникновения риска, связанного с государственным регулированием экономической деятельности предприятий, осуществляющих эмиссию CO_2 -экв в виде установления пределов объема производимых внешних эффектов – квот на выбросы CO_2 -экв или внедрения систем торговли квотами на выбросы в регионе присутствия бизнеса. В России, как было изложено выше, установленный на законодательном уровне срок завершения «Сахалинского эксперимента» с возможным тиражированием разработанных мер по углеродному регулированию на другие регионы РФ - 2026 год.

3. в случае положительного принятия решения о необходимости введения внутреннего ценового регулирования выбросов в компании, с учетом выявленной умеренной зависимости между внешней и внутренней ценой на углерод зарубежных компаний, величина может быть установлена равной прогнозной внешней цене на выбросы CO_2 -экв: в России установленный размер платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения «Сахалинского эксперимента» равен 1000 руб./т CO_2 -экв.

Заключение

Таким образом, механизм корпоративного регулирования выбросов парниковых газов с применением внутренней цены на углерод не востребован большинством российских компаний, занимающихся производством электрической и тепловой энергии.

Исходя из опыта зарубежных электрогенерирующих компаний и проведенных научных исследований в вопросах эффективности применения внутренней цены на углерод, необходимо подчеркнуть следующее:

- внедрение механизма внутренней цены на углерод может улучшить финансово-экономические показатели промышленной компании за счет снижения операционных затрат;

- внутренняя цена на углерод может служить маркером для принятия решений в вопросах использования альтернативы: развитие собственных проектов или декарбонизация через карбоновые офсеты или зеленые сертификаты. Учитывая капиталоемкость зеленых инвестиций в электроэнергетике, закупка карбоновых офсетов, выпущенных эмитентом из неэнергетического сектора, может быть более привлекательным инструментом по снижению углеродного следа компании.

- перспектива реализации «Сахалинского эксперимента» на все субъекты России в части установления платы за углерод в среднесрочной перспективе подчеркивает практическую значимость применения механизмов внутреннего углеродного ценообразования при распределении инвестиционного капитала и учета потенциальных финансовых рисков.

- полученные результаты статистического анализа показывают, что величина интенсивности выбросов при производстве электроэнергии не является причиной определения размера внутренней цены на углерод, при этом внешнее углеродное ценообразование в регионе присутствия может быть основой для определения уровня цены на углерод в энергокомпании. При этом необходимо отметить, что корреляционная оценка настоящих показателей с точки зрения их влияния на величину внутренней цены на углерод является необходимой, но не достаточной. В связи с чем, при дальнейших исследованиях необходимо так же провести оценку влияния иных факторов на определение величины внутренней цены на углерод, в частности, установленных количественных целей декарбонизации на корпоративном и национальном уровнях.

- целесообразность осуществления интернализации внешних эффектов, возникающих вследствие выбросов CO_2 -экв при производстве электрической энергии, является открытым вопросом для подавляющего большинства российских энергокомпаний. Для ответа на данный вопрос необходимо иметь прозрачное и четкое представление о перспективах внедрения государственного регулирования объемов или цен производимых внешних эффектов в секторе электроэнергетики. При этом, учитывая опыт зарубежных электрогенерирующих компаний, реализующих схему учета отрицательных внешних эффектов в виде выбросов CO_2 -экв даже в тех регионах присутствия, где отсутствует реализованная схема внешнего регулирования выбросов парниковых газов, для российского сектора электроэнергетики возможно так же учитывать данные издержки, поскольку применение комплексной оценки инвестиционных проектов с использованием единой количественной метрики в виде внутренней цены на углерод может быть довольно эффективным и полезным инструментом для планирования и реализации трансформации бизнеса в направлении безуглеродной экономики.

Автор публикации

Ивашкин Денис Сергеевич – аспирант, кафедра Производственного менеджмента и экономики энергетики, Новосибирский государственный технический университет.

Чиркова Ирина Григорьевна - д.э.н., доцент кафедры «Производственный менеджмент и экономика энергетики», Новосибирский государственный технический университет.

