

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(25) 6 / 2023

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года
Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

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

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

РИНЦ:

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи , информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.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
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО "ФОЛИАНТ"
Адрес типографии:	420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2023
Т.25, № 6
Ноябрь – Декабрь
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.
АРАКЕЛЯН Э.К.
БОРУШ О.В.
БОЧКАРЕВ И.В.
БРЯКИН И.В.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ГОЛЕНИЦЕВ-КУТУЗОВ А.В.
ГРАЧЕВА Е.И.
ДМИТРИЕВ А.В.
ДОВГУН В.П.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ИВШИН И.В.
КАЛАЙДА М.Л.
КАСИМОВ В.А.

КОРНИЛОВ В.Ю.
ЛАПТЕВ А.Г.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
НИКОЛАЕВА Л.А.
ПЕТРОВ Т.И.
САФИН А.Р.
СУСЛОВ К.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ЯКИМОВ Н.Д.
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAEL

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV
Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA
Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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.

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS, PRODUCTS,
SUBSTANCES AND PROPANE MEDIA
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
ECOLOGICAL SAFETY

Editorial board:

AKHMETOVA IRINA	IVSHIN IGOR	YAKIMOV NIKOLAY
ARAKELYAN EDIK	KALAJDA MARINA	KOLCUN MICHAIL
BORUSH OLESYA	KASIMOV VASIL	ILIYA K. ILIEV
BOCHKAREV IGOR	KORNILOV VLADIMIR	ION V. ION
BRYAKIN IGOR	LAPTEV ANATOLY	PENTIUC RADU DUMITRU
VANKOV YURY	MESHCHERYAKOV VIKTOR	STANIMIR VALTCHEV
GRACHEVA ELENA	MINGALEEVA GUZEL	
VAFIN DANIL	NIKOLAEVA LARISA	
GOLENISHCHEV-KUTUZOV ALEXANDER	SUSLOV KONSTANTIN	
DMITRIEV ANDREY	SAFIN ALFRED	
DOVGUN VALERY	SHCHINNIKOV PAVEL	
ZVEREVA ELVIRA	FEDOTOV ALEXANDER	

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation
Tel./fax: +7 (843) 527-92-76
Printing House: LLC «FOLIANT»
**Address of the printing
house** 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
Email: problems_ener@mail.ru
Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

БУЛАТОВ Ю.Н., КРЮКОВ А.В., СУСЛОВ К.В., КИЖИН В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии	3
ЛАНСБЕРГ А.А., ВИНОГРАДОВ А.В., ПАНФИЛОВ А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в Matlab Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания	14
ЛЕВИН В.М., ГУЖОВ Н.П., БОЯРОВА Д.А. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании	29

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ГОРИНОВ Ю.А., АНИСИМОВ П.Н., ЕГОШИН Е.В. Модернизация городских индивидуальных тепловых пунктов	43
---	----

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЯКИМОВ Н.Д., ШАГЕЕВ А.Ф., ДМИТРИЕВ А.В., БАДРЕТДИНОВА Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве	54
КОНДРАШОВ А.В., ТРИНЧЕНКО А.А. Система утилизации теплоты конденсации тепловых машин	67

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Улучшение эксплуатационных характеристик электротехнических комплексов морских судов	78
СОЛУЯНОВ В.И., СОЛУЯНОВ Ю.И., ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТШИН А.Р. Разработка изменений в строительный свод правил в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов	89

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

КАЛАЙДА М.Л., САЕТОВ А.Р., ХАМИТОВА М.Ф. Исследование особенностей гидрохимических характеристик и развития зоопланктона в районе размещения рыбозащитного сооружения типа водовоздушная завеса в водоеме-охладителе ГРЭС	101
---	-----

CONTENTS

ELECTRICITY

- BULATOV YU.N., KRYUKOV A.V., SUSLOV K.V., KIZHIN V.V.** Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality 3
- LANSBERG A.A., VINOGRADOV A.V., PANFILOV A.A.** Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in matlab simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit 14
- LEVIN V.M., GUZHOV N.P., BOYAROVA D.A.** Risk-based approach to choosing the production asset management strategy for energy company 29

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- GORINOV YU.A., ANISIMOV P.N., EGOSHIN E.V.** Modernization of local heat distribution stations of city heat supply system 43

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

- YAKIMOV N.D., SHAGEEV A.F., DMITRIEV A.V., BADRETDINOVA G.R.** Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating 54
- KONDRASHOV A.V., TRINCHENKO A.A.** Condensation heat recycling system for heat engines 67

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- SAVENKO A.E., SAVENKO P.S.** Improving the operational characteristics of electrical power systems of marine vessels 78
- SOLUYANOV V.I., SOLUYANOV YU.I., FEDOTOV A.I., AKHMETSHIN A.R.** Development of changes to the construction code of rules in part of updated specific electrical loads 89

ENVIRONMENTAL SAFETY

- KALAJDA M.L., SAETOV A.R., KHAMITOVA M.F.** Study of the features of hydrochemical characteristics and development of zooplankton in the area of water-air curtain type fish protection structure in the cooling reservoir of the SDPP 101

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И УСТАНОВКОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ПРОГНОСТИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОНИЖЕННЫМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Булатов¹ Ю.Н., Крюков^{2,3} А.В., Суслов^{2,4} К.В., Кижин¹ В.В.

¹Братский государственный университет, г. Братск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

dr.souslov@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование влияния согласованного управления накопителями электроэнергии и установками распределенной генерации на режимы работы сетевого кластера, представляющего собой распределительную электрическую сеть, подключенную к системе электроснабжения железной дороги переменного тока через вставку постоянного тока (ВИП). *МЕТОДЫ.* Исследования проводились на имитационной модели, реализованной в системе MATLAB. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассматривались следующие возмущающие воздействия: отключение на время 0,5 секунд основного питания сетевого кластера со стороны ВИП; трехфазное КЗ с длительностью в 0,5 с в конце кабельной линии 6 кВ протяженностью в два километра. Результаты моделирования показали эффективность согласованного управления накопителями электроэнергии и турбогенератором с самонастраивающимися прогностическими регуляторами. На этой основе снижаются величины перерегулирования частоты вращения ротора, и уменьшается время переходного процесса для всех параметров в различных режимах. Например, время переходного процесса для скорости ротора генератора в режиме подключения дополнительной нагрузки снижается в три раза, а для напряжения – в два раза. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** На основе компьютерного моделирования показано, что согласованное управление накопителями электроэнергии и турбогенератором с прогностическими регуляторами снижает практически до нуля величину перерегулирования скорости ротора и почти на 90 % уменьшает время переходного процесса. Целесообразно проведение дальнейших исследований по применению метода согласованного управления активными элементами, используемыми в системе электроснабжения для регулирования параметров режима.

Ключевые слова: *сетевые кластеры; качество электроэнергии; установки распределенной генерации; прогностические регуляторы; вставка постоянного тока; накопители электроэнергии; моделирование.*

Для цитирования: Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13.

COORDINATED MANAGEMENT OF ELECTRICITY STORAGE AND DISTRIBUTED GENERATION PLANT WITH PREDICTIVE CONTROLLERS IN A POWER SUPPLY SYSTEM WITH REDUCED ELECTRICITY QUALITY

Bulatov¹ Yu.N., Kryukov^{2,3} A.V., Suslov^{3,4} K.V., Kizhin¹ V.V.

¹Bratsk State University, Bratsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁴ National Research University "MEI", Moscow, Russia

dr.souslov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* A study of the influence of coordinated control of electricity storage devices and distributed generation installations on the operating modes of a network cluster, which is an electrical distribution network connected to the AC railway power supply system through a direct current insert (DCI). *METHODS.* The studies were carried out using a simulation model implemented in the MATLAB system. *RESULTS.* The following disturbing influences were considered: turning off the main power supply of the network cluster from the DCI side for 0.5 seconds; three-phase short circuit with a duration of 0.5 s at the end of a 6 kV cable line with a length of two kilometers. The simulation results showed the effectiveness of coordinated control of electricity storage devices and a turbogenerator with self-adjusting predictive controllers. On this basis, the values of overshoot of the rotor speed are reduced and the transient process time is reduced for all parameters in various modes. For example, the transient time for the generator rotor speed in the mode of connecting an additional load is reduced by three times, and for voltage - by two times. *CONCLUSION.* Based on computer modeling, it is shown that coordinated control of electricity storage devices and a turbogenerator with predictive regulators reduces the amount of rotor speed overshoot to almost zero and reduces the transient process time by almost 90%. It is advisable to conduct further research on the application of the method of coordinated control of active elements used in the power supply system to regulate the mode parameters.

Keywords: network clusters; power quality; distributed generation plants; predictive controllers; DC insertion; electricity storage devices; modeling.

For citation: Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Kizhin V.V. Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

В системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей, обслуживающих электрифицированные железные дороги, существует проблема обеспечения качества электроэнергии, особенно в части показателей несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения. Для развития таких СЭС, повышения их надежности и обеспечения возможности функционирования при тяжелых авариях в питающей сети могут применяться накопители электроэнергии (НЭ) [1–3] и установки распределённой генерации (РГ) [4–6]. Часть этих установок может работать на возобновляемых источниках энергии [7, 8]. В результате использования такого подхода возможно улучшение качества электроэнергии [9, 10]. В островных режимах работы [11] СЭС с установками РГ необходимо учитывать ограничения по балансу мощности и динамическое влияние на генерирующие установки двигательной нагрузки [12, 13]. Снизить колебания регулируемых параметров в таких режимах СЭС можно путем применения НЭ большой мощности [14] и современных технологий управления установками распределенной генерации [15–18]. Представленные в [19, 20] результаты показали высокую эффективность управления СЭС с РГ с помощью системы нечеткого логического вывода и прогностических алгоритмов.

Исследования, представленные в работах [21, 22], показали эффективность использования накопителей электроэнергии для регулирования режимов работы электроэнергетической системы. Применение НЭ в виде аккумуляторных батарей большой мощности в СЭС возможно для сглаживания колебаний мощности от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [23], снижения ее колебаний в сети [24], управления перетоками в сети [25], а также для целей противоаварийного управления [26]. Накопители электроэнергии могут применяться для оптимизации совместной работы с дизель-генераторной [27], газо-поршневой [28] установками в составе изолированной СЭС.

Ниже представлены результаты исследований режимов работы системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД) с двигательной нагрузкой в трехфазной СЭС 6 кВ, питающей нетяговых потребителей. Изучалось влияние предлагаемого метода регулирования установок РГ и накопителей электроэнергии на режимы сетевого кластера, представляющего собой распределительную электрическую сеть, подключенную к СЭЖД через вставку постоянного тока (ВПТ) [29, 30]. Моделирование выполнялось в системе MATLAB. Цель исследования заключалась в определении влияния согласованного

управления накопителями электроэнергии и установками РГ с прогностическими регуляторами [31] на режимы работы сетевого кластера.

Научная значимость проведенного исследования состоит в получении новых результатов, позволяющих анализировать сложные процессы, протекающие в СЭС с пониженным качеством электроэнергии, оснащенных установками РГ и накопителями. Практическая значимость заключается в том, что разработанные имитационные модели и результаты моделирования могут использоваться при разработке мероприятий по повышению надежности и улучшению качества процессов управления в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта, а также в СЭС других отраслей при наличии проблем с качеством электроэнергии.

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование выполнялось для схемы СЭЖД с сетевым кластером 6 кВ, представленной на рисунке 1. Основное питание поступает от тяговой подстанции 110/27,5/6 кВ. Особенностью схемы является использование вставки постоянного тока для улучшения качества электроэнергии в СЭС с установками РГ, НЭ и двигательной нагрузкой. В качестве РГ использовались: турбогенераторная установка (ТГУ) мощностью 3,125 МВА с самонастраивающимися прогностическими автоматическими регуляторами возбуждения (СПАРВ) и частоты вращения (СПАРЧВ) ротора [31] и солнечная электростанция мощностью 1 МВт. Максимальная мощность двигательной нагрузки в СЭС составляла 1 МВт.

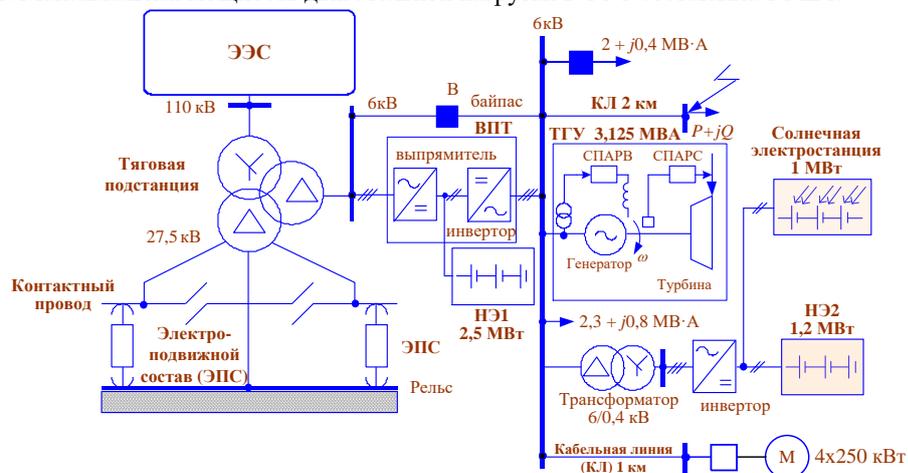


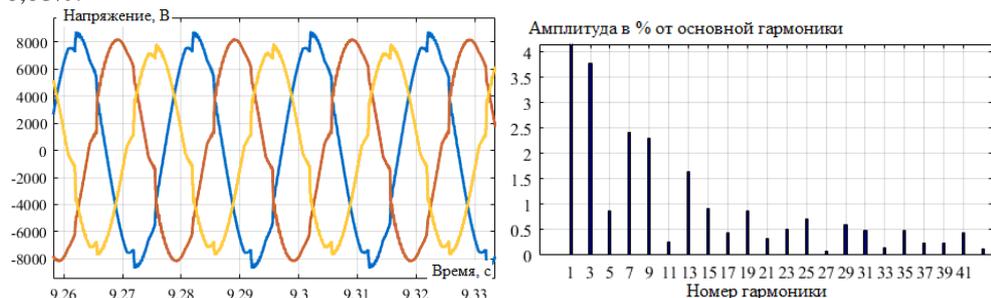
Рис. 1. Схема исследуемой СЭЖД

Fig. 1. Scheme of the railway power supply system under study

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В исследуемой СЭЖД применялся метод согласованной настройки [17], а также прогностические регуляторы [31]. Моделировались следующие процессы: переход сетевого кластера в островной режим; кратковременное трехфазное короткое замыкание (КЗ) в сети 6 кВ; подключение дополнительной нагрузки.

Форма напряжения и состав гармоник на шинах 6 кВ сетевого кластера показаны на рисунке 2 в режимах подключения через байпас и ВПП. Анализ проводился с помощью программы FFT Tool системы MATLAB. При подключении СЭС через байпас заметно ухудшается качество электроэнергии по гармоническим искажениям с преобладанием нечетных гармоник. Кроме того, наблюдается несимметрия питающего напряжения: $K_{2U} = 5,8\%$. Применение ВПП позволяет решить проблему с качеством электроэнергии. Результаты моделирования такого режима показаны на рис. 2 б; в этом случае коэффициенты гармоник $K_{U(n)}$ уменьшаются до долей процентов, а K_{2U} снижается до 0,08%.



а)

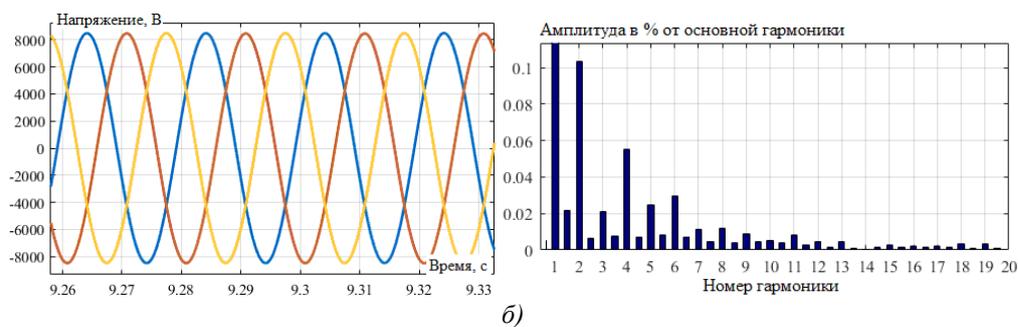


Рис. 2. Форма напряжения и состав гармоник на шинах 6 кВ СЭС. а) при подключении СЭС через байпас б) подключение кластера через ВПТ

Fig.2. Voltage shape and harmonic composition on 6 kV buses of the power supply system a) when connecting the power supply system via bypass, b) when connecting the cluster via a DC insert

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ниже представлены результаты моделирования различных режимов при подключении исследуемой СЭС через ВПТ.

Результаты (Results)

Выполнено моделирование следующих режимов:

- временное отключение (на время 0,5 с) основного питания сетевого кластера со стороны ВПТ;
- кратковременное (длительностью 0,5 с) трехфазное КЗ в конце кабельной линии 6 кВ длиной два километра.

В данных режимах НЭ были подключены постоянно или вводились в работу при снижении напряжения.

Результаты моделирования отключения основного питания представлены на рисунках 3–6.

Анализ представленных на этих рисунках временных зависимостей позволяет сделать вывод об эффективности применения прогностических регуляторов ТГУ и накопителей электроэнергии для уменьшения провалов напряжения и частоты. Совместное использование СПАРВ, СПАРЧВ и НЭ обеспечивает лучшие параметры качества регулирования в переходных процессах: практически отсутствует колебательность, провалы, перерегулирование напряжения, частоты и скорости ротора двигателя. Таким образом, обеспечивается стабильность всех регулируемых параметров.

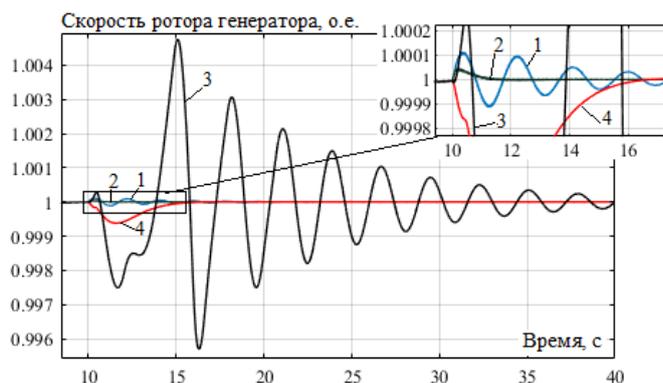


Рис. 3. Скорость вращения ротора генератора при отключении основного питания: 1 – использовались НЭ и регуляторы без прогнозирующего звена (ПЗ); 2 – использовались НЭ, СПАРВ и СПАРЧВ; 3 – без НЭ и регуляторы без ПЗ; 4 – без НЭ и с использованием СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 3. Generator rotor rotation speed when main power is turned off: 1 – electricity storage devices (ESD) and regulators without a predictive link (PL) were used; 2 – ESD and self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers were used; 3 – without ESD and regulators without PL; 4 – without ESD and using self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

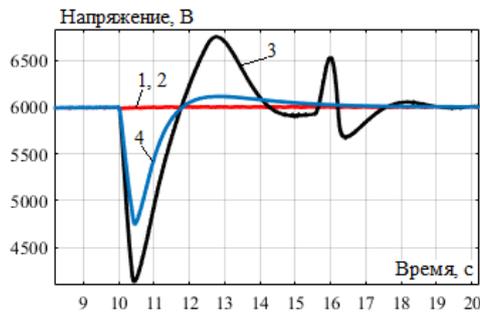


Рис. 4. Напряжение турбогенератора при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

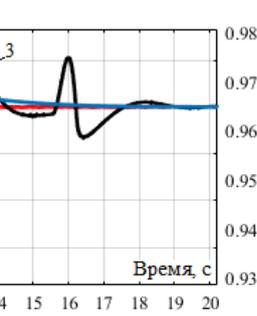


Fig. 4. Turbogenerator voltage when main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3



Рис. 5. Изменение скорости ротора двигателя при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

Fig. 5. Changing the motor rotor speed when the main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

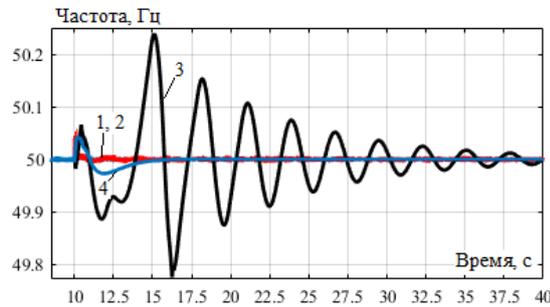


Рис.6. Изменение частоты в сети при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

Fig.6. Changing the frequency in the network when the main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование СПАРВ и СПАРЧВ обеспечивает быструю стабилизацию напряжения и частоты в переходных процессах и приемлемое качество регулирования этих параметров даже без применения накопителей электроэнергии. Значения показателей качества регулирования напряжения и частоты при отключенных НЭ в сравнении с различными типами регуляторов представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Сравнение показателей качества регулирования обычных и прогностических АРВ и АРЧВ при отключении основного питания
Comparison of control quality indicators for conventional and predictive ARVs and ARVs when the main power is turned off

Параметр, определяющий качество регулирования	Тип регуляторов		Улучшение показателя, %
	АРВ и АРЧВ без ПЗ	СПАРВ и СПАРЧВ	
Время переходного процесса скорости ротора турбогенератора, с	35	5	85,7
Перерегулирование скорости ротора турбогенератора σ , %	0,5	0	100
Степень затухания колебаний скорости ротора турбогенератора μ , о.е.	0,4	1	60
Время переходного процесса напряжения турбогенератора, с	9	5	44,4
Перерегулирование напряжения турбогенератора σ , %	12,5	2,5	80
Степень затухания колебаний напряжения турбогенератора μ , о.е.	0,04	1	96

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Примечание: $\sigma = \frac{h_{\max 1} - h}{h} \cdot 100$, %; $\mu = 1 - \frac{h_{\max 2}}{h_{\max 1}}$, где $h_{\max 1}$ – амплитуда первого колебания; $h_{\max 2}$ – амплитуда второго колебания; h – установившееся значение регулируемой величины.

На рисунках 7–10 представлены результаты моделирования удаленного трехфазного КЗ и его отключения через 0,5 с.

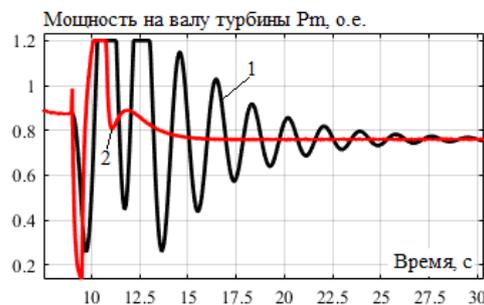


Рис. 7. Механическая мощность на валу турбогенератора при кратковременном КЗ: 1 – регуляторы без прогнозирующего звена; 2 – СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 7. Mechanical power on the turbogenerator shaft during a short-term short circuit: 1 – regulators without a predictive link; 2 – self-adjusting predictive automatic excitation and speed controllers

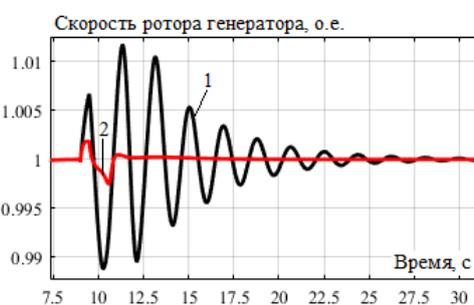


Рис. 8. Скорость вращения ротора генератора при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 8. Generator rotor rotation speed during short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

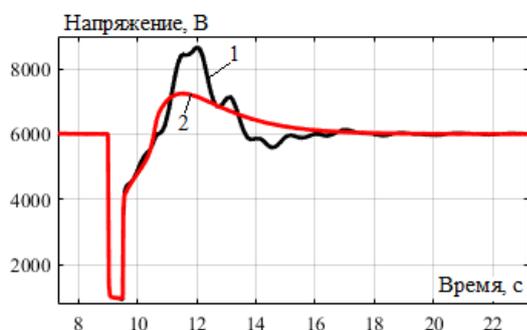


Рис. 9. Напряжение турбогенератора при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 9. Turbogenerator voltage during short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

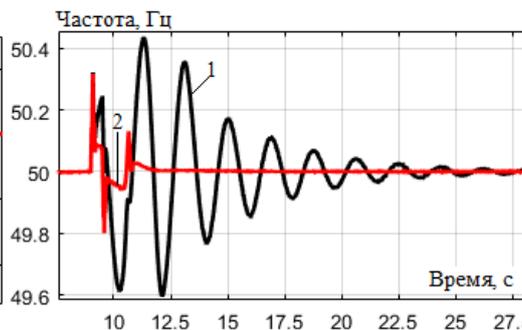


Рис.10. Изменение частоты в сети при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 10. Change in frequency in the network during a short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Применение СПАРВ и СПАРЧВ совместно с НЭ обеспечивает быстрое демпфирование колебаний напряжения, частоты и мощности в СЭС. Таким образом, СПАРВ и СПАРЧВ позволяют обеспечить плавное регулирование и стабилизацию всех параметров рассматриваемой СЭС при кратковременном КЗ. Значения показателей качества регулирования для рассматриваемых параметров в режиме КЗ с постоянно включенными НЭ представлены в таблице 2.

Кроме того, моделировался режим подключения дополнительной мощной нагрузки. Результаты приведены на рисунках 11 и 12, откуда видно, что использование СПАРВ и СПАРЧВ обеспечивает отсутствие перерегулирования и колебательности напряжения и скорости ротора генератора; при этом значительно снижается время переходного процесса: для скорости ротора генератора в три раза (рис.11, характеристики 1 и 2); для напряжения – в два раза (рис. 12, характеристики 1 и 2). Применение НЭ позволяет разгрузить турбогенератор и дополнительно снизить провал напряжения.

Таблица 2
Table 2

Сравнение показателей качества регулирования обычных и прогностических АРВ и АРЧВ после отключения КЗ

Comparison of the quality indicators of regulation of conventional and predictive ARVs and ARVVs after switching off the short circuit

Параметр, определяющий качество регулирования	Тип регуляторов		Улучшение показателя, %
	АРВ и АРЧВ без ПЗ	СПАРВ и СПАРЧВ	
Время переходного процесса скорости ротора турбогенератора, с	16	2	87,5
Перерегулирование скорости ротора турбогенератора σ , %	1,2	0	100
Степень затухания колебаний скорости ротора турбогенератора μ , о.е.	0,16	1	84
Время переходного процесса напряжения турбогенератора, с	7,5	6,5	13,3
Перерегулирование напряжения турбогенератора σ , %	41,7	16,6	60,2
Степень затухания колебаний напряжения турбогенератора μ , о.е.	0,6	1	40

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис.11. Скорость ротора генератора в режиме подключения дополнительной нагрузки: 1 – без использования НЭ и регуляторы без ПЗ; 2 – без НЭ и с использованием СПАРВ и СПАРЧВ; 3 – использовались НЭ, СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 11. Generator rotor speed when connecting additional load: 1 – without the use of energy storage devices (ESD) and regulators without a predictive link; 2 – without ESD and using self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers; 3 – ESD and self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers were used

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

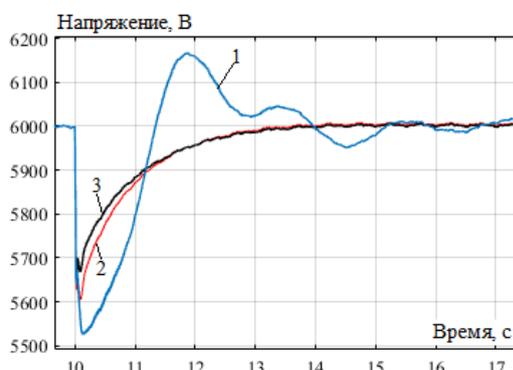


Рис. 12. Напряжение турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: обозначения соответствуют рис.11

Fig. 12. Turbogenerator voltage when connecting an additional load: designations correspond to Fig. 11

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

Результаты имитационного моделирования рассмотренных переходных режимов в исследуемой СЭС позволяют сделать следующие выводы:

1. Постоянно подключенные накопители электроэнергии практически до нуля уменьшают глубину провала напряжения при переходе сетевого кластера в островной режим.
2. Самонастраивающиеся прогностические регуляторы турбогенераторной установки уменьшают глубину провала напряжения, снижают время переходного процесса и величины перерегулирования параметров режима СЭС.
3. Согласованное управление накопителями электроэнергии и турбогенератором с прогностическими регуляторами уменьшает практически до нуля величину перерегулирования и существенно снижает время переходного процесса регулируемых параметров при возмущениях в сетевом кластере.
4. Принимая во внимание полученные результаты, целесообразно проведение дальнейших исследований по применению метода согласованного управления активными элементами, используемыми в системе электроснабжения для регулирования параметров режима.