Литература

1. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гатина Р.З., Гафуров Н.М. Возможные пути снижения выбросов парниковых газов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19 (9-10): 21-31. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31>
2. Федеральная служба государственной статистики. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень 2021. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf (дата обращения 10.03.2023)
3. World bank. Executive summary. State and trends of carbon pricing, 2021 URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>
4. МГЭИК, Изменение климата. Обобщающий доклад, 2014. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf
5. University of St. Gallen. Internal Carbon pricing. How to operationalize, measure and control carbon emissions, 2022 URL: https://www.icv-controlling.com/fileadmin/Wissen/Frei_f%C3%BCr_alle_Controller_Magazin_Statement_White_Paper_Schriftenreihe_Dream_Car_Bericht/2022_UNISG_Internal_Carbon_Pricing.pdf
6. O.G. Gorbach. Review of internal carbon pricing and the development of a decision process for the identification of promising Internal Pricing Methods for an Organisation, Renewable and sustainable energy reviews, 154(7774):111745, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111745
7. О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации. URL: <http://www.kremlin.ru/catalog/keywords/89/events/67932> (дата обращения 10.03.2023)
8. Вотинов А.И., Лазарян С.С., Радионов С.А., Судаков С.С. Оценка последствий применения механизма трансграничного углеродного регулирования Евросоюза для России. Экономический журнал ВШЭ. 2021; 25(3): 452–477
9. Nuno Bento, et al. (2021). National Climate Policies and Corporate Internal Carbon Pricing. The Energy Journal vol. 42 N5. <https://doi.org/10.5547/01956574.42.5.nben>
10. Arjan Trinks, et al. (2022). External carbon costs and internal carbon pricing. Renewable and Sustainable Energy Reviews 168 112780. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112780>
11. Михеев П.Н. Актуальные вопросы управления климатическими рисками в деятельности российских публичных компаний. Часть II. Новые тенденции в управлении рисками. Управление риском. 2022 (4): 14-29.
12. Веселов Ф.В., Ерохина И.В., Никулина Е.А. Моделирование изменений спотовых цен на оптовом рынке электроэнергии в России при введении платы за углерод, как экономического стимула для декарбонизации отрасли. Управление развитием крупномасштабных систем. Труды Четырнадцатой международной конференции. 2021. С. 397-404
13. Кононов Д.Ю. Зависимость стоимости электроэнергии от объема выбросов парниковых газов. Вестник АНГТУ №15 2021: 71-75
14. Департамент многостороннего экономического сотрудничества минэкономразвития России. Корпоративные стратегии углеродной нейтральности. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/f55d57f8dcb8ec195b1575e857610dc/03062021.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)
15. Kim Jeong Won, et al. (2022) Corporate Internal Carbon Pricing: Global Trends and Challenges. Policy Brief. N55 URL: https://esi.nus.edu.sg/docs/default-source/esi-policy-briefs/corporate-internal-carbon-pricing_global-trends-and-challenges.pdf (дата обращения 10.03.2023)
16. Балашов М.М. (2020). Влияние механизмов углеродного регулирования на развитие промышленности Российской Федерации // Стратегические решения и риск-менеджмент. №4 с 354-365. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-4-354-365
17. J. Kruger. Resources for the Future. Hedging an Uncertain Future: Internal Carbon Prices in the Electric Power Sector, 2017 <https://www.rff.org/publications/reports/hedging-an->

- uncertain-future-internal-carbon-prices-in-the-electric-power-sector/ (дата обращения 10.03.2023)
18. Ma, J., & Kuo (2021). Environmental self-regulation for sustainable development: Can internal carbon pricing enhance financial performance? *Business Strategy and the Environment*, 1–11 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2817>
19. Byrd, John W. and Cooperman, Elizabeth S. and Hickman, Kent (2021). Capital Budgeting and Climate Change: Does Corporate Internal Carbon Pricing Reduce CO2 Emissions. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3575769>
20. Gorbach, O.G.; Hussein, N.S.; Thomsen, J. (2021). Impact of Internal Carbon Prices on the Energy System of an Organisation’s Facilities in Germany, Japan and the United Kingdom Compared to Potential External Carbon Prices. *Energies* 2021, 14, 4094. <https://doi.org/10.3390/en14144094>
21. Marubeni Corp. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://marubeni.disclosure.site/en/themes/15/> (дата обращения 01.06.2023)
22. The Tokyo Electric Power Company holdings, Inc. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/about/esg/cdp-e.html> (дата обращения 01.06.2023)
23. KEPCO. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/ntcob/list.do?boardCd=BRD_000529&menuCd=EN040309 (дата обращения 01.06.2023)
24. American Electric Ppower. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.aepsustainability.com/performance/docs/2021CDPClimateSurvey.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
25. ENDESA. Statement of Non-Financial Information and Sustainability, 2021. URL: <https://www.endesa.com/content/dam/enel-es/endesa-en/home/investors/financialinformation/financialresults/documents/2021/fy/statement-of-non-financial-information-and-sustainability-2021.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)
26. Iberdrola SA. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.iberdrola.com/documents/20125/41506/CDP_Climate_Change21.pdf (дата обращения 01.06.2023)
27. Siemens AG. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:35401bd8-3e5e-417a-9932-0dfd2effbf43/cdp-climate-change21.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
28. SSE. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.sse.com/media/v30az4pi/sse_cdp_climate_change_questionnaire_2021_final_submission.pdf (дата обращения 01.06.2023)
29. Centrica. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.centrica.com/media/5205/cdp-climate-response-2021.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
30. Eni. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.eni.com/assets/documents/eng/just-transition/2021/Eni-SpA-CDP-Climate-Change-Questionnaire-2021-submitted.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
31. ENEL. Sustainability report, 2021. URL: https://www.enel.com/content/dam/enel-com/documenti/investitori/sostenibilita/2021/sustainability-report_2021.pdf (дата обращения - 15.03.2023)
32. Fortum. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.fortum.com/sites/default/files/documents/fortum_cdp_climate_change_response_2021.pdf (дата обращения - 15.03.2023)
33. Uniper SE. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.uniper.energy/sites/default/files/2022-10/CDPClimateChangeResponseUniperSE2022.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
34. E.ON. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 <https://www.eon.com/en/about-us/sustainability/reporting.html> (дата обращения 01.06.2023)
35. EDF. Universal registration document, 2021 URL: <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2022-03/edf-2021-universal-registration-document.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)
36. Engie SA. Climate notebook, 2021 URL: <https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/CahierClimat-Engie2021-ENG-v6-BD.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)