Литература

1. Ефремов Д.Г., Глушкин И.З. Повышение динамической устойчивости электростанции с помощью накопителей энергии. *Электричество*. 2016. № 12. С. 20-27.
2. P. Lombardi, Z. A. Styczynski, T. Sokolnikova and K. Suslov, "Use of energy storage in isolated micro grids", *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, pp. 1-6.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Сулов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021; 23(5): 184-194.
4. Илюшин П.В. О свойствах энергоустановок с газопоршневыми двигателями // *Электрические станции*. 2009. № 11. С. 42-46.
5. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // *Appl. Therm. Eng.* 2002. Vol. 22. No. 18. pp. 2003–2014.
6. Albert H. Schrottenboer, Arjen A.T. Veenstra, Michiel A.J. uit het Broek, Evrim Ursavas, A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 2022, 112744, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112744>
7. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. – 223 p.
8. Samoilenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level, *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. pp. 70–75. <https://doi.org/10.24084/repqj18.225>
9. Sikorski T., Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks // *Power Quality Issues in Distributed Generation*, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>
10. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // *Proceed. of 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>
11. Lopes, J.A. Defining control strategies for microgrids islanded operation / J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira // *IEEE Trans. Power Syst.* 2006. Vol. 21. No. 2. pp. 916-924.
12. Илюшин П.В., Гуревич Ю.Е. О специальном воздействии на систему возбуждения автономно работающих генераторов при больших набросах нагрузки // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2016. № 2. С. 2-7.
13. Илюшин П.В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // *Релейная защита и автоматизация*. 2015. № 3 (20). С. 24-29.
14. Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // *Релейная защита и автоматизация*. 2019. № 4 (37). С. 26-33.
15. Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022; 24(4):105-115. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115>

16. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer. 2018. – 218 p.
17. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Х. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1 (150). С. 112-122.
18. Piyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1295. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_11
19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2014; № 7-8. С. 60-69.
20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование газотурбинной установки с прогностическими регуляторами напряжения и скорости. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020; 22(3): 60-67.
21. Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 38–43.
22. Илюшин П.В., Березовский П.К. Анализ международного опыта формирования условий для эффективного применения систем накопления электроэнергии в управлении режимами // Энергетик. 2019. № 11. С. 3-8.
23. Masuta T., Gari da Silva J., Fonseca, Ootake H., Murata A. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) // Application of battery energy storage system to power system operation for reduction in pv curtailment based on few-hours-ahead PV forecast. Wollongong. 2016. pp. 1-6.
24. Lee S.J. Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations // IEEE Transactions on Smart Grid, May 2016. pp. 1713-1722.
25. Reihani E., Sepasi S., Roose L.R., Matsuura M. Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS) // Electrical Power and Energy Systems, No. 77, 2016. pp. 337-344.
26. Ефремов Д.Г., Глушкин И.З. Повышение динамической устойчивости генератора с помощью управления группой накопителей энергии различного вида. // Вестник ИГЭУ, No 6, 2017. С. 5-14.
27. Зырянов В.М., Кучак С.В., Бачурин П.А., Харитонов С.А. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы // Промышленная энергетика. 2018. № 10. С. 2-10.
28. Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М., Пранкевич Г.А., Кучак С.В., Нестеренко Г.Б., Лебедев Д.Е., Решетников А.Н. и др. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10- 1200-400 при совместной работе с ПГУ в составе экспериментальной энергосистемы + Testing of industrial design energy storage system (ESS-101200-400) and gas piston units in experimental power system // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2 (59). С. 18-24.
29. M. S. S. Danish, H. Matayoshi, H. R. Howlader, S. Chakraborty, P. Mandal and T. Senjuu, "Microgrid Planning and Design: Resilience to Sustainability," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 253-258, <https://doi.org/10.1109/GTDAsia.2019.8716010>
30. S. M. Ferdous, F. Shahnian and G. M. Shafiullah, "Stability and robustness of a coupled microgrid cluster formed by various coupling structures," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 60-77, Dec. 2021, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000038>
31. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Прогностическое управление турбогенераторной установкой на основе самонастраивающихся регуляторов. Энергетик. 2023. № 7. С. 9-13.

Авторы публикации

Булатов Юрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики Братского государственного университета.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Кижин Вадим Владиславович – аспирант, ассистент кафедры энергетики Братского государственного университета.

References

1. Efremov D.G., Gluskin I.Z. Povyshenie dinamicheskoi ustoychivosti elektrostantsii s pomoshch'yu nakopitelei energii. *Elektrichestvo*. 2016. № 12. S. 20-27.
2. P. Lombardi, Z. A. Styczynski, T. Sokolnikova and K. Suslov, "Use of energy storage in isolated micro grids", *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, pp. 1-6.
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Issledovanie rezhimov raboty izolirovannoi sistemy elektrosnabzheniya s upravlyaemymi ustanovkami raspredelennoi generatsii, nakopitelyami elektroenergii i dvigatel'noi nagruzkoj // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021; 23(5): 184-194.
4. Pyushin P.V. O svoystvakh energoustanovok s gazoporshnevymi dvigatelyami // *Elektricheskiye stantsii*. 2009. № 11. S. 42-46.
5. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // *Appl. Therm. Eng.* 2002. Vol. 22. No. 18. P. 2003–2014.
6. Albert H. Schrottenboer, Arjen A.T. Veenstra, Michiel A.J. uit het Broek, Evrim Ursavas, A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 2022, 112744, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112744>
7. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. – 223 p.
8. Samoylenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. P. 70–75. <https://doi.org/10.24084/repqj18.225>
9. Sikorski T., Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks // *Power Quality Issues in Distributed Generation*, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>
10. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // *Proceed. of 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>
11. Lopes, J.A. Defining control strategies for microgrids islanded operation / J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira // *IEEE Trans. Power Syst.* - 2006. -Vol. 21. - № 2. - pp. 916-924.
12. Ilyushin P.V., Gurevich Yu.E. O spetsial'nom vozdeystvii na sistemu vobuzhdeniya avtonomno rabotayushchikh generatorov pri bol'shikh nabrosakh nagruzki // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*. 2016. № 2. S. 2-7.
13. Ilyushin P.V. Analiz obosnovannosti ustavok ustroystv RZA generiruyushchikh ustanovok s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya na ob'yektakh raspredelennoy generatsii // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2015. № 3 (20). S. 24-29.
14. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berezovsky P.K. Effektivnoye ispol'zovaniye nakopiteley elektricheskoy energii dlya predotvrashcheniya otklyucheniy ob'yektov raspredelennoy generatsii pri kratkovremennykh otkloneniyakh chastoty // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2019. № 4 (37). S. 26-33.
15. Savenko A.E., Savenko P.S. Ispol'zovanie i sovershenstvovanie avtomaticheskikh sistem dlya upravleniya rassredotochennymi istochnikami elektroenergii v lokal'nykh elektricheskikh sistemakh // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2022; 24(4):105-115. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115>
16. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer. 2018. – P. 218
17. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Kh. Koordinatsiya nastroek avtomaticheskikh regulyatorov paroturbinnoi ustanovki raspredelennoi generatsii // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. T. 24. № 1 (150). S. 112-122.
18. Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1295. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_11
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Nechetkie regulatory dlya vetrogeneriruyushchikh ustanovok // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2014; № 7-8. S. 60-69.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Modelirovanie gazoturbinnoi ustanovki s prognosticheskimi regulyatorami napryazheniya i skorosti // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020; 22(3): 60-67.
21. Kulikov Yu.A. Kulikov YU.A. Nakopiteli elektroenergii - effektivnyy instrument upravleniya rezhimami elektroenergeticheskikh sistem / *Elektroenergetika glazami molodezhi* – 2018: materialy 9 mezhdunar. molodezh. nauch.-tekhn. konf., Kazan', 1–5 okt. 2018 g. V 3 t. – Kazan': Kazan. gos. energet. un-t, 2018. – T. 1. – S. 38–43.

22. Ilyushin P.V., Berezovsky P.K. Analiz mezhdunarodnogo opyta formirovaniya usloviy dlya effektivnogo primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii v upravlenii rezhimami // Energetik. 2019. № 11. S. 3-8.
23. Masuta T., Gari da Silva J., Fonseca, Ootake H., Murata A. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) // Application of battery energy storage system to power system operation for reduction in pv curtailment based on few-hours-ahead PV forecast. Wollongong. 2016. pp. 1-6.
24. Lee S.J. Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations // IEEE Transactions on Smart Grid, May 2016. pp. 1713-1722.
25. Reihani E., Sepasi S., Roose L.R., Matsuura M. Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS) // Electrical Power and Energy Systems, No. 77, 2016. pp. 337-344.
26. Efremov D.G., Gluskin I.Z. Povysheniye dinamicheskoy ustoychivosti generatora s pomoshch'yu upravleniya gruppoy nakopiteley energii razlichnogo vida // Vestnik IGEU, No 6, 2017. S. 5-14.
27. Zyryanov V.M., Kuchak S.V., Bachurin P.A., Kharitonov S.A. Eksperimental'nyye issledovaniya i ispytaniya sovmestnoy raboty sistemy nakopleniya energii i DGU v sostave avtonomnoy energosistemy // Promyshlennaya energetika. 2018. № 10. S. 2-10.
28. Bachurin P.A., Gladkov D.S., Zyryanov V.M., Prankevich G.A., Kuchak S.V., Nesterenko G.B., Lebedev D.E., Reshetnikov A.N. and others. Ispytaniya promyshlennogo obraztsa sistemy nakopleniya energii SNE-10- 1200-400 pri sovmestnoy rabote s GPU v sostave eksperimental'noy energosistemy + Testing of industrial design energy storage system (ESS-101200-400) and gas piston units in experimental power system // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2020. № 2 (59). S. 18-24.
29. M. S. S. Danish, H. Matayoshi, H. R. Howlader, S. Chakraborty, P. Mandal and T. Senju, "Microgrid Planning and Design: Resilience to Sustainability," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 253-258, <https://doi.org/10.1109/GTDAsia.2019.8716010>
30. S. M. Ferdous, F. Shahnia and G. M. Shafiullah, "Stability and robustness of a coupled microgrid cluster formed by various coupling structures," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 60-77, Dec. 2021, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000038>
31. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Prognosticheskoe upravlenie turbogeneratornoj ustanovkoi na osnove samonastraivayushchikhsya regulyatorov // Energetik. 2023. № 7. S. 9-13.

Authors of the publication

Yuri N. Bulatov - Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Andrey V. Kryukov - Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Konstantin V. Suslov - National Research University "MEI", Moscow, Russia; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Vadim V. Kizhin –Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено **02.11.2023 г.**

Отредактировано **17.11.2023 г.**

Принято **21.11.2023 г.**



ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ В MATLAB SIMULINK НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Лансберг А.А.¹, Виноградов А.В.^{1,2}, Панфилов А.А.²

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В настоящее время моделирование является одним из наиболее достоверных способов изучения нормальных и аварийных режимов работы электрических сетей. В связи с этим, была разработана математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink. **ЦЕЛЬ.** Оценка достоверности получаемых с помощью моделирования в MATLAB Simulink параметров режимов работы сельской электрической сети 0,4 кВ путем оценки значений тока установившегося однофазного короткого замыкания на разном расстоянии от трансформаторной подстанции. **МЕТОДЫ.** Токи, полученные на разработанной в MATLAB Simulink модели электрической сети 0,4 кВ, были сравнены с токами, полученными с применением других методов расчета (по ГОСТ 28249-93, упрощенному методу петли «фаза-ноль» и математической модели «Проект РЗА»). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Было выявлено, что расхождение результатов в отдельных точках составило 9-11%. При моделировании в MATLAB Simulink режима установившегося однофазного короткого замыкания установлено, что напряжение поврежденной фазы *A* уменьшается до 0 В, при этом напряжения на двух оставшихся неповрежденных фаз увеличиваются в 1,4-1,5 раза, т.е. в $\sqrt{2}$ раз до значений 335-354 В при замыкании на выводах трансформатора и до значений 329-338 В при замыканиях за участком линии электропередачи 0,4 кВ. **ВЫВОДЫ.** Полученная математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink может использоваться для исследования нормальных и аварийных режимов работы, исследования режимов совместной работы возобновляемых источников энергии с централизованной сетью, процессов включения резервных источников генерации.

Ключевые слова: моделирование, электрическая сеть 0,4 кВ, однофазное короткое замыкание, MATLAB Simulink, трансформатор, линия электропередачи, энергосистема, фазное напряжение, соединение обмоток.

Для цитирования: Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в Matlab Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 14-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE 0.4 kV RURAL ELECTRIC NETWORK IN MATLAB SIMULINK ON THE EXAMPLE OF A STUDY OF THE STEADY-STATE MODE OF A SINGLE-PHASE SHORT CIRCUIT

Lansberg ¹A.A., Vinogradov ¹A.V., Panfilov ²A.A.

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Orel State Agrarian University, Orel, Russia

Abstract: *PURPOSE.* Currently, modeling is one of the most reliable ways to study normal and emergency modes of operation of electrical networks. In this regard, a mathematical model of the 0.4 kV rural electric network was developed in the MATLAB Simulink program. **PURPOSE.** Evaluation of the accuracy of the parameters of the operating modes of the 0.4 kV rural electric

network obtained by modeling in MATLAB Simulink by estimating the values of the steady-state single-phase short circuit current at different distances from the transformer substation. **METHODS.** The currents obtained using the 0.4 kV electrical network model developed in MATLAB Simulink were compared with the currents obtained using other calculation methods (according to GOST 28249-93, the simplified phase-zero loop method and the mathematical model «Project RZA»). **RESULTS.** It was revealed that the discrepancy in the results at individual points was 9-11%. When simulating a steady-state single-phase short circuit in MATLAB Simulink, it was found that the voltage of the damaged phase A decreases to 0 V, while the voltages on the two remaining intact phases increase by 1.4-1.5 times, i.e. by a factor of 2 to the values of 335-354 V when short-circuiting at the transformer terminals and to the values of 329-338 V when short-circuiting behind a section of a 0.4 kV power line. **CONCLUSIONS.** The resulting mathematical model of a 0.4 kV rural electric network in the MATLAB Simulink program can be used to study normal and emergency operating modes, study the modes of joint operation of renewable energy sources with a centralized network, and the processes of switching on backup generation sources.

Key words: simulation, 0.4 kV electrical network, single-phase short circuit, MATLAB Simulink, transformer, power line, power system, phase voltage, connection of windings.

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in Matlab Simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 14-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.

Введение (Introduction)

В настоящее время большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых направлено на моделирование электрических сетей, которое является одним из наиболее достоверных способов изучения процессов, происходящих в них. Например, в работе [1] произведено моделирование неисправностей в программном комплексе *MATLAB/Simulink* на примере действующей в Нигерии распределительной сети, питающей от двухтрансформаторной подстанции 132/33 кВ с единичной мощностью трансформатора 30 МВА, с целью оценки её надежности в разных режимах. Автором произведено моделирование симметричных и несимметричных коротких замыканий. Оценено, что при двухфазном коротком замыкании индексы надежности распределительной сети SAIDI и SAIFI составляют, соответственно, 1,125 о.е. и 8 о.е., при трехфазном коротком замыкании – 2,7 о.е. и 4 о.е., а при однофазном замыкании на землю – 3 о.е. и 5 о.е.

Азербайджанскими учеными для участка энергосистемы 110 кВ Азербайджана, состоящей из кольцевой электрической сети с семью подстанциями, была произведена оценка нагрузочных потерь в зависимости от температуры окружающей среды от 25,1°C до 40,9°C, что позволило выявить изменение суммарных потерь исследуемой схемы энергосистемы с 4,4 МВт до 4,67 МВт, т.е. на 6,3% [2].

Коллективом южноамериканских ученых в источнике [3] произведено исследование влияния высших гармоник и несимметрии на работу электродвигателей. На примере электрической машины мощностью 37,3 кВт выявлено, что только ввиду гармоник из-за дополнительных потерь возникает снижение КПД на 2%, а вызванное гармониками искажение качества электроэнергии приводит к снижению КПД на 4%.

Иранскими учеными в источнике [4] в программе *MATLAB/Simulink* произведен анализ качества электроэнергии на примере распределительной сети с частотой 50 Гц, питающейся от энергосистемы напряжением 33 кВ и мощностью 50 МВА по линии протяженностью 33 кВ через трансформатор 33/11 кВ с номинальной мощностью 20 МВА. В работе исследовано влияние на синусоидальную форму кривой напряжения и значение фазных напряжений процессов включения различных типов нагрузок на стороне 11 кВ: рабочей нагрузки, нелинейной и несинусоидальной нагрузки, аварийной нагрузки, индуктивной нагрузки, представленной асинхронным электродвигателем. Для каждого из указанных режимов учеными приведены осциллограммы.

В работе [5] польскими учеными было произведено сравнение результатов выработки электроэнергии солнечной панелью *ST-STP020S-12/Cb*, установленной в районе с солнечной инсоляцией 1187-1400 кВт·ч/м²·год, с аналогичной моделью в программе *MATLAB/Simulink*. Результаты моделирования фактически совпали с реальной выработкой солнечной панели за год, составившей 20 кВт·ч год, при этом годовое моделирование в программе осуществлялось порядка 16 часов. В работе [6] в программе *MATLAB/Simulink*

предложена модель солнечной панели мощностью 55 Вт с номинальным током 3,5 А и выходным напряжением 18,5 В постоянного тока с уровнем солнечной инсоляции 1000 Вт/м² и температурой 25°C, позволяющая в простейшем виде исследовать выдачу солнечной панели на изменяющуюся нагрузку. В свою очередь, моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe₂ в программе *COMSOL Multiphysics* позволило выявить, что при солнечной инсоляции 8-10 кВт/м² КПД установки составляет 14,8% [7], при этом тандемный солнечный модуль из того же материала позволяет при среднем уровне солнечной инсоляции в Минске позволяет поддерживать температуру модуля 2,35°C в январе и не более 14,23°C в июле благодаря стабилизации температуры обратной стороны подложки предлагаемого устройства [8]. Также белорусскими учеными были разработана новая модель фотоэлектрического модуля типа SF-P672300, состоящая из 72 фотоэлементов, и *OSP XTP 250* [9] для программы *MATLAB/Simulink*, работоспособность по выработке электричества от которых была сравнена с действующими установками таких же типов, при этом погрешность составила не более 15% и 12%, соответственно.

Для работы возобновляемых источников энергии также актуальным вопросом является исследование работоспособности систем накопления электроэнергии. В работе [10] путем моделирования в *MATLAB Simulink* произведена оценка эффективности работы гибридного накопителя при заданном графике нагрузки. Отмечено, что при выборе накопителей необходимо учитывать не только их стоимость, но и параметры сети. На примере модели свинцово-кислотной батареи *Delta GEL-12-55* выявлено, что оптимальное состояние заряда для наибольшего срока службы составляет не более 95%, что позволит прослужить батарее более 1200 циклов заряда-разряда или порядка 17 лет [11]. Также выявлено, что при выходе из строя одной секции в указанной ранее батарее, произойдет уменьшение емкости батареи на 10%, что вызывает сокращение времени разряда исследуемой аккумуляторной батареи на 2,9% [12].

Наиболее близкой к предлагаемой является работа по оценке тока однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ, выполненная российскими учеными [13] на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго». Опытная сеть имеет небольшую протяженность в 481 м и включает 2 типа провода: СИП-2 3x30+1x50 и АС-35. Для указанной линии разработана идентичная модель в *MATLAB Simulink* [14], но её недостатком является то, что она содержит всего 2 измерительных блока в точке короткого замыкания и на выводах 0,4 кВ понижающего трансформатора, что не дает возможности исследования распределения напряжения вдоль линии при установившихся аварийных несимметричных режимах. При этом разработанная авторами аналогичная физическая модель [15] характеризуется теми же недостатками, что и математическая, а также не является наглядной и не отвечает требованиям электробезопасности при имитации аварийных режимов ввиду ее питания от трансформатора ТС-0,5-380/177 В.

Следует отметить, что любая модель отражает определенное состояние оборудования, в том числе сопротивление контактов коммутационных аппаратов, сопротивление проводов, которое изменяется как в зависимости от сроков нахождения в эксплуатации, так и от температуры [16]. Оценка влияния контактов, сопротивления проводов в перспективе позволит улучшить показатели моделирования, не только для определения потерь электроэнергии [17, 18], но и для расчёта токов короткого замыкания. Для этого важно повышать точность расчета эквивалентных сопротивлений систем электроснабжения [19].

В данной работе приводится анализ собственной разработанной математической модели в программном комплексе *MATLAB Simulink* и проверка ее достоверности.

Цель исследования (*The purpose of the study*) заключается в оценке достоверности разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ путем сравнения значений токов однофазного короткого замыкания в ней с расчетными значениями, полученными с применением других методов и моделей.

Материалы и методы (*Materials and methods*)

Для проведения исследования были разработаны 2 компьютерные модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программе *MATLAB Simulink*, представленные на рисунках 1-2. Представленные модели были выполнены с использованием положений и функциональных блоков, рассмотренных в источнике [20].

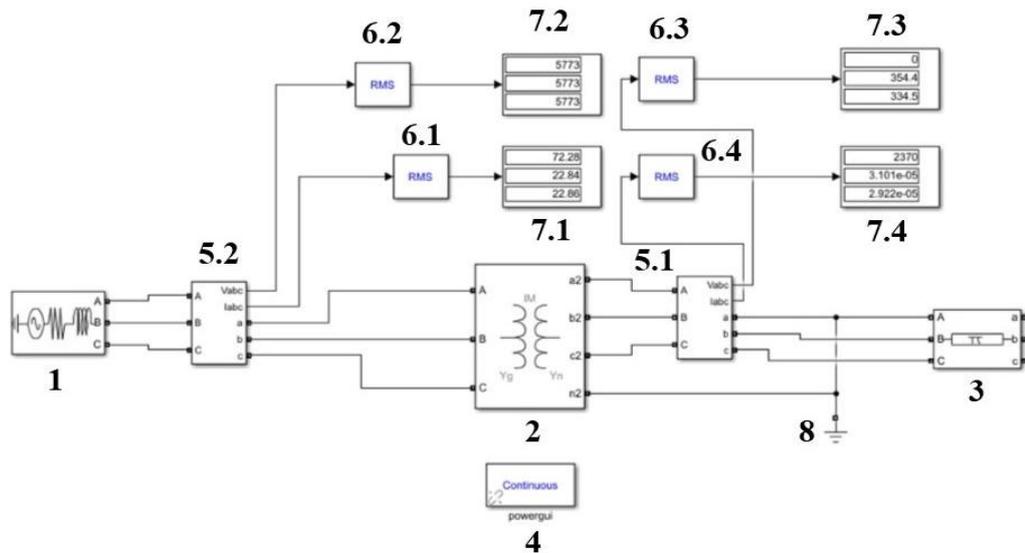


Рис. 1. Модель сельской электрической сети 0,4 кВ при работе в установившемся режиме однофазного короткого замыкания за силовым трансформатором (1 – трехфазный источник с номинальным напряжением 10 кВ; 2 – двухобмоточный силовой трансформатор 10/0,4 кВ; 3 – модель фазных проводов линии электропередачи 0,4 кВ; 4 – блок PowerGui; 5.1, 5.2 – трехфазные блоки измерения токов и напряжений; 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 – дисплеи; 8 – электрическое заземление)

Fig.1. A model of a 0.4 kV rural electrical network when operating in a stable single-phase short circuit mode behind a power transformer (1 – a three-phase source with a rated voltage of 10 kV; 2 - a 10/0.4 kV two-winding power transformer; 3 - a model of 0.4 kV phase wires of a power transmission line; 4 - a PowerGUI unit; 5.1, 5.2 - three-phase units for measuring currents and voltages; 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 – units for calculating the RMS value; 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 – displays; 8 - electrical grounding)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

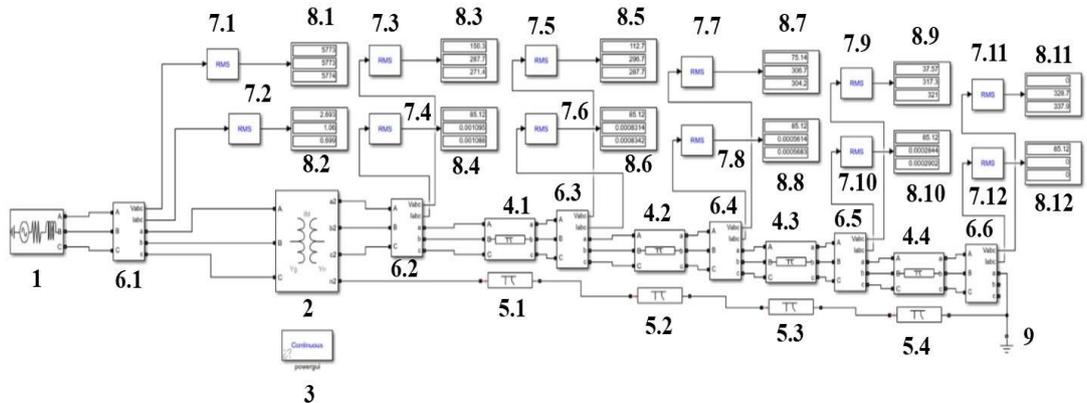


Рис. 2. Модель сельской электрической сети 0,4 кВ при работе в установившемся режиме однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке линии электропередачи (1 – трехфазный источник с номинальным напряжением 10 кВ; 2 – двухобмоточный силовой трансформатор 10/0,4 кВ; 3 – блок PowerGui; 4.1-4.4 – модель фазных проводов линии электропередачи 0,4 кВ; 5.1-5.4 – модель нейтрального провода линии электропередачи 6.1-6.6 – трехфазные блоки измерения токов и напряжений; 7.1-7.12 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; 8.1-8.12 – дисплеи; 9 – электрическое заземление)

Fig. 2. A model of a rural 0.4 kV electrical network when operating in a stable single-phase short circuit mode at the most remote point of the power line (1 – a three-phase source with a rated voltage of 10 kV; 2 - a 10/0.4 kV two-winding power transformer; 3 - a PowerGUI unit; 4.1-4.4 - a model of phase wires of a 0.4 kV power line 5.1-5.4 – model of the neutral wire of the power line 6.1-6.6 – three-phase units for measuring currents and voltages; 7.1-7.12 - units for calculating the RMS value; 8.1-8.12 – displays; 9 - electrical grounding)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует отметить, что в настоящей работе были сделаны отступления от математической модели, представленной в источнике [20]. Было принято решение не использовать блок *Three-Phase Fault* для моделирования аварийных режимов, вызванных короткими замыканиями, а непосредственно использовать электрическое соединение фазного и нейтрального проводников с блоком электрическое заземление, что позволяет создавать токи нулевой последовательности в месте электрического контакта и снизить время моделирования при исследовании установившихся режимов работы.

На рисунке 1 представлена математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ, предназначенная для моделирования однофазного короткого замыкания за силовым трансформатором 10/0,4 кВ. Она содержит энергосистему 10 кВ, силовой трансформатор 10/0,4 кВ, блоки вычисления среднеквадратичного значения и дисплеи отображения информации.

В свою очередь, математическая модель, представленная на рисунке 2, отличается от представленной на рисунке 1 модели только наличием блоков фазных и нейтрального проводников, а также большим количеством измерительных блоков, которые установлены через каждые 1/4 длины моделируемой линии электропередачи 0,4 кВ. При этом электрическое соединение блоков фазного 4.4 и нейтрального 5.4 проводников для моделирования однофазного короткого замыкания непосредственно выполнено на измерительном блоке 6.6.

Рассмотрим параметры электрического оборудования, которые были использованы при моделировании. В качестве основного параметра питающей системы было принято значение тока трехфазного короткого замыкания на вводе 10 кВ трансформатора со значением 1 кА, потому что приблизительно токи трехфазного короткого замыкания данной величины являются характерными для сельских электрических сетей 10 кВ [21]. В качестве провода для линии 0,4 кВ был выбран проводник марки А-35 в связи с тем, что среди голых неизолированных проводов он является наиболее распространенным сечением и типом провода в сельских электрических сетях 0,4 кВ. В некоторых линиях его протяженность достигает 40-100% от общей протяженности всех проводников без учета потребительских отпаек, т.е. «перекидок» [22]. Протяженность линии при моделировании принята равной до 1000 м, так как наибольшая средняя протяженность воздушных линий электропередачи 0,4 кВ в Центральном и Приволжском Федеральных Округах РФ – 985 м [23].

Следует отметить, что в качестве питающего силового трансформатора (СТ) можно было использовать ТМ-100, но для сравнения не только с расчетными методами, но и другой математической моделью [24] в качестве прототипа источника питания будет использоваться трансформатор мощностью 250 кВА.

При этом трансформаторы мощностью 250 кВА широко распространены и их количество в электросетевой организации филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» составляет 802 единицы от общего количества электроустановок 6206, т.е. 13% [25].