37. Norsk Hydro. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20CDP%20answers%202020.pdf?docId=576632> (дата обращения 01.06.2023)
38. American Electric Power Company. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.aepsustainability.com/performance/docs/2021CDPClimateSurvey.pdf> (дата обращения 10.03.2023)
39. Крупнейшие компании электроэнергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/4846> (дата обращения 20.03.2023)
40. Юнипро. Годовой отчет, 2021 URL: https://unipro.energy/shareholders/disclosure/annual_reports/ (дата обращения 10.03.2023)
41. Интер РАО. Годовой отчет, 2021 URL: https://iraogeneration.ru/information/go_reports/ (дата обращения 10.03.2023)
42. РусГидро. Отчет об устойчивом развитии. 2021 URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/b16/Godovoj-otchet-2021.pdf> (дата обращения 10.03.2023)
43. Эл5-Энерго. Годовой отчет, 2021 URL: <https://www.e15-energo.ru/investors/information-disclosure/> (дата обращения 10.03.2023)
44. Газпром Энергохолдинг. Отчет об устойчивом развитии, 2021 URL: <https://energoholding.gazprom.ru/ecology/> (дата обращения 15.03.2023)
45. En+ Group. Как построить низкоуглеродное будущее: En+ Group на пути к углеродной нейтральности, 2021 (дата обращения 15.03.2023) URL: https://enplusgroup.com/upload/iblock/05c/46cr5fyd7b2nqr7c7u2w1cqfc5chpgpe/En_-Progress-to-net-zero.pdf (дата обращения 15.03.2023)
46. Чиркова И.Г., Бережной К.М. Анализ занятости в энергетическом секторе экономики региона // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №2 (54). С. 134-141
47. Экологические проекты ООО «СГК» URL: <https://sibgenco.ru/main/ecology/projects/> (дата обращения 10.03.2023)
48. Русгидро. Отчет об устойчивом развитии, 2015. URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/960/KSO-2015.pdf> (дата обращения 10.03.2023)
49. Росатом. Отчет о прогрессе в области устойчивого развития, 2021. URL: <https://www.report.rosatom.ru/2033> (дата обращения 15.03.2023)
50. AEP. Powering forward to net-zero. A TCFD report American electric power, 2021 URL: <https://aepsustainability.com/performance/docs/FINAL%202022%20TCFD%20Report.pdf> (дата обращения 15.03.2023)
51. Электронный ресурс: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?time=2021>