Для сравнения адекватности данных, получаемых с помощью разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программном комплексе MATLAB Simulink произведем определение численных значений токов однофазных коротких замыканий по другим методам:

1) по упрощенному методу петли фаза-ноль, предложенному И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской¹, который позволяет определить значение тока однофазного короткого замыкания за счет алгебраического сопротивления элементов до точки короткого замыкания;

2) по методике ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ», предполагающим определение тока однофазного короткого замыкания геометрическим сложением активного и реактивного сопротивлений элементов до точки короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ;

3) с использованием математической модели «Проект РЗА» [24], которая для имитации аварийного режима предполагает использование метода симметричных составляющих, в ходе которого все элементы схемы задаются сопротивлениями и указывается базисное напряжение модели, что позволяет осуществить расчет фазных токов и других электрических параметров.

Так, расчет токов однофазного короткого замыкания по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской производится по формуле (1):

¹ Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.: ил

$$I_{кз}^1 = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\phi-0}}, \text{ А} \quad (1)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В;

Z_T – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом;

$Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли фаза-нуль от трансформатора до точки КЗ, Ом.

В свою очередь, в электроустановках, питающихся от понижающих трансформаторов напряжением до 1 кВ значение тока однофазного короткого замыкания в соответствии с ГОСТ 28249-93 рассчитывается по формуле (2):

$$I_{кз}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.нн}}{\sqrt{(2r_1+r_0)^2+(2x_1+x_0)^2}}, \text{ А} \quad (2)$$

где $U_{ср.нн}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло замыкание, В;

r_1, x_1 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, Ом,

r_0, x_0 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи КЗ, Ом.

Следует отметить, что режим однофазного короткого замыкания, согласно ГОСТ 26522-85 «Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения», это режим короткого замыкания на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленной нейтралью силового трансформатора, при котором с землей соединяется только одна фаза. В связи с этим, согласно теории переходных процессов, примем в настоящем исследовании за особую (поврежденную) фазу А, т.е. параметры которой будут отличаться от параметров других фаз, и отметим то, что по ней будет протекать ток короткого замыкания, при этом в других он будет отсутствовать, т.е. они будут работать в режиме холостого хода. Также следует отметить, что в точке короткого замыкания напряжение поврежденной фазы А будет равно 0 В.

Результаты исследования (Research results)

Результаты расчетов тока однофазного короткого замыкания с использованием двух расчетных методов и двух математических моделей представлены на рисунке 3.

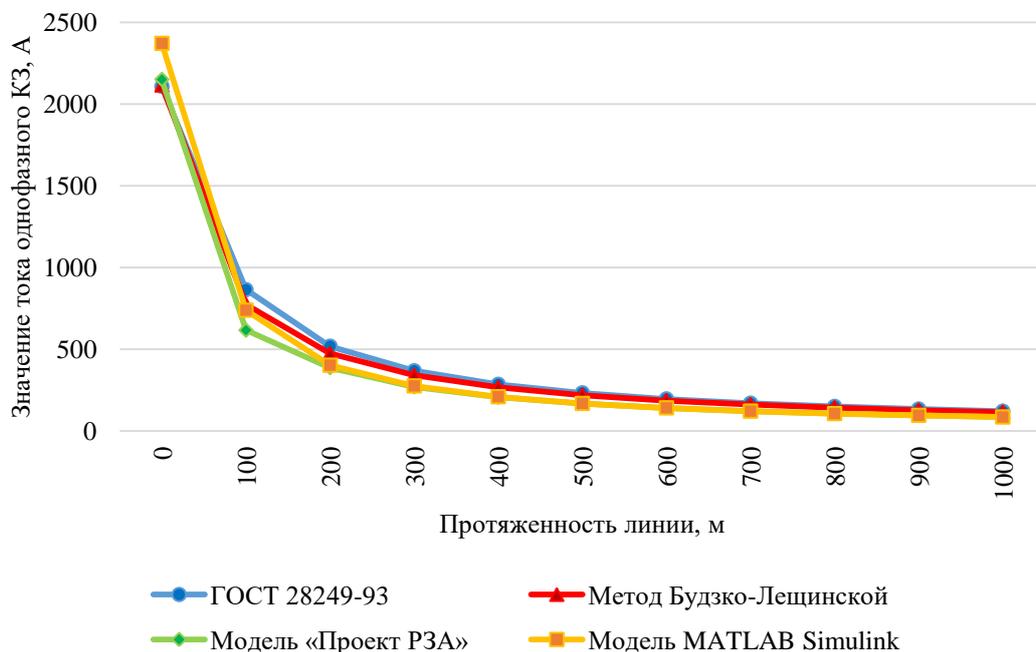


Рис. 3. Результаты расчетов токов однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ при использовании трансформатора ТМ-250 и провода А-35

Fig. 3 - Results of calculations of single-phase short-circuit currents in the 0.4 kV electrical network when using a TM-250 transformer and A-35 wire

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Произведем сравнение полученных результатов и оценим достоверность разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink.

Исходя из результатов исследования, представленных на рисунке 1, было получено, что ток однофазного короткого замыкания на выводе трансформатора 0,4 кВ по ГОСТ 28249-93 составляет 2107 А, по упрощенному методу петли «фаза-ноль» И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской – 2115 А, по модели «Проект РЗА» - 2150 А. В свою очередь, значение тока однофазного короткого замыкания на выводе трансформатора 0,4 кВ, что соответствует рисунку 1, составляет 2370 А. Оценим расхождение полученных результатов по методу определения абсолютной погрешности. Так, расхождение результатов расчета тока однофазного короткого замыкания, полученное в MATLAB Simulink по сравнению с ГОСТ 28249-93 составляет 11%, с упрощенным методом петли «фаза-ноль» - 10%, а с математической моделью «Проект РЗА» - 9%. То есть при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ разница не значительна. Произведем сравнения при замыканиях в других точках, чтобы оценить достоверность блоков модели линий электропередачи 0,4 кВ.

Значения токов однофазного короткого замыкания на удалении 500 м от трансформатора составили: по ГОСТ 28249-93 - 233 А; по упрощенному методу петли «фаза-ноль» – 219 А; по модели «Проект РЗА» - 169 А. В свою очередь, моделирование в MATLAB Simulink однофазного короткого замыкания на данном удалении от трансформаторной подстанции позволило получить значение 168 А, что фактически идентично математической модели «Проект РЗА», а расхождение результатов с ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» составляет 27% и 23%, соответственно.

Аналогичные результаты получаются и при определении значений токов однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ (1000 м от трансформатора). Результаты, полученные по математическим моделям MATLAB Simulink и «Проект РЗА», составили 85 А и 86 А, а расхождение с ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» - 29% и 26%. В целом, обе математические модели сельской электрической сети 0,4 кВ в результате моделирования тока однофазного короткого замыкания позволяют выявить значения меньшие, чем получаемые с помощью расчетных методов.

Полученные с помощью моделей результаты характеризуются схожей зависимостью с полученными расчетными значениями. Это позволяет использовать, как разработанную модель сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink, так и ее аналог, разработанный командой «Проект РЗА», для исследования электрических параметров сети 0,4 кВ при нормальных и аварийных режимах работы.

Дополнительно модель сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink позволяет исследовать распределение напряжений на разном удалении от точки короткого замыкания и трансформаторной подстанции. В работе измерительные датчики были установлены на расстояние $\frac{1}{4}$ длины линии при различных моделируемых расстояниях. Результаты моделирования распределения напряжений вдоль электрической сети 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании представлены в таблице 1. При этом распределение фазных напряжений вдоль электрической сети 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании на удалении 1000 м от трансформаторной подстанции представлено на рисунке 4.

Таблица 1

Table 1

Электрические измерения токов и напряжений от блоков 6.2-6.6 на стороне низкого напряжения 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Electrical measurements of currents and voltages from blocks 6.2-6.6 on the low voltage side of 0.4 kV with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

Удаленность ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, м		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Ток ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, А		2370	738	402	275	209	168	141	121	106	95	85
Измеритель 6.2	Ua, В	0	130	142	146	147	148	149	150	150	150	150
	Ub, В	354	311	299	294	292	290	290	289	288	288	288
	Uc, В	335	267	268	269	270	270	271	271	271	271	271

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

Измеритель 6.3	Ua, В	-	98	107	109	111	111	112	112	112	113	113
	Ub, В	-	315	305	302	300	299	298	298	297	297	297
	Uc, В	-	283	284	285	286	287	287	287	287	288	288
Измеритель 6.4	Ua, В	-	65	71	73	74	74	75	75	75	75	75
	Ub, В	-	319	312	310	309	308	308	307	307	307	307
	Uc, В	-	299	301	302	303	303	304	304	304	304	304
Измеритель 6.5	Ua, В	-	33	36	36	37	37	37	37	38	38	38
	Ub, В	-	324	320	319	318	318	318	318	318	317	317
	Uc, В	-	315	318	319	320	320	320	321	321	321	321
Измеритель 6.6	Ua, В	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ub, В	-	330	329	329	329	329	328	329	329	329	329
	Uc, В	-	331	334	336	336	337	337	338	338	338	338

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В точке однофазного короткого замыкания, как было отмечено ранее, напряжение поврежденной фазы А уменьшается до 0, при этом напряжения на двух оставшихся «здоровых фазах» увеличиваются в 1,4-1,5 раза по сравнению с номинальным напряжением электрической сети - 230 В, фактически в $\sqrt{2}$ раз. Например, при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ они изменяются в диапазоне 335-354 В, а при замыкании за участками линий электропередачи 0,4 кВ на разном удалении от силового трансформатора они находятся в диапазоне 329-338 В.

Независимо от удаления точки однофазного короткого замыкания от выводов трансформатора 0,4 кВ напряжения неповрежденных фаз вдоль линии больше в 1,2-1,4 раза номинального напряжения и варьируются в диапазоне 288-324 В.

Рассмотрим зависимость распределения напряжения поврежденной фазы А. Так, при замыканиях на удалении до 100 метров от трансформаторной подстанции напряжение уменьшается в 1,8 раза по сравнению с номинальным фазным напряжением электрической сети 0,4 кВ 230 В и составляет не более 130 В. При замыканиях на удалении 100-500 метров напряжение фазы А уменьшается в 1,6 раза по сравнению с номинальным и находится в диапазоне 142-148 В. А при замыканиях на удалении более 500 метров от трансформаторной подстанции напряжение фазы А уменьшается не более, чем в 1,5 раза по сравнению с номинальным напряжением и составляет на менее 150 В.

Следует отметить, что независимо от удаления точки однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ от трансформатора (не рассматривается непосредственное замыкание на выводе трансформатора) на $\frac{1}{4}$ длины электрической сети напряжение фазы А уменьшается по сравнению с номинальным напряжением в 2-2,3 раза и находится в диапазоне 98-113 В, на $\frac{1}{2}$ длины линии от трансформатора к точке короткого замыкания напряжение фазы А уменьшается в установленном режиме однофазного короткого замыкания в 3,1-3,5 раза по сравнению с номинальным напряжением и находится в диапазоне 65-75 В, а на $\frac{3}{4}$ длины от трансформатора к точке короткого замыкания оно меньше номинального напряжения 230 В в 6,1-7 раз и составляет 33-39 В.

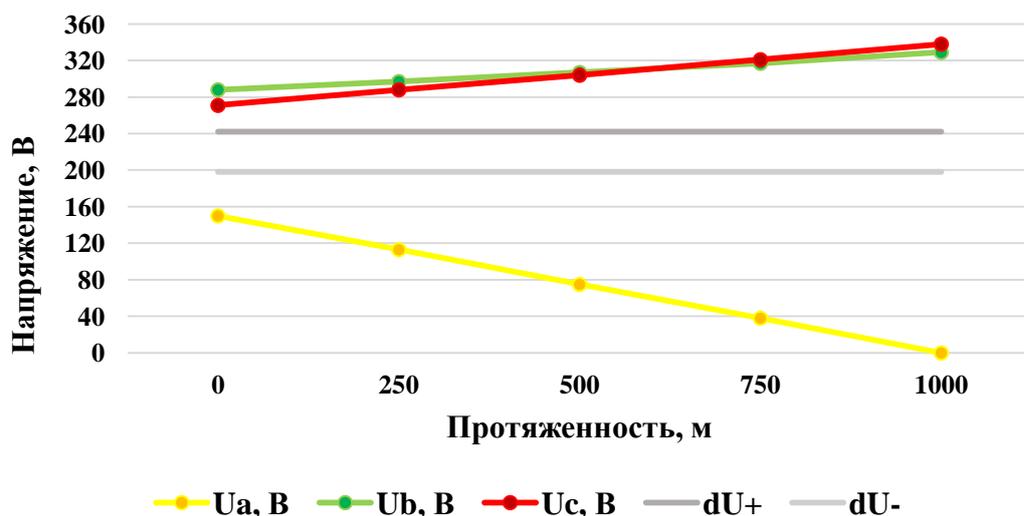


Рис. 4. Распределение напряжений вдоль воздушной линии электропередачи 0,4 кВ, выполненной проводом А-35, питающейся от трансформатора ТМ-250, при установившемся однофазном коротком замыкании на удалении 1000 метров от ТП 10/0,4 кВ

Fig. 4. Voltage distribution along the 0.4 kV overhead power line made by А-35 wire, powered by a ТМ-250 transformer, with a stable single-phase short circuit at a distance of 1000 meters from the transformer substation 10/0.4 kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты, представленные на рисунке 4 позволяют сделать вывод о том, что, например, в установившемся режиме однофазного короткого замыкания на удалении 1000 метров от трансформатора фазные напряжения по всей протяженности электрической сети 0,4 кВ не соответствуют ГОСТ 32144-2013 «Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Так, согласно указанному ГОСТ 32144-2013 допустимые верхняя и нижняя граница отклонения напряжения составляют 198 В и 242 В, соответственно.

Дополнительно проиллюстрируем отношение фазных напряжений неповрежденных фаз к поврежденной фазе на протяжении электрической сети 0,4 кВ в виде рисунка 5.

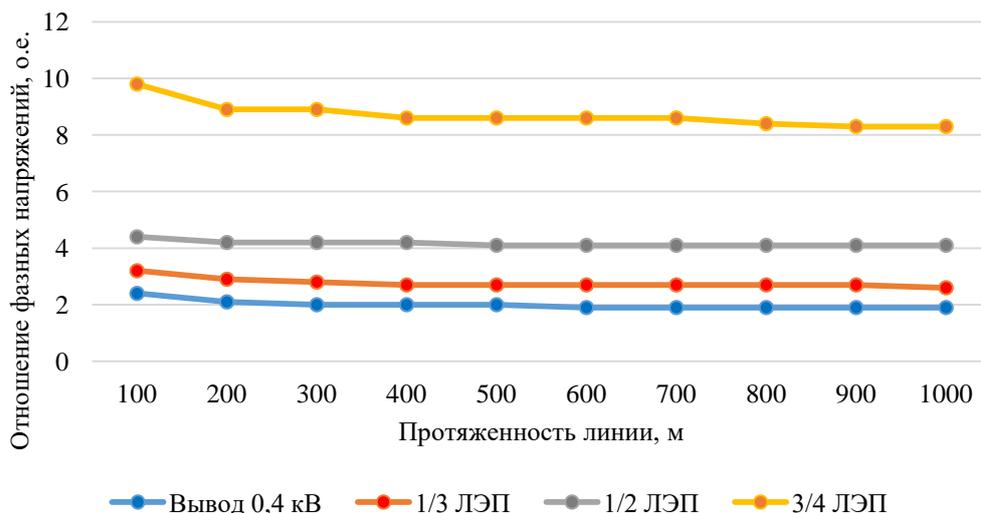


Рис. 5. Отношение фазных напряжений на неповрежденных фазах к напряжению на поврежденной фазе А при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ

Fig. 5. The ratio of phase voltages on undamaged phases to the voltage on the damaged phase A with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV electrical network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Было выявлено, что до 100 метров на шинах трансформаторной подстанции напряжение фазы А в 2,4 раза меньше напряжения неповрежденных фаз, при замыканиях от 100 до 500 метров – в 2-2,1 раза, а при замыканиях более 500 метров – в 1,9 раза и менее. В свою очередь, на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины линии между трансформатором и точкой короткого замыкания напряжение поврежденной фазы А при замыкании до 100 метров меньше напряжений неповрежденных фаз в 3,2 раза и более, при замыкании на удалении 100-300 метров в 2,8-2,9 раза, а свыше 300 метров 2,7 раза и менее. На расстоянии $\frac{1}{2}$ длины линии напряжение поврежденной фазы А при замыкании до 100 метров меньше в 4,9 раза, от 100 до 200 метров – в 4,4 раза, а свыше 200 метров – в 4,2 раза и менее. На расстоянии $\frac{3}{4}$ длины линии напряжение фазы А меньше напряжений неповрежденных фаз при замыкании на удалении до 100 метров в 9,8 раза и более, от 100 до 300 метров 8,9 раза, от 300 до 700 метров – 8,6 раза, а свыше 700 метров – в 8,4 раза и менее.

В таблице 2 представлены результаты измерения токов и напряжений на стороне высшего напряжения 10 кВ трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Yn-0 при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ (блок 5.2 – рисунок 1, блок 6.1 – рисунок 2).

Таблица 2

Table 2

Электрические измерения токов и напряжений (блок 6.1) на стороне высокого напряжения 10 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Electrical measurements of currents and voltages from the 6.1 unit on the 10 kV high voltage side with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

Удаленность ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, м	Ток ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, А	Измерения от блока 6.1					
		Ua, В	Ub, В	Uc, В	Ia, А	Ib, А	Ic, А
0	2370	5773	5773	5773	72	23	23
100	738	5773	5773	5773	22,6	7,3	7
200	402	5773	5773	5773	12,4	4,1	3,7
300	275	5773	5773	5773	8,5	2,9	2,5
400	209	5773	5773	5773	6,5	2,3	1,9
500	168	5773	5773	5773	5,2	1,9	1,5
600	141	5773	5773	5774	4,4	1,6	1,2
700	121	5773	5773	5774	3,8	1,4	1
800	106	5773	5773	5774	3,3	1,3	0,9
900	95	5773	5773	5774	3	1,2	0,8
1000	85	5773	5773	5774	2,7	1,1	0,7

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Исходя из результатов, представленных в таблице 2 можно сделать вывод, что аварийный режим установившегося однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ не влияет на искажение напряжений в сети 10 кВ при любой удаленности до точки повреждения ввиду большого коэффициента трансформации силового трансформатора. В свою очередь, проиллюстрируем распределение токов в линии на стороне 10 кВ по схеме, представленной на рисунке 6.

Так, при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ ток замыкания $I_{K(1)}$ протекает по фазе А трансформатора и, соответственно, по фазе А линии, после чего замыкается через точку замыкания и проходит через нейтраль силового трансформатора на стороне 0,4 кВ ввиду соединения обмоток в схему Yn-0. В свою очередь, этот же ток протекает по фазе А трансформатора и выходит в линию на стороне 10 кВ, у которой соединение обмоток выполнено в звезду (Y) (на рис. 6 векторы токов показаны для случая идеального трансформатора, так как на стороне 10 кВ в действительности они будут в разы меньше токов на стороне 0,4 кВ). Ввиду того, что самопроизвольно ток в фазе А возникнуть не может при схеме соединения обмоток в звезду и ввиду отсутствия нейтрали, через которую протекает этот ток на стороне низшего

напряжения, ток фазы А $I_{A(T)}$ на стороне 10 кВ будут формировать пополам 2 другие фазы, ввиду чего в каждой из них будет протекать $0,5I_{A(T)}$.

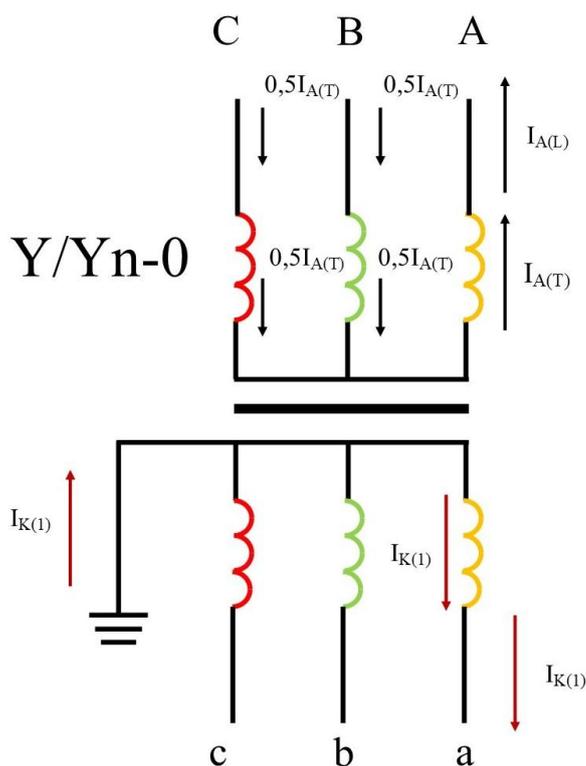


Рис. 6. Схема распределения токов в обмотках трансформатора 10/0,4 кВ и отходящих линиях при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Fig. 6. Diagram of current distribution in the transformer windings of 10/0.4 kV and outgoing lines with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При этом в линиях будут протекать схожие значения токов, которые фиксирует измеритель в модели (блок 5.2 – рисунок 1, блок 6.1 – рисунок 2) $I_{A(L)}$ в фазе А и $0,5I_{A(T)}$ в фазах В и С. Они не искажаются как это могло бы быть вызвано при использовании разных схем и групп соединения обмоток, т.е. в случае использования треугольника на стороне высшего напряжения при соединении обмотки низшего напряжения в звезду или при соединении обмотки высшего напряжения в звезду и соединения обмотки низшего напряжения в зигзаг.

Данная схема поясняет значения токов на стороне 10 кВ, представленных в таблице 2. Фактически, $0,5I_a=I_b=I_c$. Основные положения, описанный выше, были обоснованы с учетом теоретического материала².

Заключение (Conclusions)

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) В работе была разработана математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе *MATLAB Simulink*, достоверность которой был оценена путем сравнения значений токов однофазного короткого замыкания, полученных другими методами: с использованием ГОСТ 28249-93, упрощенного метода петли «фаза-ноль» и математической модели «Проект РЗА». Расхождение результатов в отдельно исследованных точках составило 9-29%, что в целом является большим диапазоном. При этом расхождение с расчетными методами по ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» значительно, то есть в пределах 10-29% процентов в разных точках, ввиду того, что в них расчет тока однофазного короткого замыкания производится путем алгебраического и геометрического сложения сопротивлений до точки короткого замыкания, представленных натуральными числами. При этом результаты математических моделей, полученные при помощи решения программами системы дифференциальных уравнений практически не

² Каминский Е.А. Звезда и треугольник. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. 64 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 44).

отличаются. Так, погрешность при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ – 9%, а в других точках за сопротивлением линии – не более 1%. Исходя из этого следует, что предпочтительнее для выбора уставок защитных коммутационных аппаратов использовать значения математических моделей, что обеспечит более высокую вероятность их срабатывания к току аварийного режима;

2) При исследовании режима устойчивого однофазного короткого замыкания было выявлено, что напряжение поврежденной фазы А уменьшается до 0 В, при этом напряжения на двух оставшихся «здоровых фазах» увеличиваются в 1,4-1,5 раза, т.е. в $\sqrt{2}$ раз до значений 335-354 В при замыкании на выводах трансформатора и до значений 329-338 В при замыканиях за участком линии электропередачи 0,4 кВ;

3) Установлено, что при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ напряжения неповрежденных фаз вдоль линии больше в 1,2-1,4 раза номинального напряжения и варьируются в диапазоне 288-324 В по всей протяженности линии независимо от удаления точки короткого замыкания;

4) В работе были представлены полученные зависимости распределения напряжения поврежденной фазы А вдоль линии при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ, а также отношения фазных напряжений поврежденной фазы А и неповрежденных фаз В и С на различных участках электрической сети 0,4 кВ;

5) Было установлено, что установившийся режим однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ не влияет на искажение фазных напряжений на стороне 10 кВ силового трансформатора. При этом для трансформатора 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Yn-0 было установлено, что при данном режиме по фазе А линии протекает ток, идентичный току короткого замыкания на стороне 0,4 кВ, а по фазам В и С на стороне 10 кВ протекает часть тока фазы А;

6) В целом можно сделать вывод, что полученная математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink может использоваться для исследования нормальных и аварийных режимов работы, исследования режимов совместной работы возобновляемых источников энергии с централизованной сетью, процессов включения резервных источников генерации и др.

Литература

1. Dauda A. Folarin. Modeling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB/Simulink // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) 12.3 (2018): 43-51.
2. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. №63(1). С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
3. Martínez Adrián, Navarro Isaac, Quispe Enrique, Donolo Pablo, Santos Vladimir. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2022. 12. 4640-4648. 10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
4. Ahmed Salam Hussein, Majli Nema Hawas. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. №16(3), December 2019, pp. 1144-1153. DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp. 1144-1153.
5. Jarmuda T, Mikulski S, Nawrowski R, Tomczewski A. The use of the MATLAB & SIMULINK environment to simulate the operation of a PV panel with an actual input function // Computer Applications in Electrical Engineering. 2014;12:497-510.
6. Can Hayrettin. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2013. №21(2). Article 1. <https://doi.org/10.3906/elk-1105-29>.
7. Esman A.K., Zykov G.L., Potachits V.A., Kuleshov V.K. Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe2 Chalcopyrite Structure // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2020. 63(1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
8. Esman A.K., Kuleshov V.K., Potachits V.A., Zykov G.L. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe2 // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2018. 61(5) 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
9. Зализный Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. №63(6). С. 515–525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>.
10. Доброго К.В., Козначеев И.А. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. №66(5). С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.

11. Доброго К.В., Козначеев И.А. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. №65(6). С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
12. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. №64(1). С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
13. Млотов А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. №2(19). С. 96-107.
14. Валеев Р.Г., Млотов А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 116-128.
15. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21.
16. Петров, А. Р. Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов / А. Р. Петров, Е. И. Грачева // Электрические станции. – 2023. – № 11(1108). – С. 29-36. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.004. – EDN JHFKYU.
17. 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.
18. 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
19. Повышение точности расчета эквивалентных сопротивлений систем электроснабжения промышленных предприятий / Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова, Т. В. Табачникова // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VII Национальной научно-практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 545-549. – EDN LPICJA.
20. Лансберг А.А. Обоснование параметров компьютерной модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink // Агротехника и энергообеспечение. 2023. №3(40). С. 36-47.
21. Виноградов А.В., Капитонов А.И., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Фомин И.Н. Определение токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционированной реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания // Вестник аграрной науки Дона. 2021. №1(53). С. 34-43.
22. Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А. Анализ работы и рекомендации по совершенствованию системы накопления электрической энергии, установленной в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2022. №24(1). С. 72-79.
23. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. №2(47). С. 31-41.
24. Проект РЗА. Лаборатория РЗА. URL: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/> (дата обращения: 22.08.2023 г.).
25. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. №23(5). С. 34-45.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». Email: schkolamolen@gmail.com.

Лансберг Александр Александрович – специалист лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики. E-mail: lansbergaa@vk.com

Панфилов Александр Александрович – аспирант, Орловского государственного аграрного университета. E-mail: ra3ed@mail.ru

References

1. Dauda A. Folarin. Modeling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB/Simulink. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 12.3 (2018): 43-51
2. Balametov A.B., Khalilov E.D. Modeling of electric grid modes based on steady-state equations and thermal balance // *getika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(1):66-80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
3. Martínez Adrián, Navarro Isaac, Quispe Enrique, Donolo Pablo, Santos Vladimir. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. 12. 4640-4648. 10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
4. Ahmed Salam Hussein, Majli Nema Hawas. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019;16(3);1144-1153. DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp. 1144-1153.
5. Jarmuda T, Mikulski S, Nawrowski R, Tomczewski A. The use of the MATLAB & SIMULINK environment to simulate the operation of a PV panel with an actual input function // *Computer Applications in Electrical Engineering*. 2014;12:497-510.
6. Can Hayrettin. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2013;21(2):Article 1. <https://doi.org/10.3906/elk-1105-29>.
7. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe2 Chalcopyrite Structure. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(1):5-13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
8. Esman A.K., Kuleshov V.K., Potachits V.A., Zykov G.L. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2018. 61(5) 385-395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
9. Zaluzny D. I. Model of a photovoltaic module for the SimPowerSystems library of the MatLab/Simulink package. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(6):515-525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>.
10. Dobrego K.V., Kaznacheev I.A. Modeling of functional interaction of hybrid power storage units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2023;66(5):405-422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.
11. Dobrego K.V., Kaznacheev I.A. Universal simulation model of degradation of batteries with optimization of parameters by genetic algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2022;65(6):481-498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
12. Dobrego K.V., Bladyko Yu.V. Modeling of batteries and their assemblies taking into account the degradation of parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2021; 64(1):27-39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
13. Molotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. Experimental electrical network with a voltage of 380 V // *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2014;2(19):96-107.
14. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling of an electric network with 380 V voltage with overhead lines in the MATLAB-Simulink software environment. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;9-10:116-128.
15. Ershov A.M., Khlopova A.V. Physical model of an electric network with a voltage of 10/0.38 kV. *Electrical safety*. 2016;2:13-21.
16. Petrov, A. R. Kompleksnyj podhod k issledovaniyu funkcional'nyh parametrov nizkovol'tnyh kommutacionnyh apparatov / A. R. Petrov, E. I. Gracheva // *Elektricheskie stancii*. – 2023. – № 11(1108). – S. 29-36. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.004. – EDN JHFKYO.
17. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Issledovanie i ocenka poter' elektroenergii v sistemah vnutricekhovogo elektrosnabzheniya // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019.T. 11. №4(44). S. 22-29.
18. Gracheva E.I., Alimova A.N. Vozmozhnye pogreshnosti raschetov poter' elektroenergii v cekhovyh promyshlennyh setyah // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2018. T. 20. № 11-12. S. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92
19. Povyshenie tochnosti rascheta ekvivalentnyh soprotivlenij sistem elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij / E. I. Gracheva, A. N. Gorlov, Z. M. SHakurova, T. V. Tabachnikova // *Priborostroenie i avtomatizirovannyj elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : Materialy VII Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Kazan', 09–10 dekabrya 2021 goda*. – Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2022. – S. 545-549. – EDN LPICJA.
20. Lansberg A.A. Substantiation of the parameters of a computer model of a 0.4 kV rural electric network in MATLAB Simulink. *Agrotechnics and energy supply*. 2023;3(40):36-47.

21. Vinogradov A.V., Kapitonov A.I., Lansberg A.A., Sorokin N.S., Fomin I.N. Determination of short-circuit currents in a rural 10 kV electrical network sectioned by reclosers for remote monitoring of their operation // *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2021;1(53):34-43.

22. Balabin A.A., Vinogradov A.V., Landzberg A.A. Analysis of the work and recommendations for improving the electric energy storage system installed in the rural 0.4 kV electric grid // *Agroengineering*. 2022. №24(1). pp. 72-79.

23. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric grid companies by the number and length of power transmission lines, substation capacity. *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2022;69.2(47):31-41.

24. The RZA project. RZA Laboratory. URL: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/> (accessed: 08/22/2023).

25. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. The structure of the park of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV on the example of the electric grid organization of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«OreleNERGO», serving rural electric networks // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(5):34-45.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov - Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Email: schkolamolen@gmail.com.

Alexander A. Lansberg - Federal Scientific Agroengineering Center VIM. E-mail: lansbergaa@vk.com

Alexander A. Panfilov, Orel State Agrarian University. E-mail: ra3ed@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено **04.12.2023 г.**

Отредактировано **05.12..2023 г.**

Принято **07.12.2023 г.**



РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АКТИВАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ:* Возможность обоснованного выбора альтернативной стратегии для организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования энергокомпании – есть гарантия успешной реализации её стратегических приоритетов. *Задачи в этом направлении достаточно актуальны. ЦЕЛЬ:* Разработать унифицированную методику, которая с общих позиций риск-ориентированного подхода позволяла бы сопоставлять две альтернативные стратегии управления активами энергетической компании «по периодичности, наработке» ППР и «по техническому состоянию», по комплексу ключевых критериев эффективности ТОиР. *МЕТОДЫ:* При решении задач применялись методы формирования и корректировки планов-графиков ремонтов электрооборудования, расчета надежности и вероятностей отказа в системе электроснабжения потребителей с учетом ее схемных особенностей, оценки технического состояния оборудования по данным неразрушающего контроля и диагностирования, сравнения затрат на поддержание и восстановление надежности и ущербов от ее нарушений. *РЕЗУЛЬТАТЫ:* Разработана и верифицирована риск-ориентированная методика, позволяющая по единым критериям эффективности оценить и выбрать предпочтительную для энергокомпании стратегию ТОиР оборудования. Получена алгоритмическая реализация разработанной методики, положенная в основу вычислительного комплекса для выбора и принятия решений. Верификация методики и алгоритма выполнена на примере реального объекта – системы электроснабжения потребителей нефтедобычи с использованием достоверной эксплуатационной и диагностической информации. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ:* Полученные результаты в полной мере компенсируют отсутствие методологической возможности в сопоставлении двух базовых альтернативных стратегий ТОиР электрооборудования на основе единого риск-ориентированного подхода. Разработанная методика представляет собой унифицированный инструмент принятия решения на стадии анализа альтернатив. Иллюстрация методики реальным числовым примером демонстрирует согласованность получаемых решений с результатами экспертных оценок и опытом эксплуатации.

Ключевые слова: *альтернативные стратегии; ремонт; электрооборудование; методика; риск-ориентированный подход; система электроснабжения; критерии эффективности; принятие решений.*

Благодарности: *Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы в рамках договора "Разработка стандарта и методических документов для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования ДО ПАО "Газпром нефть" по техническому состоянию и наработке".*

Для цитирования: Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42.

RISK-BASED APPROACH TO CHOOSING THE PRODUCTION ASSET MANAGEMENT STRATEGY FOR ENERGY COMPANY

Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Abstract: *RELEVANCE: The possibility of a reasonable choice of an alternative strategy for the organization of maintenance and repair (M&R) of the power company's equipment is a guarantee of the successful implementation of its strategic priorities. The tasks in this direction are quite relevant. PURPOSE: To develop a unified methodology that, from the general standpoint of a risk-based approach, would allow comparing two alternative strategies for managing the assets of an energy company "by periodicity, operating time" and "by technical condition", according to a set of key criteria for the effectiveness of M&R. METHODS: When solving problems, methods of forming and adjusting schedules for repairs of electrical equipment, calculating reliability and probabilities of failure in the power supply system of consumers, taking into account its circuit features, assessing the technical condition of equipment according to non-destructive testing and diagnostics, comparing the costs of maintaining and restoring reliability and damages from its violations were used. RESULTS: A risk-oriented methodology has been developed and verified, which makes it possible to evaluate and select the optimal equipment maintenance strategy for the energy company according to uniform efficiency criteria. An algorithmic implementation of the developed methodology is obtained, which is the basis of a computing complex for choosing and making decisions. The verification of the methodology and algorithm is carried out on the example of a real object – a power supply system for oil production consumers using reliable operational and diagnostic information. CONCLUSION: The results obtained fully compensate for the lack of methodological possibilities in comparing two basic alternative strategies for electrical equipment maintenance based on a single risk-based approach. The developed methodology is a unified decision-making tool at the stage of alternative analysis. The illustration of the methodology by a real numerical example demonstrates the consistency of the solutions obtained with the results of expert assessments and operational experience.*

Keywords: *alternative strategies; repair; electrical equipment; methodology; risk-based approach; power supply system; efficiency criteria; decision-making.*

Acknowledgments: *The article was prepared based on the results of the research work under the contract "Development of standards and methodological documents to optimize the system of maintenance and repair of power equipment at PJSC Gazprom Neft's subsidiaries according to the technical condition and operating time".*

For citation: Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A. Risk-based approach to choosing the production asset management strategy for energy company. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42.

Введение (Introduction)

До недавнего времени в электроэнергетике РФ преобладающие позиции в сфере управления ТООР оборудования безоговорочно занимала стратегия «по периодичности, наработке» ППР. Её исключительным преимуществом являлась глубокая проработка, полная методологическая поддержка всех компонентов и всестороннее понимание ожидаемых результатов [1, 2]. С развитием и широким внедрением методов и средств технической диагностики, неразрушающего контроля, мониторинга электрооборудования (ЭО) сформировалась необходимость в пересмотре позиций ППР в пользу стратегии «по техническому состоянию». Объективно, эта стратегия располагает более высоким потенциалом экономии, поскольку фактическая потребность выполнения ремонта той или иной единицы оборудования зависит не от фиксированного межремонтного периода, а подтверждается результатами всестороннего диагностического контроля. Этот аргумент ожидаемо должен был запустить интенсивный массовый перевод электрооборудования разных видов, типов и классов напряжения со стратегии «по периодичности, наработке» на стратегию ТООР «по техническому состоянию». Однако этого не произошло. Постепенный переход к ТООР «по техническому состоянию» на интервале более 20 лет объясняется не готовностью субъектов электроэнергетики к обоснованному выбору в пользу данной стратегии, а главным отсутствием методологии такого выбора. Первым видом электрооборудования с нормативно закреплённой стратегией ТООР «по техническому состоянию» стали силовые маслонаполненные трансформаторы 110 кВ мощностью 125 МВА и выше¹. Одним из значимых аспектов в принятии решений о переводе мощного высоковольтного трансформаторного оборудования на стратегию ТООР «по техническому

¹ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Приказ Минэнерго РФ от 3.01.2003 №6. Доступно по: <https://base.garant.ru/12129664/>. Ссылка активна на 05.06.2023.

состоянию» явилась высокая стоимость данного актива и не менее высокие риски его отказов. Другим важным аспектом послужило введение в контур управления ТООИР интегральной оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи (ЛЭП) электрических станций и электрических сетей², которая также опирается на результаты всестороннего диагностического контроля ЭО. Методика обеспечивает ранжирование ЭО по важности с точки зрения поддержания необходимого уровня эксплуатационной надежности, однако зона её ответственности ограничена объектами напряжением 35 кВ и выше. Не охвачен методикой наиболее массовый кластер оборудования и объектов распределительных электрических сетей напряжением ниже 35 кВ. Между тем, именно здесь наблюдаются ощутимые проблемы с надежностью, а, следовательно, возможен наибольший эффект от применения рациональной организации ТООИР [3].

Ряд возможностей для осуществления осознанного выбора собственниками ЭО рациональной стратегии ТООИР открываются с введением правил организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики³ (далее Правила). Однако, как отмечается в [4], отраженная в Правилах методология выбора, имеет ряд недостатков. В частности, ею не определены критерии эффективности и механизмы сравнения альтернативных стратегий ТООИР.

Устранение указанных недостатков – есть задача актуальная, от решения которой зависит возможность обоснованного перевода на стратегию ТООИР «по техническому состоянию» широкой линейки ЭО и объектов разных видов и классов напряжений. Развитие методологии обоснованного выбора способно повысить эффективность управления ТООИР ЭО и стать гарантией успешного достижения стратегических целей энергокомпании на долгую перспективу.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве инструментария для достижения целей исследования воспользуемся методологией риск-ориентированного подхода (РОП), которая предусматривает решение комплексной оптимизационной задачи на основе единых критериев сравнения [5]. В состав комплекса решаемых задач входят:

1. Подготовка нормативно-справочной информации для внесения в базы данных;
2. Планирование работ по ППР с корректировкой планов по фактическому техническому состоянию ЭО;
3. Разработка типовых технологических карт и их адаптация для ремонтов по состоянию;
4. Оценка технического состояния ЭО с применением данных диагностики и неразрушающего контроля;
5. Ранжирование потребителей в электрической сети по важности, учет и ранжирование по критичности дефектов ЭО;
6. Расчет надежности электроснабжения потребителей с оценкой рисков её нарушения;
7. Анализ суммарных затрат на реализацию ремонтной программы.

Выбор и обоснование наиболее эффективной стратегии ТООИР ЭО выполняется на основании установленных критериев эффективности.

Риск-ориентированный подход базируется на понятии «ключевое рисковое событие», под которым понимается нарушение электроснабжения конкретного потребителя при отказе единицы ЭО или объекта электрической сети. Применение РОП к постановке и решению комплексной оптимизационной задачи (при сравнении альтернативных стратегий ТООИР ЭО) в качестве функции цели предлагает использование минимального значения суммарного производственного риска

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n R_i \Rightarrow \min; \quad R_i = Q_i \cdot M[Y_i], \quad (1)$$

где: R_i – риск нарушения электроснабжения i -го потребителя (руб.); Q_i – вероятность (о.е.) и $M[Y_i]$ – тяжесть последствий указанного события (математическое ожидание ущерба, руб.); n – количество потребителей электрической энергии, подключенных к системе электроснабжения (шт.). Поскольку задачи управления ТООИР ЭО как правило приходится

² Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена приказом Минэнерго России от 26.07.2017 №676. Доступно по: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-679-20200531-233201.pdf>. Ссылка активна на 05.06.2023.

³ Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Утверждены приказом Минэнерго России от 25.10.2027 №1013. Доступно по: <https://minenergo.gov.ru/node/10885>. Ссылка активна на 05.06.2023.

решать в условиях ограниченных ресурсов, в качестве универсального ограничения типа неравенства для обеих сравниваемых стратегий ТОиР справедливо рассматривать

$$C_{\text{сум}} \cdot 100\% / C_{\text{зад}} \leq 100\% \quad (2)$$

Здесь: $C_{\text{сум}}$ – суммарные эксплуатационные затраты (руб.) на все виды ресурсов по содержанию парка ЭО энергокомпании на рассматриваемом горизонте планирования Δt (месяц, квартал, год); $C_{\text{зад}}$ – заданные (плановые) суммарные эксплуатационные затраты (руб.).

Рассмотрим пошаговую характеристику обобщенной структуры решения комплексной оптимизационной задачи, применимой к любой из альтернативных стратегий ТОиР ЭО.

1. Нормативно-справочная информация (НСИ) формируется и заносится в электронные базы данных для использования на каждом шаге решения комплексной задачи не зависимо от применяемой стратегии ТОиР. НСИ условно можно подразделить на постоянно действующую информацию и информацию, требующую периодической актуализации или оперативного обновления в процессе эксплуатации ЭО. Один из важных разделов НСИ содержит количественную информацию об эксплуатируемом парке ЭО энергокомпании (типы, номинальные данные, нормативные периодичности и продолжительность корректирующих воздействий, нормативные трудозатраты на все виды работ, численность персонала, пр.). Другой раздел НСИ включает графическую информацию об электрических схемах (распределительных подстанций, сегменты линий электропередачи, распределительные и переключательные пункты сети, пр.). Отличительной особенностью НСИ применительно к стратегии ТОиР ЭО «по техническому состоянию» является наличие дополнительных информационных разделов, связанных со статистикой аварийных отказов и результатами диагностического контроля ЭО.

2. План-график ТОиР «по периодичности, наработке» ППР представляет собой «базовую сетку», фиксированную по нормативной периодичности и объемам работ, которая фактически служит производственной программой энергокомпании по поддержанию и восстановлению работоспособности ЭО [5]. Горизонтом планирования графика ППР является календарный год с разбивкой по месяцам. План-график ТОиР «по техническому состоянию» представляет собой вариант корректировки базового графика ППР. Корректировка графика ППР осуществляется для каждой единицы оборудования (ЕО) или ЛЭП с запланированным ремонтом с целью учета их фактического технического состояния. По результатам корректировки достигается уплотнение или разрежение базового графика ППР со смещением плановой даты ремонта ЕО в графике в зависимости от индивидуального индекса технического состояния J . Здесь J , как интегральная оценка с периодичностью актуализации в соответствии с корпоративным регламентом, но не реже одного раза в год, количественно характеризует уровень технического состояния ЕО в диапазоне от 100% (идеальное) до 0% (аварийное). Правила корректировки не противоречащие положениям базовой методики², предложены в [6]:

- если значение $J < 25\%$, то необходим незамедлительный её вывод в ремонт несмотря на плановую дату, что позволит не допустить эксплуатации оборудования в «критическом» состоянии;
- если значение $25\% \leq J < 50\%$, то необходим перенос планового ремонта непосредственно на следующий календарный месяц с фиксацией даты в графике ТОиР. Это позволит исключить вероятные отказы ЭО, в том числе с тяжелыми последствиями;
- если $J \geq 50\%$, то корректировка периодичности ремонта производится согласно выражению

$$T_{\text{мр}} = m \cdot T_{\text{норм}}$$

где: $T_{\text{мр}}, T_{\text{норм}}$ – расчетная и нормативная периодичности ТОиР ЕО (год), m – корректирующий коэффициент, который устанавливается экспертным путем из диапазона $1,0 \div 1,5$ (о.е.) и согласуется с опытом эксплуатации ЭО «по техническому состоянию» (табл.1).

Таблица 1

Table 1

Коэффициент корректировки периодичности ремонтов «по техническому состоянию»

The coefficient of adjustment of the frequency of repairs «according to technical condition»

$J, \%$	50 – 70	70 – 85	85 – 100
Значение m , о.е.	1,0	1,25	1,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Так как в графике ТОиР «по техническому состоянию» скорректированы сроки выполнения ремонтов отдельных ЕО, целесообразно оценку сравнительной эффективности для каждой из альтернативных стратегий производить ежемесячно. Этот методологический прием следует зафиксировать и применять на каждом шаге комплексного решения оптимизационной задачи. Еще один методологический прием базируется на обосновании целесообразности замены запланированного в графике ППР капитального ремонта (К) конкретной ЕО на текущий ремонт (Т) при переходе к стратегии ТОиР «по техническому состоянию». Как известно, К – самое дорогостоящее техническое воздействие, прикладываемое к ЕО с целью восстановления ее работоспособности и остаточного технического ресурса до уровня начала эксплуатации [7]. Оценка остаточного ресурса распространяется на ЕО производственного актива энергокомпании с не истекшим сроком службы. По истечении срока службы ЕО должно быть проведено техническое освидетельствование с возможным его продлением в зависимости от текущего J . В условиях эксплуатации оценка остаточного ресурса ЕО предусматривает введение значений J на начальный $T_{p(k-1)}$ и текущий T_{pk} моменты времени, а также расчет текущего значения ресурса ЕО по формуле $\rho_k = \rho_{k-1} \cdot \exp\left[-\frac{J_{k-1} - J_k}{100}\right]$, о.е. и значения остаточного ресурса ЕО на k -й момент времени $\rho_{ост k} = \rho_k - \rho_{пр}$, о.е. ($\rho_{пр}$ – предельное значение остаточного ресурса устанавливается для каждой ЕО индивидуально в результате предварительного анализа из соображений её безопасной эксплуатации). Обоснование замены К на Т для всех ЕО в графике ТОиР «по техническому состоянию» выполняется специальными расчетами в следующей последовательности:

- 1) перебор всех единиц оборудования независимо от закрепленной стратегии ТОиР;
- 2) выбор тех ЕО, для которых в году планирования предусмотрено выполнение К;
- 3) выбор ЕО или ЛЭП со значением ИТС меньше некоторого установленного минимума – J_{\min} , либо с динамикой снижения индекса технического состояния за год более некоторого установленного максимума ΔJ_{\max} . Предельно-допустимые значения указанных параметров устанавливаются экспертным путем и подлежат уточнению в процессе эксплуатации и накопления статистической информации. В качестве стартовых значений допустимо использовать, например: $J_{\min} = 50\%$ и $\Delta J_{\max} = 10\%$;
- 4) выбор ЕО со значением остаточного ресурса ниже предельного $\rho_{пр}$, например 0,2 о.е.;
- 5) выбор ЕО, у которого нет экспертного заключения о продлении срока эксплуатации;
- 6) при одновременном выполнении всех критериев ЕО включается в предварительный список К на рассматриваемый год планирования. Для прочих ЕО выполняется замена К на Т;
- 7) формирование окончательного списка К производится дополнительным экспертным решением.

3. Технологические карты (ТК) служат основным организационно-технологическим документом в ТОиР ЭО и ЛЭП. Они содержат комплекс мероприятий по организации труда с использованием наиболее эффективных, современных средств механизации, технологической оснастки, инструмента и приспособлений. В типовые ТК должны быть отражены наиболее прогрессивные и рациональные методы и технологии ТОиР, способствующие повышению производительности и безопасности труда, улучшению качества работ, снижению их себестоимости⁴. ТК могут применяться при лицензировании энергосервисных компаний в качестве документов, подтверждающих готовность к производству работ (корпоративных стандартов), при сертификации систем менеджмента качества. Типовые ТК используют в системе ППР для любого типа ЭО и вида технического воздействия: О – осмотр; УО – углубленный осмотр; ТО – техническое обслуживание; Т/К – текущий/капитальный ремонт. Они содержат полный перечень операций организационной и технологической направленности, имеющих нормативную трудоемкость. Для ТОиР «по техническому состоянию» необходимы «адаптивные» ТК [8], отличные от типовых не постоянством состава технологических операций. Состав технологического блока адаптивной ТК всякий раз включает минимально возможный набор операций, необходимых и достаточных для гарантированного устранения выявленных ранее в ЭО неисправностей.

⁴ СТО 56947007-29.240.55.168-2014 Методические указания по разработке технологических карт и проектов производства работ по техническому обслуживанию и ремонту ВЛ. Утвержден Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 02.04.2014 № 165. Доступно по: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.55.168-2014.pdf. Ссылка активна на 05.06.2023.

Это существенно снижает трудоемкость технического воздействия на объект, однако делает ТК зависимой от достоверности диагностики и неразрушающего контроля [9, 10].

4. Индекс технического состояния ЕО J характеризует текущий уровень ее эксплуатационной надежности, и применим к стратегии ТОиР «по техническому состоянию». Количественно J рассчитывают с помощью балльных оценок и экспертно заданных весовых коэффициентов групп контролируемых параметров и функциональных узлов ЕО. Для ЭО и энергообъектов напряжением до 35 кВ разработаны модели и вычислительные процедуры расчета J [6, 7], верифицированные практикой эксплуатации электрических сетей нефтепромыслов. Информационной основой для расчета J ЭО служат его паспортные данные, а также результаты технического диагностирования и неразрушающего контроля. Доступность методов диагностирования совместно с контролепригодностью ЭО позволяют сократить периодичность актуализации значений J на горизонте планирования до значений, соответствующих частоте возникновения неисправностей. Для стратегии ППР расчет J не предусмотрен, что может быть интерпретировано как пребывание ЭО в идеальном техническом состоянии с $J = 100\%$.

5. В основе расчетов схемной надежности потребителей со стратегиями «по периодичности, наработке» и «по техническому состоянию» лежит структурный подход или метод блок-схем [11, 12]. Расчет заключается в определении результирующих показателей безотказности $\bar{\omega}_{резj}$ и ремонтпригодности $\bar{T}_{врезj}$ в процессе преобразования структурной схемы надежности каждого j -го потребителя. В расчетах надежности резервируемых схем электроснабжения при необходимости учитываются сценарии наложения аварийного восстановления основного участка сети на плановый ремонт резервного, что обеспечивает учет маловероятных событий при сравнении альтернативных стратегий ТОиР ЭО. Оценка риска нарушения электроснабжения j -го потребителя электрической сети по (1) требует определения вероятности указанного события:

$$Q_j = \frac{N_{мес.}}{8760} \cdot \frac{\bar{\omega}_{резj} \cdot \bar{T}_{врезj}}{8760} \quad (3)$$

Здесь $N_{мес.}$ – количество часов в текущем месяце. Указанная вероятность рассчитывается ежемесячно через результирующие показатели надежности в цепи каждого потребителя. При этом соответствующие изменения результирующих показателей надежности происходят в месяц планового ремонта i -й ЕО, включенной в цепь электроснабжения j -го потребителя. Для каждой i -й ЕО с закрепленной стратегией «по техническому состоянию» в расчетах индивидуальных показателей надежности учитывается её текущее техническое состояние J , что достигается применением следующих преобразований [6]:

- при $J_i = 100\%$ вероятность безотказной работы $P_i = \exp(-\bar{\omega}_i)$; $\bar{\omega}_i$ – средняя частота отказов i -й ЕО со стратегией ППР (принимается на основе данных НСИ);
- при $J_i < 100\%$ $P_i' = \exp(-\bar{\omega}_i \cdot J_i) = P_i \cdot J_i$, тогда $\bar{\omega}_i' = -\ln P_i'$.

В дальнейших расчетах надежности электроснабжения j -го потребителя при определении $\bar{\omega}_{резj}$ и $\bar{T}_{врезj}$ используются значения $\bar{\omega}_i'$ i -х ЕО со стратегией «по техническому состоянию». Таким образом, в вероятности нарушения электроснабжения j -го потребителя Q_j оказываются учтенными текущие значения J всех ЕО, включенных в цепь его питания.

6. Для стратегии ТОиР «по техническому состоянию» РОП предусматривает ранжирование по «важности» потребителей электрической сети [13-15]. В данном контексте «важность» измеряется величиной суммарного ущерба от нарушений электроснабжения j -го потребителя $M[Y_j]$, $j = 1, \dots, n$. Это обеспечивает выявление наиболее ответственных потребителей и согласованность требований по надежности их электроснабжения. Математическое ожидание ущерба j -го потребителя на интервале 1 месяц рассчитывается следующим образом:

$$M[Y_j] = \frac{N_{мес.}}{8760} \left[\bar{P}_{нагрj} \cdot \bar{D}_j \cdot 8760 \cdot c \right], \text{ руб.} \quad (4)$$

Здесь для каждого j -го потребителя: $\bar{P}_{нагрj}$, \bar{D}_j – средняя активная мощность нагрузки (кВт·ч) и удельная производительность технологических механизмов (тонн/кВт·ч); c – удельная стоимость потерь добычи нефти (руб./тонну). Расчеты по (4) выполняются также для стратегии ППР и используют базы данных НСИ. Для учета и ранжирования дефектов ЭО, выявляемых в процессе эксплуатации с применением методов технического диагностирования и неразрушающего контроля предусмотрена «дефектная ведомость» [5],

которая формируется по каждому объекту ремонта со стратегией «по техническому состоянию». В неё заносят все обнаруженные, но не устраненные к моменту планирования дефекты с указанием их критичности, а также соответствующие им корректирующие воздействия и трудозатраты. Информационной основой формирования дефектной ведомости служат листы осмотра, справочник корректирующих воздействий и технологические карты. Под критичностью дефекта понимается необходимость его устранения на отключенном от сети объекте.

7. Традиционно решение задачи анализа суммарных годовых затрат на обеспечение ремонтной программы энергокомпании является трудно осуществимым в силу ограниченной доступности информации. Авторами статьи предлагается подход, делающий такое решение вполне доступным. Идея заключается в применении условных единиц (у.е.) в качестве адекватной характеристики финансовых затрат энергокомпании на ремонтную деятельность в течение календарного года $C_{y.e.}$. Не смотря на трудности отсутствия централизованного отраслевого подхода к нормированию у.е. на ТОиР ЭО и существенные различия нормативов у.е. на однотипное ЭО у разных энергокомпаний [16, 17] существует возможность использования этого показателя для финансовых расчетов. Корректное использование $C_{y.e.}$ достижимо в рамках единых нормативов оценки сравнительной эффективности альтернативных стратегий ТОиР производственных активов компании «по периодичности, наработке» и «по техническому состоянию». Прежде всего, требуется сформировать зависимость $C_{y.e.} J$, учитывающую различие в затратах на ТОиР при реализации разных стратегий. Для этого восстановим логику рассуждений. При ППР все плановые корректирующие воздействия на ЭО осуществляются в полном объеме (100%), что гарантирует достижение целей выбранной стратегии. Финансовые затраты $C_{y.e.}$, соответствующие полному годовому регламенту ППР для каждой ЕО, приведены в таблице 2. ТОиР ЕО со стратегией «по техническому состоянию» включает корректировку плановых ремонтов как по периодичности, так и по трудоемкости выполнения в зависимости от вида, количества и критичности обнаруженных, но не устраненных дефектов [5]. Это оказывает влияние на фактическое значение J ЕО либо группы однотипного ЭО, а также на актуальный состав и трудоемкость исправляющих операций в ТК ремонта. Количественный состав операций, суммарная трудоемкость, а значит и $C_{y.e.}$ на ТОиР изменяются обратно пропорционально значениям J ЕО. Таким образом, зависимость $C_{y.e.} J$ может быть достаточно адекватно представлена линейным полиномом вида $C_{y.e.} = -k \cdot J + C_0$, где: k , о.е. – вычислительная константа, характеризующая темпы сокращения затрат на ТОиР ЕО при монотонном увеличении значения J от 25 до 100%; C_0 , % – постоянная доля затрат на выполнение обязательных операций О, УО и ТО ЕО в общем регламенте ППР (рис. 1).

Таблица 2

Table 2

Нормативы $C_{y.e.}$ на ТОиР активов энергокомпании (фрагмент)

Standards for MRO of energy company assets (fragment)

№ п.п.	Наименование ЕО 6(10) кВ	Количество $C_{y.e.}$ *, о.е. на ЕО
1	Силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ	3
2	Реклоузер 6(10) кВ	20,5
3	Масляный выключатель 6 кВ	3,1
4	Вакуумный выключатель 6 кВ	3,1
5	Разъединитель 6 кВ	1
6	ВЛ в габаритах 6 кВ на металлических, ж/б опорах	9,54
7	Кабельная линия 6 кВ	3,5

* соответствует 100% затрат на ТОиР ЕО

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует пояснить, что начальной точкой зависимости служит точка с координатами $C_{y.e.} = 100\%$ и $J = 25\%$ в силу того, что при $J \leq 25\%$ состояние ЭО оценивается как «критическое» и требует полного регламента ППР².