References

1. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gatina R.Z., Gafurov N.M. Possible ways to reduce greenhouse gas emissions. News of higher educational institutions. Energy problems. 2017;19(9-10):21-31. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31>
2. Federal State Statistics Service. Key indicators of environmental protection. Statistical Bulletin 2021. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf (Accessed 03/10/2023)
3. World bank. executive summary. State and trends of carbon pricing, 2021 URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>
4. IPCC, Climate change. Summary report, 2014. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf
5. University of St. Gallen. Internal Carbon pricing. How to operationalize, measure and control carbon emissions, 2022 URL: https://www.icv-controlling.com/fileadmin/Wissen/Frei_f%C3%BCr_alle_Controller_Magazin_Statement_Whit_e_Paper_Schriftenreihe_Dream_Car_Bericht/2022_UNISG_Internal_Carbon_Pricing.pdf
6. O.G. Gorbach. Review of internal carbon pricing and the development of a decision process for the identification of promising Internal Pricing Methods for an Organisation, Renewable and sustainable energy reviews, 154(7774):111745, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111745
7. On conducting an experiment to limit greenhouse gas emissions in certain constituent entities of the Russian Federation. URL: <http://www.kremlin.ru/catalog/keywords/89/events/67932> (Accessed 03/10/2023)
8. Votinov A.I., Lazaryan S.S., Radionov S.A., Sudakov S.S. Assessment of the consequences of the application of the mechanism of transboundary carbon regulation of the

European Union for Russia. *Economic Journal of the Higher School of Economics*. 2021; 25(3): 452–477

9. Nuno Bento, et al. (2021). National Climate Policies and Corporate Internal Carbon Pricing. *The Energy Journal* vol. 42 N5. <https://doi.org/10.5547/01956574.42.5.nben>

10. Arjan Trinks, et al. (2022). External carbon costs and internal carbon pricing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 112780. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112780>

11. Mikheev P.N. Topical issues of climate risk management in the activities of Russian public companies. *Part II. New trends in risk management. Risk management*. 2022(4): 14-29.

12. Veselov F.V., Erokhina I.V., Nikulina E.A. Simulation of changes in spot prices in the wholesale electricity market in Russia with the introduction of carbon pricing as an economic incentive for the decarbonization of the industry. *Management of the development of large-scale systems. Proceedings of the Fourteenth International Conference*. 2021. p. 397-404

13. Kononov D.Yu. The dependence of the cost of electricity on the volume of greenhouse gas emissions. *Bulletin of Angarsk TU №15 2021*: 71-75

14. Department of Multilateral Economic Cooperation of the Ministry of Economic Development of Russia. Corporate strategies for carbon neutrality. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/f55d57f8dcbb8ec195b1575e857610dc/03062021.pdf> (accessed 15.03.2023)

15. Kim Jeong Won, et al. (2022) Corporate Internal Carbon Pricing: Global Trends and Challenges. Policy Brief. N55 URL: https://esi.nus.edu.sg/docs/default-source/esi-policy-briefs/corporate-internal-carbon-pricing_global-trends-and-challenges.pdf (дата обращения 10.03.2023)

16. Balashov M.M. (2020). Influence of carbon regulation mechanisms on the development of industry in the Russian Federation // *Strategic decisions and risk management*. No. 4 from 354-365. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-4-354-365

17. J. Kruger. Resources for the Future. Hedging an Uncertain Future: Internal Carbon Prices in the Electric Power Sector, 2017 <https://www.rff.org/publications/reports/hedging-an-uncertain-future-internal-carbon-prices-in-the-electric-power-sector/> (дата обращения 10.03.2023)

18. Ma, J., & Kuo (2021). Environmental self-regulation for sustainable development: Can internal carbon pricing enhance financial performance? *Business Strategy and the Environment*, 1–11 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2817>

19. Byrd, John W. and Cooperman, Elizabeth S. and Hickman, Kent (2021). Capital Budgeting and Climate Change: Does Corporate Internal Carbon Pricing Reduce CO2 Emissions. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3575769>

20. Gorbach, O.G.; Hussein, N.S.; Thomsen, J. (2021). Impact of Internal Carbon Prices on the Energy System of an Organisation's Facilities in Germany, Japan and the United Kingdom Compared to Potential External Carbon Prices. *Energies* 2021, 14, 4094. <https://doi.org/10.3390/en14144094>

21. Marubeni Corp. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://marubeni.disclosure.site/en/themes/15/> (дата обращения 01.06.2023)

22. The Tokyo Electric Power Company holdings, Inc. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/about/esg/cdp-e.html> (дата обращения 01.06.2023)

23. KEPCO. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/ntcob/list.do?boardCd=BRD_000529&menuCd=EN040309 (дата обращения 01.06.2023)

24. American Electric Ppower. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.aepsustainability.com/performance/docs/2021CDPClimateSurvey.pdf> (дата обращения 01.06.2023)

25. ENDESA. Statement of Non-Financial Information and Sustainability, 2021. URL: <https://www.endesa.com/content/dam/enel-es/endesa-en/home/investors/financialinformation/financialresults/documents/2021/fy/statement-of-non-financial-information-and-sustainability-2021.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)

26. Iberdrola SA. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.iberdrola.com/documents/20125/41506/CDP_Climate_Change21.pdf (дата обращения 01.06.2023)