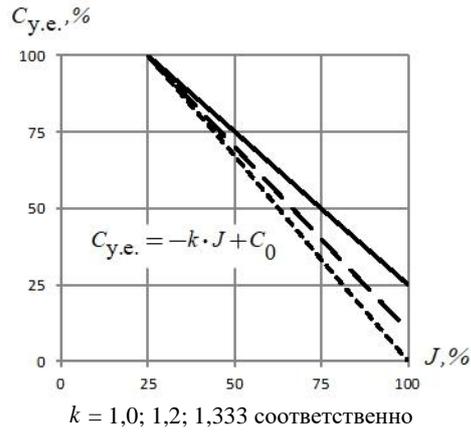


Рис. 1. Изменение суммарных затрат на ТОиР в зависимости от индекса состояния ЕО Fig. 1. Dependence of total M&R costs on the condition index of equipment unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выбор и обоснование наиболее эффективной стратегии ТОиР ЭО с применением разработанных методологических положений целесообразно пояснить на конкретном практическом примере, что и будет выполнено в следующем разделе.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В качестве примера, иллюстрирующего применение разработанных методологических положений, рассмотрим распределительную электрическую сеть 6 кВ, питающую объекты нефтедобычи (рис. 2). Фрагмент реальной схемы электрической сети нефтепромысла состоит из трех кустовых площадок с установленными на них двухтрансформаторными подстанциями: ТП1 (2x1000 кВА), ТП2 (2x630 кВА) и ТП3 (2x1000 кВА). Подстанции запитаны от распределительного устройства 6,3 кВ главной понизительной подстанции (ГПП). ТП1 находится на удалении 500 м от ГПП и запитана по кабельной линии, а ТП2 и ТП3 – по двум воздушным линиям (ВЛ) на железобетонных опорах, выполненным по магистральной схеме проводом марки АС-95. Расстояние от ГПП до ТП2 – 3 км, от ТП2 до ТП3 – 2 км. Повышенная надежность электроснабжения потребителей, запитанных от ТП2, обеспечивается установкой реклоузеров на ВЛ Л2.3 и Л2.4 для автоматического отключения участков сети к ТП3 при возникновении на них повреждений. В составе НСИ также содержатся осредненные значения мощностей нагрузок технологических механизмов нефтепромысловых объектов по каждому из вводов 6 кВ ТП1, ТП2 и ТП3, а также их удельные производительности (табл. 3). Для определения показателей надежности здесь представлены справочные данные⁵ по элементам расчетной схемы СЭС [18]. Базовая сетка планирования ремонтов для восстановления и поддержания утраченной работоспособности ЭО СЭС приведена в таблице 4. Здесь же показан результат корректировки периодичности ремонтов для стратегии «по техническому состоянию».

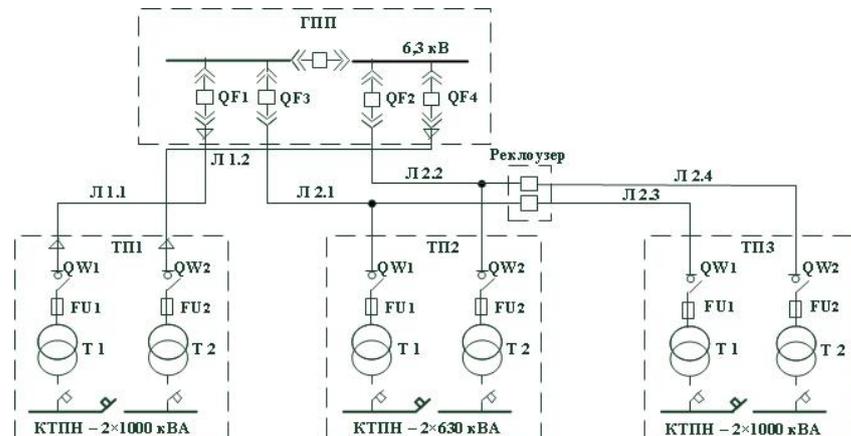


Рис. 2. Схема электрической сети 6 кВ нефтепромысла Fig. 2. Diagram of the 6 kV oil field electrical networks

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

⁵ РД 34.20.574 СО 153-34.20.574 Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. – Москва : Союзтехэнерго, 1985. – 16 с.

Таблица 3
Table 3

Среднегодовые значения мощностей нагрузок и удельных производительностей технологических механизмов

Average annual values of load capacities and specific capacities of technological mechanisms

Объекты и ЭО СЭС нефтепромысла		$\bar{P}_{нагр j},$ кВт	$\bar{D}_j,$ тонн/кВт·ч
ТП1	T1	530	3,4
	T2	520	3,2
ТП2	T1	340	2,8
	T2	360	3.0
ТП3	T1	560	3,9
	T2	550	3,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При формировании графика ППР применено положение о «ремонтном присоединении», при котором последовательно включенные элементы цепи питания потребителя одновременно выводятся в плановый ремонт на время наибольшего простоя одного из них. Такой прием позволяет экономить суммарное время и затраты от плановых простоев электротехнического и технологического оборудования без потери эксплуатационной надежности. Для сокращения расчетов принято, что год планирования не является годом К ни для одной из ЕО СЭС. Корректировка графика ППР для стратегии «по техническому состоянию» осуществляется в соответствии с описанными правилами по известным значениям индекса состояния J и нормативным периодичностям ремонтов отдельных ЕО (табл. 5). В результате корректировки периодичности, как следует из таблицы 4, ремонты отдельных ЕО смещаются из планового графика на следующий календарный период. Это ведет к сокращению количества ремонтов в графике «по техническому состоянию» по сравнению с графиком ППР. Для каждой ЕО при реализации графика ППР принимается $J = 100\%$ в отличие от ремонтов «по техническому состоянию», когда текущее значение $J \leq 100\%$ оценивается в соответствии с методикой по фактическим диагностическим параметрам.

В рассматриваемом примере для графика «по техническому состоянию» сохранен принцип «ремонтного присоединения», принятый в ППР, а актуальные значения J заданы для упрощения только у основного ЭО ТП и ВЛ (табл. 5).

Таблица 4
Table 4

План-график ППР с корректировкой «по техническому состоянию» ЭО
The schedule of the PPR with an adjustment "according to the technical condition" of the EA

№ ТП	ЕО	Месяцы календарного года												След. год				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	
ТП1	QF1																	
	Л1.1																	
	QW1, FU1																	
	T1																	
	QF4																	
	Л1.2																	
	QW2, FU2																	
ТП2	T2																	
	QF3																	
	Л2.1																	
	QW1, FU1																	
	T1																	
	QF2																	
	Л2.2																	
ТП3	QW2, FU2																	
	T2																	
	P1																	
	Л2.3																	
	QW1, FU1																	
	T1																	
	P2																	
ТП3	Л2.4																	
	QW2, FU2																	
	T2																	

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 5
Table 5

Актуальные значения ИТС основного ЭО ТП и ВЛ
Current values of ITS main EO TP and overhead line

ЭО объектов СЭС	J, %	
ТП1	T1/Л1.1	72/96
	T2/Л1.2	84/98
ТП2	T1/Л2.1	73/86
	T2/Л2.2	92/100
ТП3	T1/Л2.3	81/88
	T2/Л2.4	96/90

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При переходе от типовых ТК ППР ЭО к адаптивным картам ремонтов «по техническому состоянию» происходит корректировка (сокращение) суммарной трудоемкости воздействий. Это обусловлено сокращением состава технологических операций до минимума, необходимого и достаточного для устранения выявленных дефектов [8]. Расчеты схемной надежности выполняются ежемесячно для каждого из графиков ремонтов ЭО СЭС. Они позволяют оценивать результирующую вероятность нарушений электроснабжения каждого j -го потребителя с учетом состава схемы, технического состояния ЭО и конкретного сценария планового ремонта в текущем месяце. При этом обязателен учет допущения к рассматриваемым сценариям о том, что вывод в k -м месяце в плановый ремонт ЭО в дальнейшем до конца месяца исключает ее аварийный отказ. Ниже приведены результаты расчета вероятностей отказов ЭО на интервале $\Delta t = 1$ месяц (с распределением частоты потока отказов по месяцам пропорционально количеству часов в текущем месяце $N_{мес}$):

$$Q_{OF} = 0,86 \cdot 10^{-6}; \quad Q_T = 2,67 \cdot 10^{-6}; \quad Q_{FU} = 1,42 \cdot 10^{-6}; \quad Q_{OW} = 0,075 \cdot 10^{-6};$$

$$Q_{Л2.1} = 42,83 \cdot 10^{-6}; \quad Q_{Л2.3} = 28,58 \cdot 10^{-6}; \quad Q_{Л1.1} = 7,13 \cdot 10^{-6}.$$

Расчеты результирующих вероятностей нарушений электроснабжения потребителей ТП1, ТП2, ТП3 по месяцам календарного года при реализации ППР (табл. 7) или ремонтов «по техническому состоянию» (табл. 8) выполнялись с учетом ряда очевидных сценариев. Так, например, для месяцев, в которых отсутствует плановый ремонт ЭО (1, 3-7, 9-12), нарушение электроснабжения при его полном резервировании возможно только при одновременном отказе обеих цепей. Для месяцев (2, 8), когда выводятся в ремонт одна, затем другая цепи, а продолжительность простоя определяется временем ремонта трансформатора, нарушение электроснабжения возможно только при наложении планового ремонта одной из цепей на аварийное восстановление другой. Оценка тяжести последствий от нарушений электроснабжения каждого j -го потребителя (ТП1, ТП2, ТП3) на интервале 1 месяц в виде математического ожидания ущерба выполняется по выражению (4) с применением данных таблицы 3.

Таблица 7
Table 7

Вероятности нарушений электроснабжения потребителей СЭС при реализации графика ППР
The probability of power supply disruptions to SES consumers during the implementation of the PPR schedule

№ ТП	Вероятности по месяцам календарного года												Вероятность за год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ТП1	$0,0148 \cdot 10^{-8}$	$14,6 \cdot 10^{-8}$	$0,0148 \cdot 10^{-8}$					$13,4 \cdot 10^{-8}$	$0,0148 \cdot 10^{-8}$				$28,148 \cdot 10^{-8}$
ТП2	$0,229 \cdot 10^{-8}$	$52,6 \cdot 10^{-8}$	$0,229 \cdot 10^{-8}$					$96,7 \cdot 10^{-8}$	$0,229 \cdot 10^{-8}$				$151,59 \cdot 10^{-8}$
ТП3	$0,597 \cdot 10^{-8}$	$85 \cdot 10^{-8}$	$0,597 \cdot 10^{-8}$					$156,1 \cdot 10^{-8}$	$0,597 \cdot 10^{-8}$				$247,07 \cdot 10^{-8}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 8
Table 8

Вероятности нарушений электроснабжения потребителей СЭС при реализации графика ремонтов «по техническому состоянию»
The probability of power supply disruptions to SES consumers during the implementation of the repair schedule «according to technical condition»

№ ТП	Вероятности по месяцам календарного года												Вероятность за год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ТП1	$0,0148 \cdot 10^{-8}$				$13,4 \cdot 10^{-8}$				$0,0148 \cdot 10^{-8}$				$13,56 \cdot 10^{-8}$
ТП2	$0,229 \cdot 10^{-8}$								$52,6 \cdot 10^{-8}$		$0,229 \cdot 10^{-8}$		$55,12 \cdot 10^{-8}$
ТП3	$0,597 \cdot 10^{-8}$						$85 \cdot 10^{-8}$		$0,597 \cdot 10^{-8}$				$157,97 \cdot 10^{-8}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3-а показаны риски нарушений электроснабжения каждого из потребителей, возникающие при реализации стратегии ППР и ремонтов «по техническому состоянию» ЭО СЭС. Они определены по выражению (1) с привлечением информации таблиц 7 и 8. Из рисунка следует, что стратегия ППР допускает более значимые производственные риски, чем стратегия «по техническому состоянию» ЭО. Это вполне объяснимо (табл. 4), так как количество ремонтов, их суммарный объем, а, следовательно, и ремонтные затраты для графика ППР превышают аналогичные показатели графика ремонтов «по техническому состоянию».

Для вычисления суммарных годовых затрат на поддержание и восстановление работоспособного состояния ЭО СЭС с применением данных табл. 2 и рис. 1 предложен следующий алгоритм:

1) используя разработанную в статье методику и данные табл. 2, рассчитать суммарный ремонтный фонд в у.е. для реализации ППР всех ЕО СЭС (рис. 2). Его значение принимается за 100%;

2) определить структуру ремонтного фонда и процентное соотношение каждой из двух его составляющих: затрат (у.е.) на выполнение О, УО, ТО ЕО СЭС для интервалов годового графика ППР, в которых ремонты не запланированы – 25%; затрат (у.е.) на выполнение плановых ремонтов ЕО – 75% (с учетом того, что год планирование не является годом К ни для одной из ЕО);

3) распределить обе составляющие суммарных годовых затрат (у.е.) по месяцам календарного графика ППР (табл. 4) с учетом их назначения. В рассматриваемом примере месяцев без ремонта 8 (1, 3, 5-7, 9, 11-12). Между ними условно равномерно распределяются 25% суммарного ремонтного фонда энергокомпании, предназначенного для выполнения О, УО, ТО ЕО СЭС. Ремонтная составляющая в объеме 75% распределяется между месяцами с запланированным ремонтом пропорционально количеству ремонтируемых ЕО;

4) для графика ремонтов «по техническому состоянию» по определенным индивидуальным значениям J ЕО (табл. 5) с применением зависимости $C_{у.е.} = -k \cdot J + C_0$ (рис. 1) произвести корректировку годовых затрат (у.е.) на их содержание. Затраты на содержание ЕО, для которых J не определен, находятся как для ППР из расчета 100%;

5) рассчитать ремонтную составляющую годового суммарного фонда в у.е. для стратегии «по техническому состоянию» всех ЕО СЭС, используя скорректированные по J значения $C_{у.е.}$;

6) дополнить ремонтную составляющую «по техническому состоянию» составляющей затрат на выполнение О, УО, ТО ЕО (25%, аналогично ППР) и распределить полученный фонд по месяцам скорректированного календарного графика (рис. 4) с учетом их назначения;

7) построить диаграммы для сравнения суммарных годовых затрат в у.е. на реализацию каждой из альтернативных стратегий ТОиР ЭО СЭС.

На рис. 3-б представлены диаграммы с изображением суммарных затрат на содержание ЭО СЭС по месяцам календарного графика ТОиР при реализации альтернативных стратегий ППР и «по техническому состоянию». Концентрической окружностью здесь показана динамика изменения затрат при равномерном ежемесячном распределении годового ремонтного фонда.

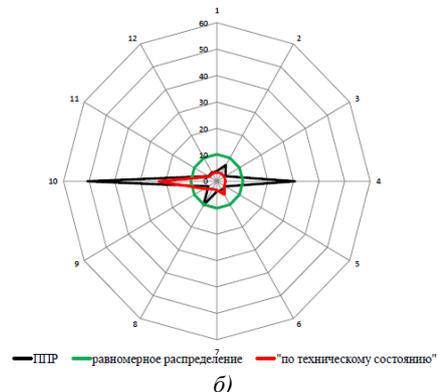
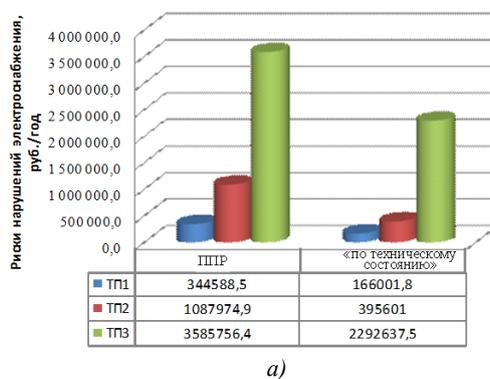


Рис. 3 Результаты оценки: рисков нарушений электроснабжения потребителей СЭС – а; суммарных годовых затрат на ТОиР ЭО – б

Fig. 3 Results of the risks assessment of power supply disruption to consumers of SPS – a; the total annual costs of electrical equipment M&R – b

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Подобная графическая интерпретация распределения суммарного фонда

предстоящей ремонтной компании с применением различных стратегий весьма информативна, так как наглядно демонстрирует плотность соответствующего графика, интенсивность технических воздействий и объемы сопутствующих затрат.

Разработанная авторами методика базируется на исчерпывающем наборе исходных данных, входящих в состав НСИ. К ним принадлежит и статистическая информация о надежности оборудования электрохозяйств потребителей. Обеспечение достоверности вероятностных оценок надежности, их всестороннее соответствие индивидуальным характеристикам эксплуатируемого ЭО является наиболее предпочтительным условием эффективного применения разработанной методики. Указанные задачи успешно решаются применительно к высоковольтному [19] и низковольтному [20] оборудованию систем электроэнергетики, расширяя возможности методики. Разработанная методика объединяет критерии и механизмы для сравнения альтернативных стратегий управления ТОиР оборудования и выбора из них наиболее эффективной. Это гарантирует корректную сопоставимость результатов даже в условиях применения среднестатистических данных о безотказности и ремонтпригодности ЕО разного типа (при отсутствии более актуальных данных).

Предложенная многошаговая процедура решения комплексной задачи сопоставления альтернативных стратегий ТОиР ЭО СЭС позволяет собственникам активов осуществить осознанный выбор в пользу той, которая наиболее соответствует целевым приоритетам энергокомпании.

Заключение (Conclusions)

Разработанная методология по сравнению стратегий ТОиР ЭО энергокомпании с применением риск-ориентированного подхода отличается многоаспектным характером и не ограничена какой-либо одной частной ситуацией. В основу сравнения положены единые критерии эффективности процессов управления активами предприятия. Универсальность методологии заключается в том, что её модели и алгоритмы применимы для любой из рассматриваемых стратегий ТОиР.

Сформулированные методологические положения иллюстрирует конкретный пример, имитирующий применение методологии на практике, позволяющий количественно сопоставить альтернативные стратегии и обеспечить принятие решений на основе всесторонней оценки информации в условиях реальных ограничений. Принятый в статье горизонт планирования в один календарный год не является ограничивающим фактором и может быть при необходимости расширен, например до трех или пяти лет. Многие методологические аспекты решения комплексной задачи в рассмотренном практическом примере из-за ограничений по объему статьи представлены упрощенно, некоторые из них нуждаются в дальнейшем осмыслении и поиске более точной интерпретации.

С учетом всего вышесказанного следует констатировать, что авторами получен и представлен на обсуждение универсальный методологический инструмент, позволяющий энергокомпании на стадии принятия решений обосновать выбор наиболее эффективной стратегии управления союственными производственными активами.

Литература

1. Багрянов А.С., Гаранин П.А. Система планово-предупредительных ремонтов // *Инновации, наука, образование*. 2020. № 22. С.196-200.
2. Планово-предупредительный ремонт (ППР) Доступно по: <https://neftegaz.ru/tech-library/remont/141440-planovo-predupreditelnyy-remont-ppr/#>. (дата обращения 05.06.2023).
3. Грабчак Е.П. Надежное электроснабжение – это приоритет для всех энергетиков // *Энергетическая политика*. 2021. № 7 (161). С. 4-9. doi: 10.46920/2409-5516_2021_7161_4.
4. Антоненко И.Н. Методология РСМ: Ретроспектива и перспектива надёжно-ориентированного технического обслуживания // *Энергия единой сети*. 2019. № 1 (43). С.34-46.
5. Levin V. M. Innovative solutions for risks management of power supply disruptions to oil production consumers / V. M. Levin, N. P. Guzhov, D. A. Boyarova. – DOI 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016995. – Text: electronic // *International Multi-Conference in Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON–2022)*; proc., Novosibirsk-Yekaterinburg? 11-13 Nov. 2022. – IEEE, 2022. – P. 2070-2075. Available by: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10016995> (access data: 05.06.2023). – ISBN 968-1-6654-6480-2.
6. Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. К вопросу об управлении ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию // *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 2022. Т.24. №1. С. 39-51. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.
7. Боярова Д.А. Индекс технического состояния для оборудования 0,4-6(10) кВ энергообъектов нефтедобычи. В сб. XV Всероссийской научной конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 6–10 декабря 2021. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2021. Ч. 4. С. 7-12.
8. Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A. et al. Optimization of impacts parameters on the

equipment of electrical networks during operation according to the technical condition. 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1089. 2021, 012017. doi: 10.1088/1757-899X/1089/1/012017.

9. Diagnostic-base maintenance: A strategy for success. – Available by:

<https://www.mapfreglobalrisks.com/en/risks-insurance-management/article/diagnostic-base-maintenance-a-strategy-for-success/> (access data: 05.06.2023).

10. Разумов Р.В., Михайлов А.В., Соловьев М.Ю. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования. Доступно по: <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16> (дата обращения 05.06.2023).

11. Обоскалов В. П. Проблемы расчета структурной надежности систем электроснабжения с использованием вероятностного эквивалентирования // *Электричество*. 2015. № 12. С. 4-12.

12. Ndawula, M.B., Djokic, S.Z., Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. *Energies*. 2019. 12, 531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>.

13. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б., Петров В.С. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении // *Экономика региона*. 2017. №13(3). С. 847–858. doi: 10.17059/2017–3–17.

14. Черезов А.В. Надежность электроснабжения – наша приоритетная задача // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*. 2019. 3(54), май–июнь. С. 6-13.

15. Ilyin A, On the Relevancy of Taking into Account the Consumers Importance Score in Reliability Management of Power Supply. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021). Advances in Engineering Research. V. 213. P. 168-172.

16. Дронова Ю.В., Черненко Н.А., Тихонова Д.А. Анализ достоверности применения условных единиц в оценке эффективности электросетевых компаний // *Энергетические системы*. 2019. № 1. С. 119-127.

17. Тимофеев А.В. Современные методы разработки нормативов численности персонала в электроэнергетике // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2011. № 5. С. 21-29.

18. Latipov S.T., Aslanova G.N., Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers. E3S Web of Conferences 139, 01037 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037>.

19. Сухарев Д.Ю. Оценка резервов повышения эффективности систем технического обслуживания и ремонта высоковольтного электрооборудования промышленных предприятий // *Экономика промышленности*. 2023. 16 (2). С. 190–200. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-2-190-200>.

20. Петрова Р.М, Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 93-105.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

Гужов Николай Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

Боярова Диана Андреевна – аспирант, Новосибирского государственного технического университета.

References

1. Bagryanov A.S., Garanin P.A. Sistema planovo-predupreditel'nykh remontov // *Innovatsii, nauka, obrazovanie*. 2020. № 22. S.196-200. (In Russ).

2. Planovo-predupreditel'nyi remont (PPR) Dostupno po: <https://neftegaz.ru/tech-library/remont/141440-planovo-predupreditelnyy-remont-ppr/#>. (data obrashcheniya 05.06.2023). (In Russ).

3. Grabchak E.P. Nadezhnoe elektro-snabzhenie – eto prioritet dlya vsekh energetikov // *Energeticheskaya politika*. 2021. № 7 (161). S. 4-9. doi: 10.46920/2409-5516_2021_7161_4. (In Russ).

4. Antonenko I.N. Metodologiya RSM: Retrospektiva i perspektiva nadezhnostno-orientirovannogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya // *Energiya edinoi seti*. 2019. № 1 (43). S.34-46. (In Russ).

5. Levin V. M. Innovative solutions for risks management of power supply disruptions to oil production consumers / V. M. Levin, N. P. Guzhov, D. A. Boyarova. – DOI 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016995. – Text: electronic // International Multi-Conference in Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON–2022): proc., Novosibirsk–Yekaterinburg, 11-13 Nov. 2022. – IEEE, 2022. – P. 2070-2075. Available by: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10016995> (access data: 05.06.2023). – ISBN 968-1-6654-6480-2.

6. Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A. K voprosu ob upravlenii remontami elektrooborudovaniya neftedobychi so strategiei po tekhnicheskomu sostoyaniyu // *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2022. Т.24. №1. S. 39-51. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51. (In Russ).

7. Boyarova D.A. Indeks tekhnicheskogo sostoyaniya dlya oborudovaniya 0,4-6(10) kV energoob"ektov nefte dobychi. V sb. XV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsiya molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologii. Innovatsii» 6–10 dekabrya 2021. Novosibirsk. Izd-vo NGTU, 2021. Ch. 4. S. 7-12. (In Russ).
8. Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A. et al. Optimization of impacts parameters on the equipment of electrical networks during operation according to the technical condition. 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1089. 2021, 012017. doi: 10.1088/1757-899X/1089/1/012017.
9. Diagnostic-base maintenance: A strategy for success. – Available by: <https://www.mapfreglobalrisks.com/en/risks-insurance-management/article/diagnostic-base-maintenance-a-strategy-for-success/> (access data: 05.06.2023).
10. Razumov R.V., Mikhailov A.V., Solov'ev M.Yu. Sistemy monitoringa vysokovol'tnogo energeticheskogo oborudovaniya. Dostupno po: <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16> (data obrashcheniya 05.06.2023). (In Russ).
11. Oboskalov V. P. Problemy rascheta strukturnoi nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem veroyatnostnogo ekvivalentirovaniya // *Elektrichestvo*. 2015. № 12. С. 4-12. (In Russ).
12. Ndawula, M.B., Djokic, S.Z., Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. *Energies*. 2019. 12, 531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>.
13. Lesnykh V.V., Timofeeva T.B., Petrov V.S. Problemy otsenki ekonomicheskogo ushcherba, vyzvannogo pereryvami v elektrosnabzhenii // *Ekonomika regiona*. 2017. №13(3). S. 847–858. doi: 10.17059/2017–3–17. (In Russ).
14. Cherezov A.V. Nadezhnost' elektrosnabzheniya – nasha prioritelnaya zadacha // *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredelenie*. 2019. 3(54), mai–iyun'. S. 6-13. (In Russ).
15. Ilyin A, On the Relevancy of Taking into Account the Consumers Importance Score in Reliability Management of Power Supply. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021). Advances in Engineering Research. V. 213. P. 168-172.
16. Dronova Yu.V., Chernenko N.A., Tikhonova D.A. Analiz dostovernosti primeneniya uslovykh edinitv v otsenke effektivnosti elektrosetevykh kompanii // *Energeticheskie sistemy*. 2019. № 1. S. 119-127. (In Russ).
17. Timofeev A.V. Sovremennyye metody razrabotki normativov chislenosti personala v elektroenergetike // *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2011. № 3. S. 21-29. (In Russ).
18. Latipov S.T., Aslanova G.N., Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers. E3S Web of Conferences 139, 01037 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037>.
19. Suharev D.Yu. Ocenka rezervov povysheniya effektivnosti sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vysokovol'tnogo elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatij // *Ekonomika promyshlennosti*. 2023. 16 (2). S. 190–200. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-2-190-200>. (In Russ).
20. Petrova R.M, Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Valtchev S., Yousef I. Issledovanie veroyatnostnykh harakteristik nadezhnosti elektrooborudovaniya vnutricekhovykh sistem elektrosnabzheniya // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2023. T. 15. №1 (57). S. 93-105. (In Russ).

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University.

Nikolay P. Guzhov – Novosibirsk State Technical University.

Diana A. Boyarova – Novosibirsk State Technical University.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено

13.06.2023 г.

Отредактировано

13.09.2023 г.

Принято

27.10.2023 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 697.34

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-6-43-53

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГОРОДСКИХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ

Горинов Ю.А., Анисимов П.Н., Егошин Е.В.

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия
GorinovYA@volgatech.net

Резюме: ЦЕЛЬ работы заключается в повышении эффективности функционирования централизованных городских систем теплоснабжения путем модернизации индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). В статье рассмотрена актуальность вопросов функционирования систем централизованного теплоснабжения с открытым водоразбором. Предложены технические решения, повышающие эффективность работы ИТП с приставкой на горячее водоснабжение. Разработана технологическая схема, выполнен подбор оборудования ИТП. Приведено обоснование применения разработанных технических решений в виде основных технико-экономических, инвестиционных показателей. Объективность определения технико-экономического эффекта модернизации ИТП обеспечена сравнением полученных показателей модернизированного и аналогичных ему объектов. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применены методы: натурных испытаний на реальном объекте; обработки экспериментальных данных с применением прикладных программ; технико-экономического обоснования в коммунальной теплоэнергетике. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены следующие технические показатели в результате внедрения разработанных технических решений модернизации индивидуальных тепловых пунктов в многоквартирных домах г. Йошкар-Олы: достигнуто снижение расхода сетевой воды на 36 – 39 %; снижение среднегодовой температуры в обратном трубопроводе составило 2,9 °С (с 52,2 °С до 49,3 °С); теплосодержание горячей воды составило 0,136 Гкал/м³ (норматив - 0,068 Гкал/м³), при этом требуемая циркуляция теплоносителя в системе горячего водоснабжения обеспечена в полном объеме. Суммарные потери тепловой энергии в сетях за период с октября 2021 г. по сентябрь 2022 г. составляют 3486,4 Гкал или 11,4 % от отпущенной потребителю теплоты при нормативе 13 %, установленным тарифом. По сравнению с домом-аналогом без системы управления погодным регулированием (СУПР) потребление тепловой энергии за отопительный сезон снижено на 80 Гкал (10,9 %). ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Впервые для применения в открытой схеме присоединения к централизованному источнику потребителей разработана схема ИТП с возможностью регулирования расхода циркуляционной воды системы ГВС и установкой гидроэлеватора с погодным регулированием. Применение разработанного технического решения модернизации ИТП актуально для систем с открытым водоразбором. В результате выполнения экспериментальных исследований выявлено влияние совместной установки насоса и регулирующего клапана на линии рециркуляции ГВС перед узлом смешения рециркуляции ГВС с обратным трубопроводом системы отопления и гидроэлеватора с погодным регулированием. Результаты исследования могут быть использованы при выборе схемных решений модернизации ИТП и обосновании оптимальных технико-экономических показателей рассматриваемых вариантов. Опыт эксплуатации показал, что применение разработанной технологической схемы ИТП с открытым присоединением систем ГВС имеет следующие положительные эффекты: снижение расхода сетевой воды, снижение температуры в обратном трубопроводе тепловой сети, уменьшение тепловых потерь; улучшение циркуляции теплоносителя в системе ГВС; снижение потребления тепловой энергии в период «нижней» срезки температурного графика; сдерживание роста отпускных тарифов на тепловую энергию.

Ключевые слова: энергетические системы и комплексы; централизованная система теплоснабжения с открытым водоразбором; индивидуальный тепловой пункт; система горячего водоснабжения; погодное регулирование; экономическая эффективность.

Для цитирования: Горинов Ю.А., Анисимов П.Н., Егосин Е.В. Модернизация городских индивидуальных тепловых пунктов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 43-53. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-43-53.

MODERNIZATION OF LOCAL HEAT DISTRIBUTION STATIONS OF CITY HEAT SUPPLY SYSTEM

Gorinov Yu.A., Anisimov P.N., Egoshin E.V.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

GorinovYA@volgatech.net

Abstract: The **PURPOSE** of this work is to develop technical solutions to increase the efficiency of functioning of centralized urban heating systems by modernizing local heat distribution stations. The article considers the issues of functioning of district heating systems with open water intake. The work presents technical solutions that increase the efficiency of the local heat distribution station with a hot water supply unit. A technological scheme has been developed, the selection of equipment has been made. The feasibility of using the developed technical solutions is confirmed by technical, economic and investment indicators. The objectivity of determining the technical and economic effect of the modernization of the local heat distribution station is ensured by comparing the obtained indicators of the modernized and similar facilities. **METHODS.** To fulfill the objectives of the study, the following methods were applied: full-scale tests on a real object; processing of experimental data using application programs; feasibility study in the municipal heat power industry. **THE RESULTS** show an improvement in the technical and economic performance of the heating and hot water supply system of an apartment building in Yoshkar-Ola city: reduced network water consumption by 36–39%; temperature drop in the return pipeline was 13.5%; the heat content of hot water has been reduced to 0.168 Gcal/m³ (normative heat content is 0.145 Gcal/m³), the required circulation was ensured in all risers of the hot water supply system. The total losses from October 2021 to September 2022 are 3486,4 Gcal or 11.4% of heat supplied to consumers, which is less than 13% set by the tariff. Compared to a similar house without a regulation depending on the outside air temperature, the consumption of thermal energy during the heating season is reduced by 80 Gcal (10.9%). **CONCLUSION.** The new scheme of a local heat distribution station has been proposed, including the regulation of domestic hot water (DHW) recirculation, as well as the installation of a hydroelevator with weather regulation. The developed technical solution is relevant for district heating systems with open water intake. For the first time, an experimental study of the effect of the joint installation of the following equipment was carried out: a pump and a control valve on the DHW recirculation line before the recirculation mixing unit with the return pipeline of the heating system; hydraulic elevator with weather regulation. The results of the study can be used in the feasibility study of similar circuit solutions for the modernization of DHW systems. Operating experience has shown that the application of the developed technological scheme of local heat distribution station has positive effects: reduction of network water consumption, temperature in the return pipeline and heat losses; improvement of circulation in all risers of the DHW system; reduction of thermal energy consumption during the period of the “lower” cutoff of the temperature graph; curbing the growth of tariffs for thermal energy.

Keywords: energy systems, centralized heating system with open water intake, local heat distribution station, hot water supply system, regulation depending on the outside air temperature, economic efficiency.

For citation: Gorinov Yu.A., Anisimov P.N., Egoshin E.V. Modernization of local heat distribution stations of city heat supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (6): 43-53. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-43-53.

Введение (Introduction)

В России исторически сложилась система централизованного теплоснабжения, включающая в себя свыше 50 тыс. локальных систем теплоснабжения различного уровня [1]. Подключение систем теплопотребления зданий к тепловым сетям осуществляется через тепловые пункты [2]. Почти половина всех локальных систем теплоснабжения являются

открытыми, т.е. из трубопроводов теплосети теплоноситель идет не только в системы отопления и вентиляции подключенных потребителей, а и в системы горячего водоснабжения для нужд потребителя. Водоразбор из системы горячего водоснабжения может быть полным (тупиковая схема) или частичным (циркуляционная схема) [3, 4]. Основными преимуществами выбора открытой системы теплоснабжения, в сравнении с закрытой, являются: меньшие капитальные затраты на прокладку тепловых сетей; централизованная водоподготовка на источнике тепла; более высокая квалификация персонала, эксплуатирующего оборудование. Наряду с преимуществами открытая система теплоснабжения имеет и недостатки, например, ухудшающееся по мере выхода из источника тепла санитарно-гигиенические показатели воды [5]. Сетевая вода, прежде чем попасть на водоразборные краны системы горячего водоснабжения, проходит через трубопроводы тепловых сетей, тепловой узел, трубопроводы и отопительные приборы системы, трубопроводы и оборудования системы вентиляции и т.д. При этом приобретает специфический запах, цвет, вкус, в воде появляются различные посторонние примеси, в зонах с низкой скоростью потока возможно образование бактерий. Существенным недостатком открытой системы является то, что необходимо постоянно регулировать гидравлический режим работы источника тепла по причине переменного расхода сетевой воды в системе теплоснабжения, который является следствием неравномерности водопотребления горячей воды. В результате располагаемый напор в тепловой сети перед тепловыми пунктами зданий не постоянен, что приводит к «недотопу» или «перетопу» потребителей в течении суток, требуется установка технических устройств, обеспечивающих постоянный расход воды в системе отопления [6].

Одним из способов обеспечения постоянного расхода теплоносителя в системе отопления является подключение по независимой схеме. Подавляющее большинство систем теплоснабжения жилых и социально-значимых зданий в стране подсоединены к тепловым сетям по зависимой схеме, являющейся более простой по сравнению с независимой. Сложность независимой схемы присоединения обусловлена необходимостью монтажа подогревателя, также требуется установка циркуляционных насосов системы отопления и системы горячего водоснабжения, регулирующих клапанов, расширительного бака, организация подпитки системы отопления по обводной линии из обратного трубопровода тепловой сети, подача холодной воды из городской сети с установкой обратного клапана, регулятора давления, насоса. Все это приводит к значительному удорожанию затрат на монтаж и эксплуатацию оборудования. Как правило, жилищно-эксплуатирующие организации не имеют в своем штате квалифицированного персонала для качественного обслуживания установок, поэтому вынуждены привлекать специалистов со стороны. А это приводит к росту тарифов на содержание общедомового имущества и вызывает справедливое недовольство граждан. Опыт эксплуатации показал, что с применением современных приборов регулирования появляются ранее технически невозможные способы повышения эффективности работы схем подключения систем теплоснабжения к тепловым сетям по зависимой схеме с открытым водоразбором на горячее водоснабжение.

Требованиями СанПиН установлены требования диапазона допустимых значений температуры горячей воды на водоразборном кране потребителя – от 60 °С до 75 °С. С целью выполнения указанного требования вынуждено устанавливается повышенная, по сравнению с расчетной, циркуляция в системе горячего водоснабжения [7]. В итоге температура воды в циркуляционном трубопроводе на выходе из системы ГВС превышает расчетные 50 °С, и как следствие расчетную температуру согласно температурному графику отпуска тепла в обратном трубопроводе тепловой сети. Завышение температуры в обратном трубопроводе может привести к повышенным потерям в тепловых сетях, а также снижает эффективность возможного применения альтернативных и вторичных источников энергии для нагрева сетевой воды [8, 9]. Повышение температуры ГВС выше минимально допустимой 60 градусов является невыгодным для ресурсоснабжающей организации, поскольку расчеты ведутся по расходомеру и не учитывают остывание теплоносителя в трубопроводах контура рециркуляции, а также в полотенцесушителях санузлов. Исходя из этого оптимальными будут температуры: в подающем трубопроводе 60 °С и 50 °С в циркуляционном.

Следует отметить, что в начале температурного графика отпуска тепла в переходный период (в начале и в конце отопительного сезона), температура циркуляционной воды из систем горячего водоснабжения повышает температуру сетевой воды в обратке. При понижении температуры наружного воздуха до минус 7 °С, происходит выравнивание температуры циркуляции ГВС и температуры обратки. При дальнейшем понижении

температуры наружного воздуха циркуляционная вода из системы ГВС, наоборот несколько понижает температуру сетевой воды в обратном трубопроводе тепловой сети.

С 1 января 2013 года согласно ст. 29 ФЗ-190 «О теплоснабжении» при подключении к централизованным системам теплоснабжения должна использоваться закрытая схема присоединения систем горячего водоснабжения, исключая водоразбор из теплосети на нужды ГВС. Также было установлено требование о переводе существующих открытых систем на закрытые. Специалисты энергетической и жилищно-коммунальной отрасли активно подключились к обсуждению. Был предложен индивидуальный подход к установлению сроков перехода от открытых систем к закрытым с учетом технико-экономического обоснования и технического состояния систем, их способности выполнения требований по качеству, надежности и безопасности горячего водоснабжения. При этом все расходы так или иначе будут отражены в тарифе на тепловую энергию.

Учитывая опыт эксплуатации и особенности систем теплоснабжения в нашей стране, многие специалисты считают наиболее экономически целесообразным модернизацию существующих открытых систем теплоснабжения [10-13]. В работах отмечено, что особую актуальность и первостепенную народнохозяйственную значимость имеет решение задач повышения надежности и эффективности функционирования систем теплоснабжения всех уровней. Необходимо решить имеющиеся проблемы рационального использования топлива, материалов, трудовых ресурсов, повышения энергосбережения, улучшения экологии, обеспечения снабжения энергоресурсами населения на требуемом уровне. Разработка технических решений модернизации существующих индивидуальных тепловых пунктов за счет установки автоматики регулирования, применения современных приборов и оборудования направлена на решение поставленной задачи повышения эффективности, надежности и уровня эксплуатации централизованных систем теплоснабжения с открытым водоразбором [14, 15].

Цель представленного исследования заключается в повышении эффективности функционирования централизованных городских систем теплоснабжения путем модернизации индивидуальных тепловых пунктов.

Научная значимость исследования состоит в полученных результатах экспериментального исследования влияния на эффективность работы ИТП совместной работы дополнительно установленного насоса и регулирующего термодвухходового клапана на рециркуляционном трубопроводе горячего водоснабжения, электронного элеватора, позволяющего выполнять погодное регулирование температуры в системе отопления. Эмпирические данные, изложенные в статье, по мнению авторов, получены впервые для предложенной схемы регулирования рециркуляции горячего водоснабжения и могут быть использованы для сопоставления эффективности различных способов снижения потерь тепловой энергии в централизованных городских системах теплоснабжения.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные технические решения модернизации ИТП позволяют повысить эффективность работы ИТП и технико-экономические показатели системы централизованного теплоснабжения в целом. Это достигается за счет снижения расхода теплоносителя в системе теплоснабжения, снижения температуры сетевой воды в обратном трубопроводе, снижения тепловых потерь, улучшения циркуляции в системе ГВС, исключения «недотопов» и «перетопов» системы теплоснабжения многоквартирного дома.

Материалы и методы (Materials and methods)

В основе исследования лежит метод натурального эксперимента на реальных действующих объектах – тепловых пунктах многоквартирных жилых домов города Йошкар-Ола. Для модернизации схем применяется серийно выпускаемое промышленностью оборудование. Для измерений были задействованы приборы коммерческого учета тепловой энергии и теплоносителя. Экспериментальные данные собирались в течение отопительного периода.

Технические решения модернизации теплового узла были реализованы в два этапа: на I этапе – установка на циркуляционном трубопроводе горячего водоснабжения до врезки в обратный трубопровод регулирующего клапана и насоса; на II этапе – установка гидроэлеватора *IRBICOM REX* взамен существующего гидроэлеватора с нерегулируемым соплом. Схемы теплового узла реализации первого и второго этапов модернизации приведены на рисунке 1.

Схема теплового узла с элеватором до модернизации приведена на рис. 1 Горинов Ю.А., Анисимов П.Н. 2022г [16].

Оценка результатов внедрения выполнена путем анализа экспериментальных данных. Фактические данные получены на основании установленных в

многоквартирных домах показаний коммерческих приборов учета. Также были дополнительно установлены самопишущие измерители ИС-201. Все приборы допущены для ведения коммерческих и технических расчетов на основании свидетельств о ежегодной поверке.

Модернизация ИТП на I этапе выполнена на базе термостатических смесительных клапанов *Zeissler* и циркуляционных насосов *Jemix WRS-25/8-180* (схема 1 на рис.1).

Характеристика клапана *Zeissler*:

- смесительный 3-х ходовой с функцией перевода в режим 2-х ходового;
- регулирование температуры 20 – 55 °С;
- регулирование настройки температуры выставлением положения рукоятки от «1» до «6».

По результатам эксплуатации модернизированных тепловых узлов выявлены следующие особенности и рекомендации:

- клапан на всех режимах работает устойчиво, амплитуда колебаний температуры в циркуляционной линии ГВС не превышает 3 – 4 °С;
- жалобы от жителей потребителей на низкую температуру горячей воды и шум не поступали;
- фактически верхняя граница диапазона регулирования температур при использовании клапана достигает 60 – 63 °С (при заявленном в техническом руководстве производителя диапазоне регулирования клапана 20 – 55 °С);

схема 1

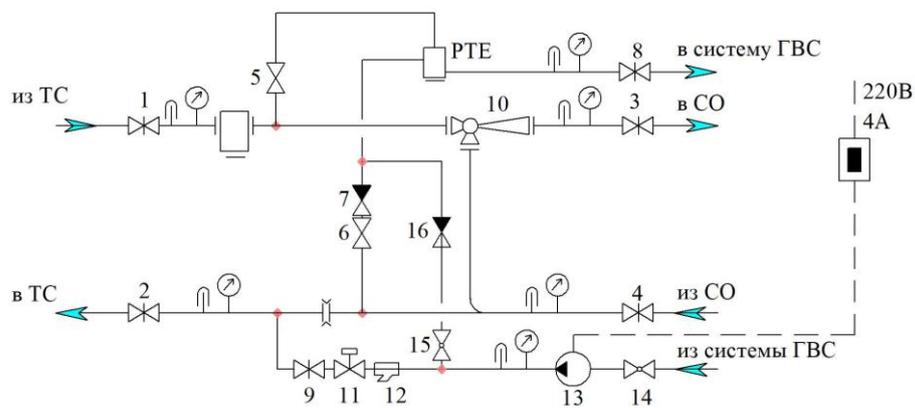


схема 2

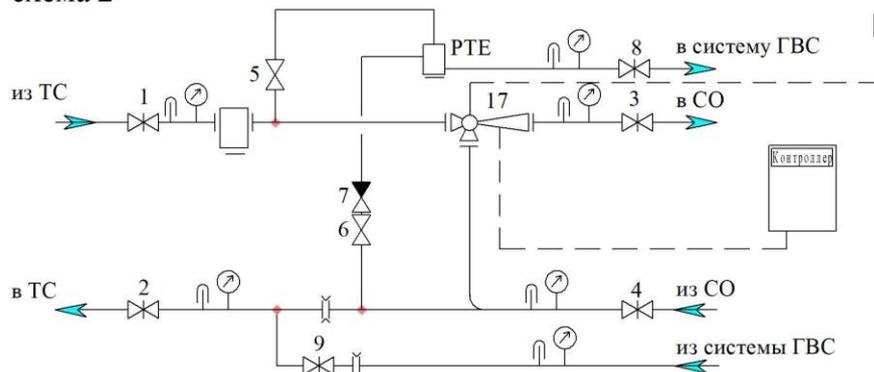


Рис. 1. Схемы теплового узла I-го (схема 1) и II-го (схема 2) этапа модернизации: 1,2,3,4,5,6,8,9,14, 15 – запорная арматура; 7 и 16 – обратный клапан; 10 – гидравлический элеватор; 11 – термостатический клапан; 12 – сетчатый фильтр; 13 – циркуляционный насос; 17 – гидроэлеватор *Irbicom REX* с датчиком температуры наружного воздуха и контроллером

Fig. 1. Scheme of the thermal unit II stage of modernization 1,2,3,4,5,6,8,9,14,15 – stop valves; 7 and 16 – check valve; 10 – hydraulic elevator; 11 – thermostatically controlled valve; 12 – meshed strainer; 13 – recycling pump; 17 – *Irbicom REX* hydraulic elevator with outside air temperature sensor and controller

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

- рекомендована установка в положение «5» по руководству эксплуатации;
- в нескольких тепловых пунктах зданий клапаны преждевременно вышли из строя по причине загрязнения;

- рекомендуется установить непосредственно перед клапаном сетчатый фильтр;
 - байпас регулирующего клапана из схемы рекомендуется исключить.
- Краткая характеристика циркуляционного насоса Jemix WRS-25/8-180:
- производительность - до 120 л/мин;
 - температура жидкости до +110°C;
 - высота подъема – 25 м вод. ст.;
 - номинальная мощность – 135 Вт.

Модернизация ИТП II-го этапа выполнена с применением системы управления погодного регулирования (СУПР) на базе гидроэлеватора Irbicom REX с датчиком температуры наружного воздуха и контроллером (схема 2 на рис.1).

Анализ результатов и их обсуждение

Достоверность результатов экспериментов и выводов обеспечивается: использованием измерительных приборов, предназначенных для коммерческого учета тепловой энергии и теплоносителя, прошедших поверку в установленном порядке; проведением контрольных измерений на аналогичном модернизируемому объекте (два одинаковых МКД расположенных в одном микрорайоне города Йошкар-Ола и построенных в одном и том же году); сравнительной оценкой результатов измерений в модернизированном тепловом пункте и аналогичном не модернизированном; сравнением показателей с нормативными значениями.

Мероприятия I этапа

В результате анализа данных 20 - ти общедомовых приборов учета многоквартирных домов до и после модернизации тепловых узлов, установлено снижение температуры воды в циркуляционном трубопроводе системы ГВС (рис. 1) с 56 до 50 °С, снижение расходов сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе в среднем 36-39 % при одновременном увеличении на 15,68 %. разности расходов теплоносителя, обусловленной водоразбором на нужды ГВС. Фактическая тепловая составляющая в ГВС уменьшилась с 0,194 до 0,136 Гкал/м³ при нормативе 0,068 Гкал/м³. Сравнение производилось по результатам сравнения показаний за полный месяц в 2021 году – за июль до модернизации и за август после модернизации. Снижение температуры в циркуляционном трубопроводе способствует снижению тепловых потерь. В результате технического решения снижена «паразитная» циркуляция теплоносителя в системе ГВС.

Разработанное и опробованное техническое решение модернизации теплового узла может быть рекомендовано к внедрению, применительно к индивидуальным тепловым пунктам жилых МКД, присоединенных к централизованной системе теплоснабжения с открытой схемой присоединения системы горячего водоснабжения.

Полученный опыт монтажа и эксплуатации разработанной схемы модернизации ИТП с приставкой ГВС рекомендован к дальнейшему внедрению в МКД по городу Йошкар-Ола. Экспериментальная апробация технического решения модернизации теплового узла и системы горячего водоснабжения подтвердила улучшение технико-экономических показателей работы теплового узла.

На основании анализа данных общедомовых приборов учета сделан расчет срока окупаемости, который составляет 40 суток. В результате полностью исключены «перетопы» в системе отопления в отопительный сезон в зоне нижней срезки графика отпуска тепла, что снижает платежи за отпущенную тепловую энергию.

Мероприятия II этапа

Для сравнительного анализа эффективности модернизации элеваторного ИТП при помощи внедрения СУПР были выбраны дома в г. Йошкар-Ола, микрорайон. «Дубки», ул. Героев Сталинградской битвы (ГСБ) д. 29А, 29Б. Данные МКД построены в 1968 г по одному типовому проекту, имеют практически одинаковую площадь 3704,2 и 3676,2 соответственно, имеют одинаковые тепловые характеристики ограждающих конструкций, в домах для обеспечения ГВС установлены газовые колонки. Дома оснащены приборами учета тепловой энергии в 2013 году. В ИТП дома ГСБ 29Б установлен обычный не модернизированный гидроэлеваторный тепловой узел (рис. 1 Горин, Анисимов; 2023) [15]. В ИТП дома ГСБ 29А установлен гидроэлеватор Irbicom REX в 2021 году (схема 2 рис. 1). Источником тепла является отопительная котельная № 4 «Дубки», температурный график 115-70 °С, имеющий нижнюю срезку на 70 °С. В результате анализа результатов измерений можно сделать следующие основные выводы.

1. Наибольший экономический эффект от установки СУПР достигается при работе источника тепла в период нижней срезки температурного графика, то есть в переходный осенний и весенний период (рис. 2).

2. В результате за сравниваемый период достигнуто снижение потребления по

отношению:

- к нормативу 18 Гкал (2,7%), 38,6 тыс. руб. с НДС.
- по сравнению с домом-аналогом без СУПР 80 Гкал (10,9 %), 171,4 тыс. руб. с НДС.
- срок окупаемости, при сметной стоимости монтажа гидроэлеватора 139,79 тыс. руб. с НДС менее одного года.

Рост фактического потребления по отношению к нормативу объясняется большей фактической продолжительностью ОЗП в 2021-2022гг (237 сут.) по сравнению с нормативными 214 сут.

В таблице 1 приведены данные о потреблении тепловой энергии на отопление за период с сентября 2021 по ноябрь 2022, при средней температуре рассматриваемого периода $t_{нв} = -0,27\text{ }^{\circ}\text{C}$, общая продолжительность анализируемого периода 310 сут.

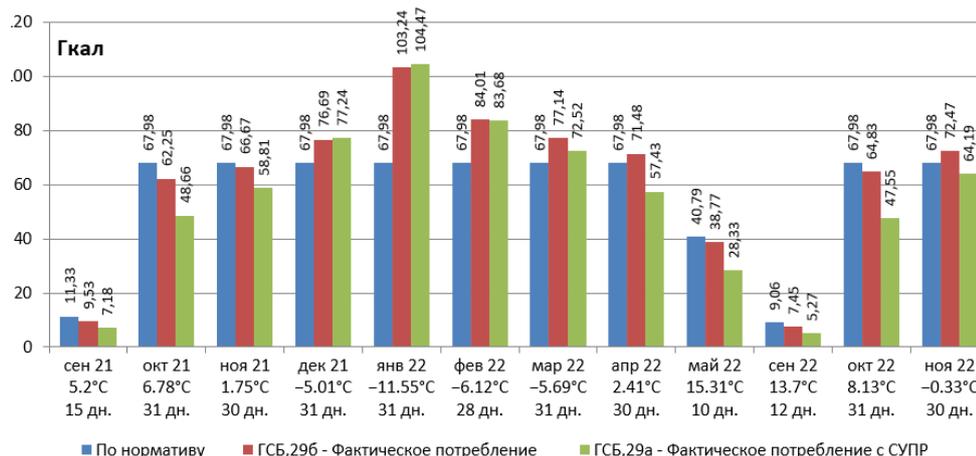


Рис.2 Анализ потребления тепловой энергии по месяцам за период с 09.2021 по 11.2022 Fig. 2 Analysis of heat consumption by months for the period from 09.2021 to 11.2022

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 1
Table 1

Потребление тепловой энергии за период с 09.2021 по 11.2022
Thermal energy consumption for the period from 09.2021 to 11.2022

	Норматив	МКД ГСБ, 29Б	МКД ГСБ,29А
Потребление тепловой энергии, Гкал	673	735	655

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данные по отпуску, потреблению тепловой энергии и анализ тепловых потерь за 12 месяцев представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Данные по отпуску, потреблению и потерям тепловой энергии микрорайона № 3
Data on the release, consumption and loss of thermal energy of the microdistrict No. 3

		Октябрь 2021	Ноябрь 2021	Декабрь 2021	Январь 2022	Февраль 2022	Март 2022
Средняя температура наружного воздуха за анализируемый период, °C		6,67	1,67	-5,28	-11,72	-6,39	-5,77
Отпуск	Итого Отопление и ГВС, Гкал	2 671,735	3 159,675	3 868,478	4 792,070	4 090,412	3 624,267
	ГВС, т	5 643,969	6 494,107	6 429,402	6 537,130	6 652,937	6 065,983
Потребление	Итого суммарное потребление с учетом корректировки небаланса масс, Гкал	2 405,513	2 846,674	3 473,529	4 291,089	3 672,481	3 255,052
Реализация	Итого Отопление и ГВС, Гкал	2 657,960	2 977,738	3 532,464	4 393,088	3 672,459	3 336,990

Продолжение таблицы 2
Continuation of table 2

Потери в тепловых сетях	Фактические (технические) потери Гкал	266,222	313,001	394,948	500,981	417,931	369,215
	% от отпуска	10	9,9	10,2	10,5	10,2	10,2
	Расчетные (нормативные) потери, рассчитанные в системе Zulu, Гкал	143,899	161,044	178,215	214,680	190,912	169,288
	% от отпуска	5,4	5,1	4,6	4,5	4,7	4,7
	Потери отчетные (по реализации), Гкал	13,776	181,936	336,014	398,983	417,953	287,276
	% от отпуска	0,5	5,8	8,7	8,3	10,2	7,9
Средняя температура наружного воздуха за анализируемый период, °С		+2,28	+8,79	+16,88	+18,92	+20,66	+14,59
Отпуск	Итого Отопление и ГВС, Гкал	3 013,400	1 807,853	599,754	872,461	884,167	1 149,213
	ГВС, т	7 560,998	7 230,265	4 439,570	6 236,170	6 146,642	7 102,248
Потребление	Итого суммарное потребление с учетом корректировки небаланса масс, Гкал	2 695,904	1 612,315	489,733	751,931	763,530	995,600
Реализация	Итого Отопление и ГВС, Гкал	2 724,338	1 268,590	475,865	562,372	581,399	863,797
Потери в тепловых сетях	Фактические (технические) потери Гкал	317,496	195,538	110,021	120,530	120,638	153,614
	% от отпуска	10,5	10,8	18,3	13,8	13,6	13,4
	Расчетные (нормативные) потери, рассчитанные в системе Zulu, Гкал	151,948	144,768	88,918	117,345	117,800	129,221
	% от отпуска	5	8	14,8	13,4	13,3	11,2
	Потери отчетные (по реализации), Гкал	289,062	539,263	123,890	310,088	302,768	285,416
	% от отпуска	9,6	29,8	20,7	35,5	34,2	24,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

За 12 месяцев с октября 2021 по сентябрь 2022 г. фактические (технические) тепловые потери составили 10,7 %, а по данным от реализации Теплосбытом 11,4 %, расчетные 5,9 %.

Фактические (технические) потери в микрорайоне № 3 составили от 10 до 18,3 %, выше расчетных на 85 % в октябре, на 94 % в ноябре, на 122 % в декабре, на 133 % в январе, на 119 % в феврале, на 118 % в марте, 109 % в апреле, на 35 % в мае, на 24 % в июне, на 3 % в июле, на 2 % в августе и на 19 % в сентябре.

Потери отчетные по реализации тепловой энергии за рассматриваемый период значительно различаются и составили 0,5 % в октябре, 5,8 % в ноябре, 8,7 % в декабре, 8,3 % в январе, 10,2 % в феврале, 7,9 % в марте, 9,6 % в апреле, 29,8 % в мае, 20,7 % в июне, 35,5 % в июле, 34,2 % в августе и 24,8 % в сентябре. Это связано тем, что по двум домам, не имеющим приборов учета, тепловая энергия за отчетный период предъявлена по нормативу на среднюю температуру наружного воздуха минус 4,7 °С, фактическая температура за сентябрь-ноябрь и апрель была значительно выше, в декабре близка к расчетной, а в январе-марте ниже. Потери отчетные по реализации в мае-июле существенно возросли в связи с тем, что при отключении отопления расчеты за потребленную тепловую энергию с горячей водой осуществляются по нормативу 0,068 Гкал/м³, величина которого значительно ниже

фактического теплосодержания (0,194 Гкал/м³ до модернизации и 0,136 Гкал/м³ после модернизации). Фактические потери тепловой энергии в тепловых сетях микрорайона № 3 в октябре 2021 – апреле 2022 г. ниже значений, установленных тарифом. Коммерческие потери в отопительный период отсутствуют, так как фактические (технические) потери больше отчетных потерь по реализации Теплосбыта. С мая 2022 г. потери по реализации Теплосбыта сильно увеличились и превысили фактические (технические) потери с мая по сентябрь на 861,08 Гкал, что составляет 16,2 % от отпуска. В связи с тем, что в отопительный период коммерческие потери отсутствовали, то общие потери с октября 2021 по май 2022 г. по данным от реализации Теплосбытом составили 9,1 %, но за летний период они увеличиваются за счет коммерческих потерь до 11,4 %. В сентябре 2022 г. потери по реализации Теплосбыта по-прежнему превышают фактические (технические) потери на 131,8 Гкал, что составляет 11,5 % от отпуска. Общие потери с октября 2021 по сентябрь 2022 г. по данным от реализации Теплосбытом составляют 11,4 %.