27. Siemens AG. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:35401bd8-3e5e-417a-9932-0dfd2effbf43/cdp-climate-change21.pdf> (дата обращения 01.06.2023)

28. SSE. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.sse.com/media/v30az4pi/sse_cdp_climate_change_questionnaire_2021_final_submission.pdf (дата обращения 01.06.2023)
29. Centrica. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.centrica.com/media/5205/cdp-climate-response-2021.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
30. Eni. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.eni.com/assets/documents/eng/just-transition/2021/Eni-SpA-CDP-Climate-Change-Questionnaire-2021-submitted.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
31. ENEL. Sustainability report, 2021. URL: https://www.enel.com/content/dam/enel-com/documenti/investitori/sostenibilita/2021/sustainability-report_2021.pdf (дата обращения - 15.03.2023)
32. Fortum. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: https://www.fortum.com/sites/default/files/documents/fortum_cdp_climate_change_response_2021.pdf (дата обращения - 15.03.2023)
33. Uniper SE. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.uniper.energy/sites/default/files/2022-10/CDPClimateChangeResponseUniperSE2022.pdf> (дата обращения 01.06.2023)
34. E.ON. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 <https://www.eon.com/en/about-us/sustainability/reporting.html> (дата обращения 01.06.2023)
35. EDF. Universal registration document, 2021 URL: <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2022-03/edf-2021-universal-registration-document.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)
36. Engie SA. Climate notebook, 2021 URL: <https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/CahierClimat-Engie2021-ENG-v6-BD.pdf> (дата обращения - 15.03.2023)
37. Norsk Hydro. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20CDP%20answers%202020.pdf?docId=576632> (дата обращения 01.06.2023)
38. American Electric Power Company. CDP Climate Change Questionnaire, 2021 URL: <https://www.aepsustainability.com/performance/docs/2021CDPClimateSurvey.pdf> (дата обращения 10.03.2023)
39. Largest electric power companies. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/4846> (accessed 20.03.2023)
40. Unipro. Annual Report, 2021 URL: https://unipro.energy/shareholders/disclosure/annual_reports/ (Accessed 03/10/2023)
41. Inter RAO. Annual report, 2021 URL: https://iraogeneration.ru/information/go_reports/ (Accessed 03/10/2023)
42. RusHydro. Sustainability Report. 2021 URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/b16/Godovoj-otchet-2021.pdf> (Accessed 03/10/2023)
43. EIS-Energo. Annual report, 2021 URL: <https://www.e15-energo.ru/investors/information-disclosure/> (Accessed 03/10/2023)
44. Gazprom Energoholding. Sustainability Report, 2021 URL: <https://energoholding.gazprom.ru/ecology/> (Accessed 03/15/2023)
- 45 En+ Group. Building a Low Carbon Future: En+ Group on the Path to Carbon Neutrality, 2021 (Accessed 03/15/2023) URL: https://enplusgroup.com/upload/iblock/05c/46cr5fyd7b2nqp7c7u2w1cqfc5chpgpe/En_-Progress-to-net-zero.pdf (Accessed 03/15/2023)
46. Chirkova I.G., Berezhnoy K.M. Analysis of employment in the energy sector of the region's economy // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2022. Vol. 14. No. 2 (54). pp. 134-141
47. Ecological projects of SGK LLC URL: <https://sibgenco.ru/main/ecology/projects/> (accessed 10.03.2023)
48. Rushydro. Sustainability Report, 2015. URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/960/KSO-2015.pdf> (Accessed 03/10/2023)
49. Rosatom. Sustainability Progress Report, 2021. URL: <https://www.report.rosatom.ru/2033> (Accessed 03/15/2023)
50. AEP. Powering forward to net-zero. A TCFD report American electric power, 2021 URL: <https://aepsustainability.com/performance/docs/FINAL%202022%20TCFD%20Report.pdf> (Accessed 03/15/2023)

© *Ивашкин Д.С., Чиркова И.Г.*

51. Electronic resource: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?time=2021>

Author of publication:

Denis Ivashkin — PhD student, Novosibirsk State Technical University.

Irina G. Chirkova - Associate Professor of the Department «Industrial Management and Energy Economics», Novosibirsk State Technical University.

Шифр научной специальности: 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика

Получено *10.05.2023г.*

Отредактировано *24.05.2023г.*

Принято *29.05.2023г.*

Сдано в набор 15.06.2023 г
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 45 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 14,62
Заказ №
Дата выхода в свет

Формат 60x90/8.
Уч.изд. л. 12,75.
Цена свободная