Данные температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах по прибору учета, установленному на вводе в микрорайон № 3, приведены в табл. 3. Отклонение фактической температуры в обратном трубопроводе относительно утвержденного температурного графика отпуска тепла составляет 1,48 °С.

Таблица 3
Table 3

Температура в подающем и обратном трубопроводе на вводе в микрорайон № 3
The temperature in the supply and return pipelines at the entrance to the microdistrict No. 3

	2022 год											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XII	XII
T1факт	95,57	81,28	85,08	69,96	67,43	67,65	67,37	67,67	68,30	69,05	81,19	92,35
T2факт	51,37	47,50	49,39	45,60	50,17	49,85	50,01	48,98	48,32	47,77	49,92	52,48
T2граф	52	47	48	45	50	50	50	50	50	43	47	51

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализируемый период с 22.09.2021 по 21.09.2022. Результаты расчетов потерь в тепловых сетях наглядно представлены на рисунке 3.

Заклучение (Conclusions)

1. На 18,6 % снижен расход теплоносителя в тепловой сети (расчетное снижение потребления электроэнергии на источнике составляет 129 тыс. кВтч/год, 715,7 тыс. руб./год).

2. На 29,9 % снижен удельный показатель теплосодержания с 0,194 до 0,136 Гкал/м³, что дало увеличение реализации на 5 578 м³ (6,5 %, 985 633 руб. в текущих ценах). Снижение теплосодержания 1 м³, расходуемого на нужды ГВС, увеличивает величину расхода воды потребителями. Следовательно, возрастает реализация химочищенной воды. Расчетное количество теплоты в ГВС также возрастает, т.к. для расчетов с потребителями теплота определяется как произведение расхода воды на норматив теплосодержания 0,068 Гкал/м³.

3. На 2,9 °С (с 52,2 °С до 49,3 °С) снижена температура теплоносителя в обратном трубопроводе тепловой сети (с учетом фактических T1 в сравниваемых периодах).

4. Средняя стоимость материалов на модернизацию одного ИТП составила 20 тыс. руб. в ценах 2021 года.

5. Работоспособность и эффективность предлагаемой схемы подтверждена практической эксплуатацией.



Рис. 3 Анализ тепловых потерь за 12 месяцев Fig. 3 Heat loss analysis for 12 months

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

6. Относительно невысокая стоимость и простота реализации позволяет

рекомендовать ее к массовому применению при модернизации тепловых узлов потребителей с открытой схемой теплоснабжения.

7. Выполненный анализ результатов модернизации тепловых узлов позволяет выявить фактическую структуру тепловых потерь и определить мероприятия по их уменьшению.

Результаты выполненного технико-экономического анализа свидетельствуют о целесообразности использования предлагаемых технических решений модернизации тепловых пунктов путем внедрения устройств регулирования расхода циркуляционной воды системы ГВС совместно с установкой гидроэлеватора с погодным регулированием.

Литература

1. Выдержки из Информационно-аналитического доклада ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, Москва, 2018 г. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015-2016 годы // *Новости теплоснабжения*. 2018. №3(211). С. 8-17.
2. Семенов В.Г. Стратегия развития теплоснабжения и когенерации в Российской Федерации до 2025 года, проект на 2019 год. Доступно по: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140. Ссылка активна на 14 апреля 2022.
3. Xiaofang S., Peng W., Panhong R., Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 54, N06004.
4. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. №1-2. С. 31-40.
5. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 5. С. 71-82.
6. Рафальская Т.А. Мансуров Р.Ш. Оценка влияния температуры воды в системе горячего водоснабжения на температурный режим помещений // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. №4. С.42-49.
7. Семенов В.Г. Нормативы на подогрев горячей воды // *Новости теплоснабжения*. 2018. № 6 (214). С. 8–17.
8. Pieper H., Ommen T.S., Markussen W.B. and Elmegaard B. Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps // *Proceedings of ECOS 2017:30th International Conference of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems; 2–6 July 2017; San Diego, California, USA*.
9. Østergaard D.S., Smith K.M. Tunzi M., Svendsen S. Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review // *Energy*. 2022. Vol. 891. P. 123529.
10. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1683 (4). P. 042017.
11. Rotov P.V., Zhukov D.A., Zhukova A.V., Sivukhin A.A. About economy of fuel and resources in the hot water supply system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. P. 012160.
12. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. М.: *Новости теплоснабжения*, 2008. 446 с.
13. Gazizov F.N., Akhmetova I.G. Development of technique and program for analysis of options for transition to a closed hot-water supply scheme for heat supply systems // *Power Engineering Research Equipment Technology*. 2019. Vol. 21, N3. pp. 126-134.
14. Ротов П.В. Сивухин А.А. Оценка эффективности технологий регулирования нагрузки горячего водоснабжения // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2016. № 6. С. 22-28.
15. П.В. Ротов, А.А. Сивухин, М.А. Ротова, Р.А. и др. Об эффективности управления циркуляцией горячей воды // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. № 5. С. 117-129.
16. Горинов Ю.А., Анисимов П.Н. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. 24(3):101-111. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111>.

Авторы публикации

Горинов Юрий Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», Поволжский государственный технологический университет.

Анисимов Павел Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», Поволжский государственный технологический университет.

Егошин Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», Поволжский государственный технологический университет.

References

1. Vyderzhki iz Informacionno-analiticheskogo doklada FGBU «Rossijskoe jenergeticheskoe agentstvo» Minjenergo Rossii, Moskva, 2018 g. Teplojenergetika i centralizovannoe teplosnabzhenie Rossii v 2015-2016 gody. *Novosti teplosnabzhenija*. 2018; 3(211):8-17. (In Russ).

2. Semenov V.G. Strategija razvitiya teplosnabzheniya i kogeneracii v Rossijskoj Federacii do 2025 goda, proekt na 2019 god. Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140. Accessed: 14 Apr 2022. (In Russ).
3. Xiaofang S., Peng W., Panhong R., Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 54 (06004). doi:10.1051/mateconf/20165406004
4. Zvonareva Ju.N., Van'kov Ju.V. Work of system of heat supply at stage-by-stage introduction of the automated individual thermal points. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19:31-40. (In Russ).
5. Kikot' E.A., Gazizov F.N. Selection of the structure of thermal generation in cities of the Russian federation when actualizing the heat supply schemes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(5): 71-82. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82
6. Rafal'skaja T.A. Mansurov R.Sh. Ocenka vlijanija temperatury vody v sisteme gorjacheho vodosnabzhenija na temperaturnyj rezhim pomeshhenij. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*. 2017; 4: 42-49. (In Russ).
7. Semenov V.G. Normativy na podogrev gorjachej vody. *Novosti teplosnabzhenija*. 2018; 6 (214): 8-17. (In Russ).
8. Pieper H., Ommen T.S., Markussen W.B. and Elmegaard B. Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps. *Proceedings of ECOS 2017:30th International Conference of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems; 2-6 July 2017; San Diego, California, USA*.
9. Østergaard D.S., Smith K.M. Tunzi M., Svendsen S. Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review // *Energy*. 2022. Vol. 891. P. 123529.
10. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1683(4):042017. doi: 10.1088/1742-6596/1683/4/042017
11. Rotov P.V., Zhukov D.A., Zhukova A.V., Sivukhin A.A. About economy of fuel and resources in the hot water supply system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 891(1):012160. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012160.
12. Jakovlev B.V. *Povyshenie jeffektivnosti sistem teplofikacii i teplosnabzhenija*. Moscow: Novosti teplosnabzhenija; 2008. (In Russ).
13. Gazizov F.N., Akhmetova I.G. Development of technique and program for analysis of options for transition to a closed hot-water supply scheme for heat supply systems. *Power Engineering Research Equipment Technology*. 2019;21 (3):126-134. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-3-126-134.
14. Rotov P.V. Sivuhin A.A. Ocenka jeffektivnosti tehnologij regulirovanija nagruzki gorjacheho vodosnabzhenija. *Jenergoberezenie i vodopodgotovka*. 2016; 6:22-28. (In Russ).
15. P.V. Rotov, A.A. Sivuhin, M.A. Rotova, R.A. i dr. On the efficiency of the control of the circulation of hot water. *Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; №22(5):117-129. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-117-129
16. Gorinov Yu.A., Anisimov P.N. Increasing the efficiency of district heating supply systems by local heat distribution station modernation. *Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 24(3): 101-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111>.

Authors of the publication

Yurij. A. Gorinov - Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. *Email:* GorinovYA@volgatech.net

Pavel N. Anisimov - Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. *Email:* AnisimovPN@volgatech.net

Evgenij V. Egoshin - Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. *Email:* EgoshinE.V.@volgatech.net

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы».

Получено 02.11.2023 г.

Отредактировано 17.11.2023 г.

Принято 21.11.2023 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.24

DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В КОЛЬЦЕВОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ ПРИ БЕСКОНЕЧНОМ НАГРЕВЕ

Якимов¹ Н.Д., Шагеев² А.Ф., Дмитриев¹ А.В., Бадретдинова¹ Г.Р.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²КФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной центр) / НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, г. Казань, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, jeremiada@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru

Резюме: На сегодняшний день легко извлекаемые запасы нефти уже добыты, поэтому большой интерес представляют месторождения с остаточными запасами нефти или места со слабой проницаемостью. Известно, что нефть при понижении температуры становится более вязкой, что создает трудности при ее добыче. Следовательно, для снижения вязкости, необходим подогрев нефти до той температуры, при которой возможно реализовать ее добычу. В исследовании предложена математическая модель расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе непрерывного разогрева призабойной зоны пласта, содержащий высоковязкую нефть и природный битум (ВВН и ПБ). **ЦЕЛЬ.** Построить решение нагрева для бесконечно длинного кольцевого слоя во внутрискважинном реакторе. Получить профиль температуры в поперечном сечении кольцевого слоя и картину температурного поля. **МЕТОДЫ.** Уравнения математической модели строятся на основе законов сохранения энергии и массы, их исследование и оценки проводятся с применением аналитических методов теории дифференциальных уравнений, методов теории подобия и размерностей, а также численных методов решения краевых задач. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе проведения исследования были получены зависимости расстояния, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода, линейной плотности теплового потока и теплоемкости смеси. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные исследования позволили получить математическую модель расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе. Полученные результаты показали, что при увеличении массового расхода и теплоемкости смеси расстояние, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе, увеличивается в 1,6 и 1,5 раза соответственно во всем диапазоне температур, а при увеличении линейной плотности теплового потока это расстояние уменьшается в 0,6 раза.

Ключевые слова: пористый слой; температурное поле; бесконечный нагрев; высоковязкая нефть; внутрискважинный реактор.

Для цитирования: Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 54-66. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

FEATURES OF CALCULATING THE TEMPERATURE FIELD IN AN ANNULAR POROUS LAYER UNDER INFINITE HEATING

Yakimov¹ N.D., Shageev² A.F., Dmitriev¹ A.V., Badretdinova¹ G.R.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²KFU, Institute of Geology and Petroleum Technologies / World-class Scientific Center for the Rational Development of liquid hydrocarbon reserves of the planet (head center) / research laboratory of methods for increasing oil recovery, Kazan, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru

Abstract: To date, easily recoverable oil reserves have already been extracted, so deposits with residual oil reserves or places with weak permeability are of great interest. It is known that oil becomes more viscous when the temperature decreases, which creates difficulties in its production. Therefore, to reduce the viscosity, it is necessary to heat the oil to the temperature at which it is possible to realize its production. The study proposes a mathematical model for calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating in a downhole reactor for continuous heating of the bottom-hole zone of a formation containing high-viscosity oil and natural bitumen (HVO and NB). **PURPOSE.** To construct a heating solution for an infinitely long annular layer in a downhole reactor. To obtain a temperature profile in the cross section of the annular layer and a picture of the temperature field. **METHODS.** The equations of the mathematical model are based on the laws of conservation of energy and mass, their study and evaluation are carried out using analytical methods of the theory of differential equations, methods of similarity theory and dimensions, as well as numerical methods for solving boundary value problems. **results.** In the course of the study, the dependences of the distance at which the set air temperature in the reactor is reached at different values of mass air flow, linear heat flux density and the heat capacity of the mixture were obtained. **conclusion.** The conducted studies have allowed us to obtain a mathematical model for calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating in a downhole reactor. The results obtained showed that with an increase in the mass flow rate and the heat capacity of the medium, the distance at which the set air temperature in the reactor is reached increases by 1.6 and 1.5 times, respectively, over the entire temperature range, and with an increase in the linear density of the heat flux, this distance decreases by 0.6 times.

Keywords: porous layer; temperature field; endless heating; high viscosity oil; downhole reactor.

For citation: Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 54-66. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день становится все труднее открывать новые месторождения нефти, так как большинство бассейнов, в которых она может содержаться уже исследованы, а месторождения, в которых имеется высоковязкая нефть требует больших капитальных и эксплуатационных затрат. Данная проблема была поднята ранее авторами в статье [1]. Поэтому оптимизация существующих методов добычи нефтяных ископаемых является одной из первоочередных задач для нефтедобывающих компаний, стремящиеся к поддержанию рентабельной добычи нефти.

Для разжижения нефти широко используют тепловые методы, например, внутрипластовое горение парогазовых смесей, что способствует возникновению окислительных реакций с выделением тепла, и закачка горячей воды и пара. Достоинствами тепловых методов является простота и экологичность, а недостатками – потери большого количества тепла. Способы термического воздействия на нефть для снижения ее вязкости рассмотрены в работах [2–4].

Интенсификация добычи нефти достигается путем прогрева нефтяного пласта для повышения проницаемости через массив породы и снижения вязкости нефтепродукта. Многие нефтяные компании нацелены на поиск эффективного и экономического способа добычи нефти. В ряде случаев способы термического воздействия на пласты является единственным способом для извлечения высоковязкой нефти на поверхность. Использование различных теплогенерирующих установок при добыче нефти способствует большим затратам в экономическом плане. Поэтому разработка и исследование устройств, предназначенных для нагрева нефтяных пластов с целью повышения проницаемости породы и снижения тепловых потерь является актуальной задачей многих нефтедобывающих компаний.

Среди различных способов увеличения дебита высоковязкой нефти является закачка химических смесей в скважину, за счет которой достигается добыча больших объемов продукта. Так в работе [5] авторами предложен способ прогрева пласта с помощью реагирующих химических смесей, которые подаются по двум отдельным каналам в скважину и при их смешивании, реагируя, выделяют горячий газ и водяной пар. Полученные газы под высоким давлением уходят в пласт и создают новые каналы для теплоносителя. На основе предложенного метода авторы в [6] разработали методику численного моделирования процессов теплопередачи, позволяющая вычислять время остывания нагретого пласта при заданных параметрах. Ими были получены формулы оценки зависимости продуктивности скважины, связанные со временем остывания нагретой зоны пласта и т.д. Так как прогрев пласта в основном проводят водяным паром или смесью пара с нагретом газом, то при выработке эту горячую смесь подают с поверхности глубинной скважины, вследствие чего происходят потери энергии. Тогда на прогрев пласта расходуется меньшее количество теплоты, чем при выделении в камере сгорания.

В работе [7] авторами был рассмотрен способ увеличения дебита высоковязкой нефти за счет использования термогазохимической обработки пласта в двухскважинной системе. Предложенная система представляет собой две скважины, основная из которых предназначена для проведения работ по нагреву пласта, а другая обеспечивает добычу нефти. В результате термохимической реакции вместе с прогревом нефтяного пласта образуются газы, приводящие к снижению вязкости пластовой жидкости. После окончания термообработки нагрев пласта прекращается, и с помощью насосного оборудования начинается слив нефти. Авторами статьи было определено оптимальное сочетание параметров технологического режима работы скважины, влияющее на увеличение ее эффективности.

Ранее было упомянуто, что одним из наиболее широко используемых методов извлечения нефти из месторождений является закачка пара. В связи с низкой проницаемостью породы и маломощными продуктивными зонами эффективность добычи нефтяных продуктов закачкой паром не достигает ожидаемых результатов. Альтернативный данному метод рассматривается в статье [8], основанный на передачи тепла в нефтяные пласты с помощью электромагнитного нагрева. В исследовании в качестве источника была использована высокочастотная микроволновая антенна. Результаты, полученные авторами, позволяют предположить, что рассматриваемый метод является продуктивным в качестве воздействия на пласты с тяжелой нефтью, характеризующиеся низкой проницаемостью и высокой вязкостью.

В работе [9] были получены численные и аналитические решения задачи по добыче высоковязкой нефти из скважины при термическом воздействии на нее. Авторами была предложена расчетная схема разработки нефтяного пласта, на основе которой были получены результаты по повышению эффективности добычи высоковязкой нефти за счет равномерного прогрева зоны месторождения. Также принята модель добычи нефти с использованием одной скважины вместо двух. Рассматриваемая модель позволяет оценить количественной и качественный процесс извлечения нефти из пласта по изменению интенсивности ее нагрева и перепада давлений в нем. Довольно простые расчеты позволяют определить наиболее эффективный режим добычи нефти с точки зрения затрат энергии на эксплуатацию двойных скважин.

Большое количество затрачиваемого пара и потери давления являются существенными проблемами при разработке пластов с тяжелой нефтью. Подобные проблемы привели к совместной закачке пара с неконденсируемым газом, что является эффективным методом повышения нефтеотдачи и снижения потребления энергии [10,11]. В исследовании [12] было проведено сравнение двух методов закачки – обычная с паром и совместная пар-азот для определения влияния на производительность добычи нефти. Во

время проведения экспериментов фиксировалось изменение профиля динамической температуры. Результаты наблюдений показывают, что накопление азота в верхней части модели привело к расширению паровой области в горизонтальном направлении, а именно площадь охвата пара значительно увеличилась, что привело к снижению остаточной нефтенасыщенности. Следовательно, добыча нефти в случае использования совместной закачки пара с азотом выше, чем у традиционной. Также после введения азота, наблюдалось снижение потерь тепла, что определяет эффективность ее использования. Результаты проведенного в работе экспериментального исследования были проверены с помощью численного моделирования.

Использование пара среди существующих технологий добычи тяжелой нефти является преобладающим способом, однако этот популярный метод имеет такие недостатки, как низкая эффективность, высокое потребление пресной воды и выбросы парниковых газов [13,14]. Появление новых технологий по добычи тяжелой нефти, связанные с электрическим и радиочастотным нагревом в силу своей высокой эффективности, низкой стоимости и экологичности выступает альтернативой использованию пара. В работе [15] была исследована эффективность применения новых методов путем их сравнения с точки зрения нефтедобычи. В случае с электрическим нагревом применялся нагревательный стержень, через который пропускали постоянный или низкочастотный переменный ток, вследствие чего выделялось тепло. Поученная тепловая энергия за счет процесса теплопроводности передавалась через кожух в резервуар. Радиочастотный нагрев происходил за счет дипольной антенны, которая излучала электромагнитные волны при пропускании через нее переменного тока. Эти волны являются носителем электрической энергии, впоследствии которая преобразуется в тепловую. С помощью численного моделирования были определены основные различия двух способов: радиочастотный нагрев хорошо работает в коллекторах с высокой относительной диэлектрической проницаемостью и электропроводностью, а диапазон электрического нагрева ограничен при низкой теплопередающей способности резервуара. Результаты численного моделирования были проверены с данными, полученными в работе [16]. Подобное исследование было проведено в работе [17], где с помощью антенных решеток были исследованы характеристики высокочастотного нагрева пласта с тяжелой нефтью. Путем численных и лабораторных экспериментов было установлено, что антенная решетка охватывает большую площадь обогрева и имеет лучшую производительность по сравнению с одиночной антенной. Также изучены теплофизические свойства резервуара с тяжелой нефтью, оказывающие большое влияние на распределение температуры. Таким образом, развитие технологий, основанных на электрическом и радиочастотном нагревах пластов с тяжелой нефтью исследуются и анализируются во многих работах [18, 19].

В данной работе авторами была создана методика расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе для непрерывного разогрева призабойной зоны пласта, содержащий высоковязкую нефть и природный битум (ВВН и ПБ) (рис. 1).

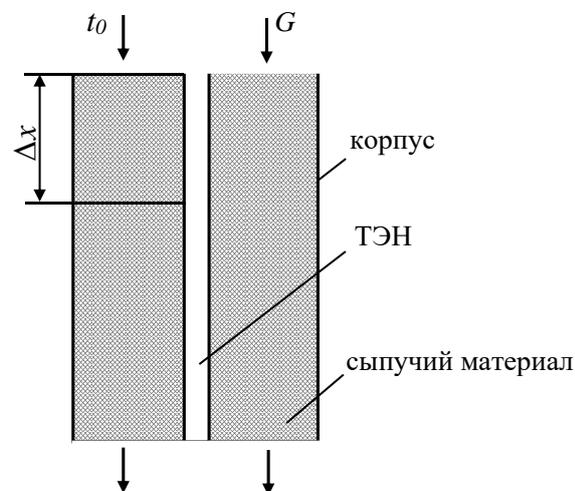


Рис. 1. Принципиальная схема Fig. 1. Schematic diagram of the downhole reactor внутрискважинного реактора

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Материалы и методы (Materials and methods)

В статье рассматривается проточная область внутрискважинного реактора кольцевого сечения $r_0 \leq r \leq r_b$, заполненной сыпучим материалом. Через нее протекает текучая среда с расходом G , кг/с, внутренняя и внешняя границы для неё непроницаемы. Внутренняя поверхность нагревается по всей длине с линейной плотностью теплового потока $q_l = \text{const}$, Вт/м, наружная поверхность теплоизолирована. Процесс является установившимся. В задаче введены координаты x , r , φ , причём от φ ничего не зависит (осесимметричная картина). На практике подразумевается вертикальный внутрискважинный реактор, так что ось x направлена вертикально вниз.

В исследовании рассматривается неограниченная по длине x область, так что $-\infty < x < \infty$, $r_0 \leq r \leq r_b$. Заданы r_0 – радиус ТЭНа, м, r_b – радиус цилиндрической части реактора, м, q_l – линейная плотность теплового потока, Вт/м, а также расход текучей среды G , кг/с и теплофизические характеристики сред. Область считается однородной, теплофизические характеристики заданными и постоянными, не зависящими от температуры. Необходимо построить температурное поле $t(x, r)$ в пористом слое.

Учитывая малые размеры частиц скелета и пор и стационарность процесса, то есть температура частиц скелета не меняется во времени, так что их теплоёмкость не важна, можно считать, что в насыщенной среде имеется единая температура скелета и текучей среды $t(x, r)$. С переменной места эта единая температура, естественно, может меняться.

Это особенно наглядно для сыпучей среды из округлых частиц с малой площадью контакта между смежными частицами, то есть небольшим тепловым потоком по частицам. Температура частицы будет близкой к средней температуре омывающей её текучей среды, так как температуры стационарны. При достаточно малых размерах частиц и пор это условие должно выполняться и для скелета с более плотной структурой.

Заметим, что в задачах по конвективному теплообмену в пористой среде иногда рассматриваются две температуры в одном месте – частиц скелета и текучей среды [20]. Но там речь идёт о достаточно массивных металлических, то есть высокотеплопроводных решётках, не слишком мелких, по которым идёт тепловой поток, достаточно большой по сравнению с переносом теплоты текучей среды.

Под скоростью w будем подразумевать скорость фильтрации, то есть среднеобъёмную по среде скорость. Она равна средней скорости текучей среды в порах w' , умноженной на пористость ε : $\vec{w} = \vec{w}'\varepsilon$. Здесь $w = \text{const}$, или $w_x = w$, $w_r = 0$, $w_\varphi = 0$. Значение

$$w \text{ можно считать заданным } w = \frac{G}{\rho_f \pi (r_b^2 - r_0^2)}.$$

Рассмотрим вопрос о средней теплопроводности λ' насыщенной среды. Предлагаемое соотношение $\lambda' = \varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_{\text{ск}}$ не всегда правомерно, так как значение λ' может сильно зависеть от структуры среды. К тому же эффективная теплопроводность текучей среды может меняться со скоростью и даже оказываться разной вдоль и поперёк скорости. И грунтовый скелет может быть существенно анизотропным, например, как мелкослоистый грунт. В данной задаче скорость везде постоянна и задана, так что будем считать значение эффективной теплопроводности насыщенной среды $\lambda' = \text{const}$ известным. Этому вопросу посвящено много исследований [21-24]. В случаях течения жидких сред его роль несколько сглажена тем, что их теплопроводность λ_f и грунтового скелета $\lambda_{\text{ск}}$ близки и имеют один порядок, в отличие от случая течения газовых сред.

В случае течения паров и газов через пористые среды значения средней теплопроводности будет варьироваться в диапазоне значений теплопроводности текучей среды и теплопроводности сыпучего материала.

$$\text{Условие баланса энергии для данного процесса имеет вид } \rho_f c_f \frac{Dt}{d\tau} = -\text{div } \vec{q}_{\text{мол}}.$$

Откуда после подстановки вектора скорости и закона Фурье $\vec{q}_{\text{мол}} = -\lambda' \text{grad } t$ для цилиндрических координат получим уравнение

$$w \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\lambda'}{(\rho c)_f} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right]. \quad (1)$$

Для лучшего понимания модели и уверенности в значении коэффициентов целесообразно провести вывод уравнения для данного случая детально.

Рассмотрим неподвижный элементарный объём dV насыщенной среды. Поток dQ , Вт, тепловой энергии через его границу к соседним элементам за счёт молекулярной теплопроводности по среде составит $dQ = (\text{div } \vec{q}_{\text{мол}}) dV$ $\vec{q}_{\text{мол}}$ – плотность теплового

потока, Вт/м². Так как процесс стационарный, то вся эта энергия будет отбираться от текущей среды, протекающей через объём. Температура перемещающейся массы $dM = \rho_f \varepsilon dV$ частиц текущей среды будет меняться со скоростью $\frac{dt}{d\tau} = -\frac{dQ}{c_f dM} = -\frac{\text{div} \vec{q}}{\varepsilon(\rho c)_f}$, здесь слева полная производная, связанная с частицами движущейся среды. Так как частицы движутся в направлении оси x со скоростью $\frac{dx}{d\tau} = w' = w/\varepsilon$, здесь x – координата частицы текущей среды, то температура частиц, она же единая температура насыщенной среды будет меняться в направлении оси x как $\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{dt}{d\tau} : \frac{dx}{d\tau} = -\frac{\text{div} \vec{q}}{w(\rho c)_f}$, и, после

подстановки закона Фурье, получаем выражение (1).

Как было отмечено в постановке задачи необходимо построить простейшее решение для бесконечно длинного кольцевого слоя $-\infty < x < \infty$, $r_0 \leq r \leq r_b$. Это решение будет иметь практический смысл лишь на некотором конечном участке. Так как теплота на внутренней границе $r = r_0$ поступает равномерно $q_l = \text{const}$, то и текущая жидкость будет нагреваться равномерно по длине, то есть температура будет расти линейно по x , и целесообразно искать решение вида

$$t(x, r) = \xi(r) + Ax, \quad (2)$$

где $\xi(r)$ – некоторая функция, подлежащая определению, а постоянная A сразу определяется из баланса теплоты

$$A = \frac{q_l}{Gc_f}, \quad (3)$$

так как тепловой поток q_l , Вт/м, передаётся текущей среде с расходом G , кг/с, при удельной теплоёмкости c_f .

При подстановке выражения (2) в (1) получается $wA = a' \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{d\xi}{dr})$, где $a' = \frac{\lambda'}{(\rho c)_f}$

то есть $\frac{d}{dr} (r \frac{d\xi}{dr}) = \frac{wA}{a'} r$.

Интегрируя один раз, получаем

$$r \frac{d\xi}{dr} = \frac{wA}{2a'} r^2 + C. \quad (4)$$

Постоянная интегрирования C определяется по граничному условию теплоизоляции

$$\frac{\partial t}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r_b \text{ как } C = -\frac{wA}{2a'} r_b^2.$$

То есть, подставляя C в выражение (4) и интегрируя от r_0 до r

$$\int_{\xi_0}^{\xi} d\xi = \frac{wA}{2a'} \int_{r_0}^r (r - \frac{r_b^2}{r}) dr, \text{ получаем выражение для } \xi(r)$$

$$\xi(r) = \frac{wA}{4a'} \left[(r^2 - r_0^2) - 2r_b^2 \ln \frac{r}{r_0} \right] + \xi_0. \quad (5)$$

Таким образом, после подстановки выражений (5) и (3), решение (2) примет вид

$$t(x, r) = \frac{K}{4} (r^2 - r_0^2 - 2r_b^2 \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a'}{w} x) + t_0, \quad (6)$$

где $K = \frac{q_l}{\pi \lambda' (r_b^2 - r_0^2)} = \frac{q_l}{f \lambda'}$, $a' = \frac{\lambda'}{(\rho c)_f}$, введено выше, а постоянная ξ_0 в (5) выбрана

равной t_0 , то есть по заданному условию $t(0, r_0) = t_0$.

Для проверки правильности выкладок убедимся, что выражение (6) действительно является решением (1).

Дифференцируя выражение (6), получаем

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{Ka'}{w} = \frac{q_l}{wf(\rho c)_f}, \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{K}{2} (r - \frac{r_b^2}{r}), \quad (7)$$

$$r \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{K}{2}(r^2 - r_b^2), \quad \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial t}{\partial r}) = Kr, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial t}{\partial r}) = K.$$

Подставляя полученные выражения в (1), получаем и в левой, и в правой частях $\frac{q_l}{f(\rho c)_f}$, то есть (6) действительно удовлетворяет уравнению (1).

Подставляя $r = r_b$ в выражение (7), убеждаемся, что условие теплоизоляции $\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_b} = 0$ на внешней границе выполняется.

При $r = r_0$ соотношение (7) даёт $\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{K}{2} \frac{r_0^2 - r_b^2}{r_0} = -\frac{q_l}{2\pi r_0 \lambda}$, то есть выполняется условие баланса теплоты на внутренней границе $(2\pi r_0)(-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_0}) = q_l$.

Наконец, прямая подстановка $x = 0, r = r_0$ в (6) показывает, что в этой точке $t = t_0$, как и требовалось. То есть повышение температуры внутренней поверхности на величину $t_n - t_0$ произойдёт на расстоянии Δx , хотя для этого не надо строить полное решение, это сразу следует из принятых предположений, в частности, в (3):

$$\Delta x = \frac{Gc_f}{q_l}(t_n - t_0). \quad (8)$$

Как отмечено, в данной постановке нагрев внутренней поверхности происходит по всей внутренней границе реактора, на бесконечной длине. Соответственно, температура, в том числе на самой этой границе растёт равномерно по всей длине и приращение температуры, как показано в (8), пропорционально длине участка. На практике нагрев может происходить лишь на конечном участке, и более реальной была бы, например, постановка, где нагрев, то есть подача тепла с линейной плотностью теплового потока q_l , происходит лишь при $x > 0$. При этом температура около точки $x = 0$ будет меняться уже неравномерно. Следует ожидать, что и в таком решении с ростом x характер распределения температур будет выравниваться и приближаться к рассмотренному в (6), и будет близок к нему уже на расстоянии нескольких толщин слоя $r_b - r_0$ по аналогии с принципом Сен-Венана и теории упругости, но с некоторым небольшим сдвигом, для немного другого значения t_0 . Поэтому формула (8) должна оказаться верной и для такой постановки, но лишь при достаточно больших длинах участка.

После ввода безразмерных относительных переменных $R = \frac{r}{r_0}, X = \frac{4a'x}{wr_0^2}$, $T = \frac{(t-t_0)\lambda}{q_l}$ уравнение (6) преобразованием

$$\frac{(t(x,r)-t_0)\lambda'}{q_l} = \frac{r_0^2}{4\pi(r_b^2 - r_0^2)} \left(\frac{r^2}{r_0^2} - 1 - 2 \frac{r_b^2}{r_0^2} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a'}{wr_0^2} x \right) \text{ переходит в}$$

$$T(X, R) = \frac{1}{4\pi(R_b^2 - 1)} (X + R^2 - 1 - 2R_b^2 \ln R), \quad 1 \leq R \leq R_b. \quad (9)$$

Видно, что решение зависит лишь от одного существенного параметра $R_b = \frac{r_b}{r_0}$ – отношения внешнего и внутреннего радиусов скважины, влияние остальных размерных параметров на размерное решение сводится к пропорциональному увеличению (растяжению) или сдвигу. Также возможно упрощение выражения (9) без коэффициента при правой части, если брать $T = \frac{4(t-t_0)}{Kr_0^2}$.

Представление о решении даёт профиль температуры в поперечном сечении, например, при $x = 0$. В других сечениях форма кривой будет такой же с соответствующим смещением по оси ординат t . В безразмерных переменных этот профиль при $X = 0$ представляется выражением

$$T(R) = \frac{1}{4\pi(R_b^2 - 1)} (R^2 - 1 - 2R_b^2 \ln R). \quad (10)$$

На рисунке 2 показаны такие профили для нескольких значений R_b .

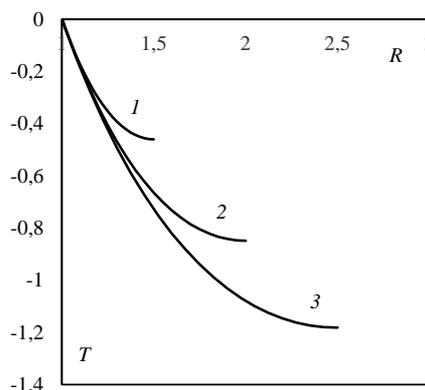


Рис. 2. Профиль температуры в поперечном сечении при $X = 0$ для значений R_b : 1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,5

Fig. 2. Temperature profile in cross section at $X = 0$ for R_b values: 1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Также картина температурного поля может быть показана семейством изотерм, в плоскости продольного сечения X, R . В безразмерных переменных уравнение изотермы $T = T_k = \text{const}$ будет иметь вид

$$X = 2R_b^2 \ln R - (R^2 - 1) + B_k, \quad 1 \leq R \leq R_b, \quad (11)$$

где $B_k = T_k 4\pi(R_b^2 - 1)$. Ясно, что изотермы будут одинаковыми с соответствующим смещением по оси X . На рис. 3 показан вид изотерм для случая $R_b = 2$.

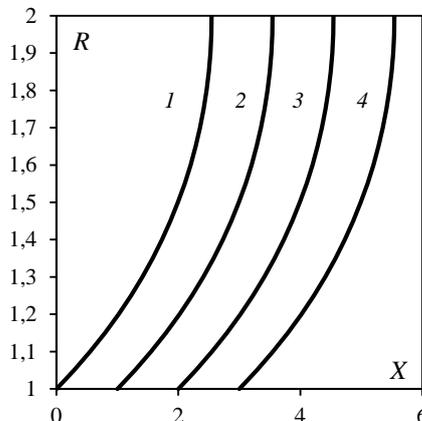


Рис. 3. Семейство изотерм: 1 – $t_0 = 0$; 2 – $t_0 = 1$; 3 – $t_0 = 2$; 4 – $t_0 = 3$

Fig. 3. Family of isotherms: 1 – $t_0 = 0$; 2 – $t_0 = 1$; 3 – $t_0 = 2$; 4 – $t_0 = 3$ [compiled by the author]

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В промышленной версии внутрискважинного реактора через слой песка проходит поток из смеси паров широких фракций углеводородов и воздуха. Эту смесь необходимо нагреть до температуры воспламенения, а песок необходим для снижения скорости распространения продуктов реакции по проточной части аппарата. Определить теплоемкость реальной смеси в внутрискважинном реакторе достаточно сложно ввиду непостоянства ее состава. Поэтому для оценочных расчетов будем использовать в качестве текучей среды воздух. Следует отметить, что теплоемкость воздуха всегда будет меньше теплоемкости реальной парогазовой смеси, поэтому значения расстояния Δx будет завышено пропорционально увеличению значению теплоемкости.

В ходе проведения исследований были получены зависимости расстояния Δx , мм, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода G , кг/с, линейной плотности теплового потока q_l , Вт/м, и теплоемкости смеси c_f Дж/(кг·°C). Изначально в исследовании были приняты следующие

значения: массового расхода $G = 0,00139$ кг/с, линейной плотности теплового потока $q_l = 1250$ Вт/м, и теплоемкости смеси $c_f = 736,2$ Дж/(кг·°С).

На рисунке 4 представлена зависимость расстояния Δx при различных значениях массового расхода воздуха G в диапазоне температур $\Delta t = 200...300$ °С. Видно, что при повышении массового расхода расстояние, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе, увеличивается в 1,6 раз во всем диапазоне температур.

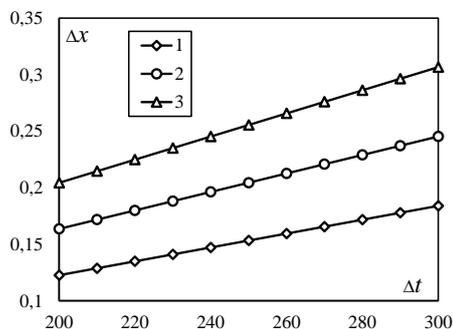


Рис. 4. Зависимость расстояния Δx в диапазоне температур Δt при различных значениях массового расхода G , кг/с: 1 – 0,00104; 2 – 0,00138; 3 – 0,00174

Fig. 4. Dependence of the distance Δx in the temperature range Δt at different values of mass flow G , kg/s: 1 – 0,00104; 2 – 0,00138; 3 – 0,00174

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Зависимость, представленная на рисунке 5, показывает, что при увеличении значения линейной плотности теплового потока q_l с 1000 до 1500 Вт/м расстояние Δx уменьшается в 0,6 раз во всем диапазоне температур $\Delta t = 200...300$ °С.

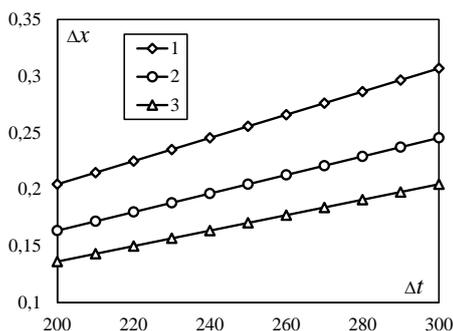


Рис. 5. Зависимость расстояния Δx в диапазоне температур Δt при различных значениях линейной плотности теплового потока q_l , Вт/м: 1 – 1000; 2 – 1250; 3 – 1500

Fig. 5. The dependence of the distance Δx in the temperature range Δt at different values of the linear heat flux density q_l , W/m: 1 – 1000; 2 – 1250; 3 – 1500

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На графике рисунке 6 показана зависимость расстояния Δx при различных значениях теплоемкости смеси $c_f = 669, 736,2, 803,4, 870,6, 937,8$ и 1005 Дж/(кг·°С) для температур $\Delta t = 200, 220, 250, 280$ и 300 °С соответственно. В ходе исследования выявлено, что при росте значения теплоемкости c_f расстояние Δx увеличивается в 1,5 раза.

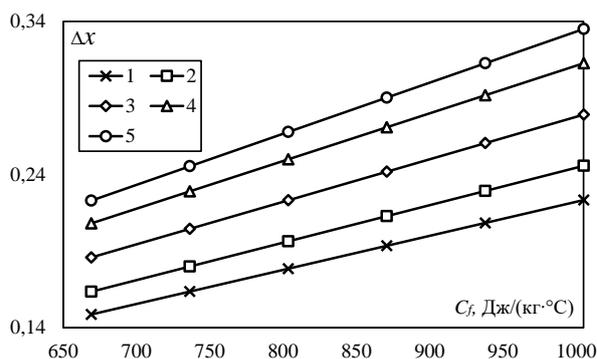


Рис. 6. Зависимость расстояния Δx в диапазоне значений теплоемкости смеси c_f при различных

Fig. 6. The dependence of the distance Δx in the range of values of the heat capacity of the medium

значениях температур Δt , °C : 1 – 200; 2 – 220; 3 – 250; 4 – 280; 5 – 300 c_f at different temperatures Δt : 1 – 200; 2 – 220; 3 – 250; 4 – 280; 5 – 300

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusion)

Исследования посвящены созданию математической модели расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе непрерывного разогрева призабойной зоны пласта, содержащий высоковязкую нефть и природный битум (ВВН и ПБ). В результате в работе было получено уравнение для расстояния, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода, линейной плотности теплового потока и теплоемкости смеси. Были получены профиль температуры в поперечном сечении кольцевого слоя в безразмерных переменных при $X = 0$ и картина температурного поля в виде семейства изотерм в плоскости продольного сечения X, R . На основе разработанной модели были получены зависимости расстояния, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода воздуха, линейной плотности теплового потока и теплоемкости смеси. Выявлено, что при повышении массового расхода воздуха и теплоемкости смеси расстояние увеличивается в 1,6 и 1,5 раза соответственно в заданном диапазоне температур. При росте значения линейной плотности теплового потока расстояние уменьшается в 0,6 раза.

Литература

1. Muggeridge A., Cockin A., Webb K., et al. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2014. Vol. 372, N2006. pp. 20120320.
2. Palaev A.G., Shammazov I.A., Dzhemilev E.R. Research of the impact of ultrasonic and thermal effects on oil to reduce its viscosity // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1679, N5. pp. 052073.
3. Dong X., Liu H., Chen Z., et al. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection // Applied energy. 2019. Vol. 239. pp. 1190–1211.
4. Miah M.I., Elhaj M.A., Ahmed S., et al. Modeling of temperature distribution and oil displacement during thermal recovery in porous media: a critical review // Fuel. 2018. Vol. 226. pp. 423–440.
5. Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Петрищев В.Ф. Способ и устройство для термохимической обработки продуктивного пласта. Патент РФ на изобретение № 2224103 РФ, МПК E21B 43/24. Заявители и патентообладатели – Институт биохимической физики РАН, Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Петрищев В.Ф.; № 2002113723/032002113723/03; заявл. 28.05.2002; опубл. 20.02.2004. Бюл. № 5.
6. Александров Е.Н., Гудвин М., Кузнецов Н.М. Нагрев нефтеносного пласта и оптимизация режима добычи углеводородов из скважин истощенных месторождений // Георесурсы. 2006. №4 (21). С. 2–5.
7. Ali I., Gubanov S.I., Ovchinnikov K.A., et al. A dual-well system and thermal-gas-chemical formation treatment: Combined methods for high-viscosity oil production // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 194. pp. 107554.
8. Sahni A., Kumar M., Knapp R. B. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs // SPE/AAPG Western Regional Meeting. OnePetro. 2000.
9. Shagapov V.S., Tazetdinova Y.A., Gizzatullina A.A. On the theory of extraction of high-viscosity oil from the stratum under thermal action // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92. pp. 1415–1422.
10. Al-Murayri M.T., Maini B.B., Harding T.G., et al. Multicomponent solvent co-injection with steam in heavy and extra-heavy oil reservoirs // Energy & Fuels. 2016. Vol. 30, N4. pp. 2604–2616.
11. Gao Y., Liu S., Shen D., et al. Improving oil recovery by adding N₂ in SAGD process for super-heavy crude reservoir with top-water // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. OnePetro. 2008.
12. Yuan Z., Liu P., Zhang S., et al. Experimental study and numerical simulation of nitrogen-assisted SAGD in developing heavy oil reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 162. pp. 325–332.
13. Kraemer D., Bajpayee A., Muto A., et al. Solar assisted method for recovery of bitumen from oil sand // Applied Energy. 2009. Vol. 86, N9. pp. 1437–1441.
14. Wise S., Patterson C. Reducing supply cost with Eseeih™ pronounced easy // SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. OnePetro. 2016.

15. Wang Z., Gao D., Diao B., et al. Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 160. pp. 114105.
16. Bientinesi M., Petarca L., Cerutti A., et al. A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013. Vol. 107. pp. 18–30.
17. Wang Z., Gao D., Fang J. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field // *Fuel*. 2018. Vol. 220. pp. 14–24.
18. Izmailova G. R. Research on the high-frequency electromagnetic acoustic heating of an oil reservoir with further pumping of a solvent // *High temperature*. 2018. Vol. 56. pp. 910–914.
19. Sivakumar P., Krishna S., Hari S., et al. Electromagnetic heating, an eco-friendly method to enhance heavy oil production: A review of recent advancements // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 20. pp. 101100.
20. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А. Теплообмен пористого тела с однофазным потоком теплоносителя // *Теплофизика высоких температур*. 2011. Т. 49. №2. С. 235–242.
21. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 240 с.
22. Гортышов Ю.Ф., Надыров И.Н., Ашихмин С.Р., и др. Теплообмен при течении однофазного и вскипающего охладителя в канале с пористой вставкой // *Инженерно-физический журнал*. 1991. №2(60). С. 252.
23. Полежаев Ю.В., Селиверстов Е.М. Универсальная модель теплообмена в системах с проникающим охлаждением // *Теплофизика высоких температур*. 2002. Т. 40. № 6. С. 922.
24. Субботин В.И., Харитонов В.В., Плаксеев А.А., и др. Об интенсификации теплообмена в капиллярно-пористых теплообменниках // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1984. №. 6. С. 94–101.

Авторы публикации

Якимов Николай Дмитриевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Шагеев Альберт Фаридович – старший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной центр) / НИИ методов увеличения нефтеотдачи, Казанский федеральный университет.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Бадретдинова Гузель Рамилевна – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Muggeridge A, Cockin A, Webb K, et al. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2014;372(2006):20120320. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0320>
2. Palaev AG, Shammazov IA, Dzhemilev ER. Research of the impact of ultrasonic and thermal effects on oil to reduce its viscosity. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2020;1679(5):052073. doi:10.1088/1742-6596/1679/5/052073
3. Dong X, Liu H, Chen Z, et al. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection. *Applied energy*. 2019;239:1190–1211. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.244>
4. Miah MI, Elhaj MA, Ahmed S, et al. Modeling of temperature distribution and oil displacement during thermal recovery in porous media: a critical review. *Fuel*. 2018;226:423–440. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.018>
5. Aleksandrov EN, Lemenovskii DA, Petrishchev VF. Sposob i ustroystvo dlya termokhimicheskoi obrabotki produktivnogo plasta. Patent RF na izobretenie № 2224103 RF, MPK E21B 43/24. Zayaviteli i patentoobladateli – Institut biokhimicheskoi fiziki RAN, Aleksandrov E.N.,

Lemenovskii D.A., Petrishchev V.F.; № 2002113723/032002113723/03; yayavl. 28.05.2002; opubl. 20.02.2004. Byul. № 5.

6. Aleksandrov EN, Gudvin M, Kuznetsov NM. Nagrev neftenosnogo plasta i optimizatsiya rezhima dobychi uglevodorodov iz skvazhin istoshchennykh mestorozhdenii. *Georesursy*. 2006;(4 (21)): 2–5. (In Russ).

7. Ali I, Gubanov SI, Ovchinnikov KA, et al. A dual-well system and thermal-gas-chemical formation treatment: Combined methods for high-viscosity oil production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;194:107554. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107554>

8. Sahni A, Kumar M, Knapp RB. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*. OnePetro. 2000. <https://doi.org/10.2118/62550-MS>

9. Shagapov VS, Tazetdinova YA, Gizzatullina AA. On the theory of extraction of high-viscosity oil from the stratum under thermal action. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019;92:1415–1422. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02058-7>

10. Al-Murayri MT, Maini BB, Harding TG, et al. Multicomponent solvent co-injection with steam in heavy and extra-heavy oil reservoirs. *Energy & Fuels*. 2016;30(4):2604–2616. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02774>

11. Gao Y, Liu S, Shen D, et al. Improving oil recovery by adding N₂ in SAGD process for super-heavy crude reservoir with top-water. *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. OnePetro. 2008. <https://doi.org/10.2118/114590-MS>

12. Yuan Z, Liu P, Zhang S, et al. Experimental study and numerical simulation of nitrogen-assisted SAGD in developing heavy oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;162: 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.064>

13. Kraemer D, Bajpayee A, Muto A, et al. Solar assisted method for recovery of bitumen from oil sand. *Applied Energy*. 2009;86(9):1437–1441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.003>

14. Wise S, Patterson C. Reducing supply cost with EseiTM pronounced easy. *SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*. OnePetro. 2016. <https://doi.org/10.2118/180729-MS>

15. Wang Z, Gao D, Diao B, et al. Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2019;160:114105. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114105>

16. Bientinesi M, Petarca L, Cerutti A, et al. A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013;107:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.02.014>

17. Wang Z, Gao D, Fang J. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field. *Fuel*. 2018;220:14–24. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.012>

18. Izmailova GR. Research on the high-frequency electromagnetic acoustic heating of an oil reservoir with further pumping of a solvent. *High temperature*. 2018;56:910–914. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18060111>

19. Sivakumar P, Krishna S, Hari S, et al. Electromagnetic heating, an eco-friendly method to enhance heavy oil production: A review of recent advancements. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;20:101100. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101100>

20. Kirsanov YA, Nazipov RA, Danilov VA. Heat transfer between a porous body and a single-phase flow of the heat carrier. *High Temperature*. 2011;49(2):227–235. (In Russ). <https://doi.org/10.1134/S0018151X11020088>

21. Popov I.A. Gidrodinamika i teploobmen v poristykh teploobmennyykh elementakh i apparatakh. Intensifikatsiya teploobmena: monografiya / pod obshch. red. Yu.F. Gortyshova. Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, 2007. (In Russ).

22. Gortyshov YuF, Nadyrov IN, Ashikhmin SR, et al. Teploobmen pri techenii odnofaznogo i vskipayushchego okhladitelya v kanale s poristoi vstavkoi. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1991;2(60):252. (In Russ).

23. Polezhaev YV, Seliverstov EM. A universal model of heat transfer in systems with penetration cooling. *High temperature*. 2002;40(6):856–864. <https://doi.org/10.1023/A:1021477217065>

24. Subbotin VI, Kharitonov VV, Plakseev AA, et al. Ob intensifikatsii teploobmena v kapillyarno-poristykh teploobmennikakh. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*. 1984;6:94–101.

Authors of the publication

Nikolay D. Yakimov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Shageev Albert Faridovich - Institute of Geology and Petroleum Technologies / World-class

© Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р.

Scientific Center for the Rational Development of liquid hydrocarbon reserves of the planet (head center) / research laboratory of methods for increasing oil recovery, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Guzel R. Badretdinova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено *11.05.2023 г.*

Отредактировано *12.10.2023 г.*

Принято *27.10.2023 г.*



СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ КОНДЕНСАЦИИ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Кондрашов А.В., Тринченко А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

kondrashov22@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости использования бросового тепла, являющегося побочным продуктом работы энергетических машин для повышения эффективности их работы. На примере внедрения системы утилизации теплоты конденсации и использования ее в системе воздушного отопления, подтверждена возможность полезного использования бросового тепла, вырабатываемого холодильными машинами, используемыми для намораживания ледовой арены спортивного комплекса. ЦЕЛЬ. Разработка системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин для использования бросового тепла при организации воздушного отопления. МЕТОДЫ. Исследование инженерных систем на предмет возможности полезного использования низкопотенциального тепла. Организация системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин в спортивном комплексе. Установка измерительного стенда, включающего, в том числе, теплосчетчик, тепловычислитель, контроллер передачи результатов замеров на персональный компьютер, проведение необходимых вычислений, их последующая обработка и анализ. РЕЗУЛЬТАТЫ. На объекте с постоянной работой холодильных машин и потребностью в отоплении, внедрена система утилизации теплоты конденсации. Показана возможность внедрения предлагаемой системы без длительного простоя основного оборудования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Внедрение системы утилизации теплоты конденсации повысило энергетическую эффективность системы, что позволило на 2,6 млн.руб. снизить коммунальные платежи теплоснабжающей организации, а также сократить тепловое загрязнение окружающей природной среды не менее чем на 1,4 ГВт в год.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; утилизация теплоты; бросовое тепло; коммунальные платежи; воздушное отопление; тепловое загрязнение

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 20-38-90119\20 от 03.09.2020).

Для цитирования: Кондрашов А.В., Тринченко А.А. Система утилизации теплоты конденсации тепловых машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 67-77. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-67-77.

CONDENSATION HEAT RECYCLING SYSTEM FOR HEAT ENGINES

Kondrashov A.V., Trinchenko A.A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

kondrashov22@gmail.com

Abstract: THE RELEVANCE of the research lies in the need to use waste heat, which is a by-product of the operation of energy machines, to increase the efficiency of their operation. Using the example of introducing a system for recovering condensation heat and using it in an air heating system, the possibility of beneficial use of waste heat generated by refrigeration machines used to freeze the ice arena of a sports complex was confirmed. TARGET. Development of a system for recycling the condensation heat of refrigeration machines to use waste heat when organizing air heating of a building. METHODS. Study of engineering systems for the possibility of beneficial use of low-grade heat. Organization of a system for recycling the condensation heat of refrigeration machines in a sports complex. Installation of a measuring

stand, including, among other things, a heat meter, a heat calculator, a controller for transferring measurement results to a personal computer, carrying out the necessary calculations, their subsequent processing and analysis. RESULTS. At a facility with constant operation of refrigeration machines and a need for heating, a condensation heat recovery system has been introduced. The possibility of implementing the proposed system without long-term downtime of the main equipment is shown. CONCLUSION. The introduction of a condensation heat recovery system increased the energy efficiency of the system, which allowed for 2.6 million rubles. reduce utility bills of the heat supply organization, as well as reduce thermal pollution of the environment by at least 1.4 GW per year.

Keywords: energy efficiency; heat recovery; waste heat; communal payments; air heating; thermal pollution.

Acknowledgments: *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR Grant No. 20-38-90119\20 dated September 3, 2020).*

For citation: Kondrashov A.V., Trinchenco A.A. Condensation heat recycling system for heat engines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 67-77. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-67-77.

Введение (Introduction)

В настоящее время, в связи с постоянным ростом цен на энергетические ресурсы, весьма актуальным становится решение вопросов повышения энергетической эффективности технологического оборудования и инженерных систем с одновременным снижением затрат на потребление электроэнергии и тепла. Вопросы регулирования в области энергосбережения являются ключевыми факторами в энергетической стратегии развития РФ, а также Федеральных законах и постановлениях Правительства РФ, таких как 261ФЗ и постановление Правительства РФ №1830-р от 1 декабря 2009 г., в действующих редакциях.

Сравнительный анализ применимости подходов повышения энергетической эффективности в экономике РФ, в сравнении с экономиками промышленно развитых стран показал, что в РФ такой показатель недостаточно высок, что приводит к значительным издержкам энергетического обеспечения. Истощении не возобновляемых источников энергии и увеличение их стоимости для потребителей, делают проблему рационального использования энергоресурсов особенно актуальной.

Литературный обзор

Технологии энергосбережения в холодильных установках в последние годы становятся актуальными для промышленных производств как в России, так и за рубежом. Анализ современного состояния вопроса применения систем с единым контуром тепловых машин [1-2], показал основные преимущества и недостатки использования различных энергоэффективных схем.

1. Схема утилизации теплоты с использованием теплового насоса [3-4]. Преимуществом данной системы, по мнению авторов [5-6], является простота установки и возможность относительно быстрого подключения теплового насоса в существующую систему холодоснабжения, в результате чего возможно получение экономического эффекта в виде сокращения потребления электрической энергии до 72 %, а выбросов углекислого газа – до 53 %. Подбором теплообменников необходимого типоразмера удается достичь оптимальных показателей работы системы утилизации, а использование бросового тепла позволяет снизить нагрузку на конденсатор холодильной машины.

2. Схема холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации [6-7]. Рассмотрены режимы работы холодильных машин [8] с системами утилизации бросового тепла (до 40% от общей тепловой мощности конденсатора), образующегося в процессе сжатия холодильного агента до давления конденсации. Рассмотрено предложение использования такого тепла в системе ГВС.

3. Схема утилизации на примере молочного производства [5-6], где требуется большое количество холода для охлаждения сырья (молока) и поддержания заданной температуры в складах хранения готовой продукции. Проанализированы две схемы использования системы утилизации: без дополнительного подогрева и с дополнительным подогревом (водой с высокой температурой). Нагрев воды до требуемых параметров

предлагается с помощью электрических или газовых нагревателей, а также через водонагреватель косвенного нагрева с теплоносителем от котельной.

4. Схема системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин [9-10] для снижения зависимости объектов с искусственным намораживанием ледовой поверхности от городских систем отопления и горячего водоснабжения. Представлены возможные положительные результаты применения энергоэффективных схем с использованием бросового тепла для вентиляции и кондиционирования воздуха, снижения доли сторонних источников теплоснабжения и сокращения коммунальных затрат. Рассмотрены пути достижения прогнозируемого экономического эффекта от внедрения предложенных решений.

Рассмотренные схемы предлагается включать как в проекты новых объектов, так и внедрять в уже имеющиеся системы для получения экономического эффекта и повышения энергетической эффективности оборудования [11-12].

Целью исследования является повышение эффективности использования энергетических ресурсов (увеличения полноты использования подводимой энергии) в инженерных системах с единым контуром тепловых машин.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие задачи:

– выполнен анализ работы действующих инженерных систем и технологического оборудования в СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках, для выявления возможных способов использования низкопотенциального тепла, вырабатываемого холодильными машинами намораживания ледовой поверхности, с целью оптимизации энегротехнологических систем и систем теплоснабжения здания;

– предложена оптимизация схемы утилизации теплоты конденсации путем организации воздушного отопления СПб ГБУ СШОР, выполнено технико-экономическое обоснование предлагаемых решений, определен срок окупаемости;

– внедрение усовершенствованной схемы утилизации теплоты конденсации холодильных машин, позволившее сократить использование тепла, поставляемого теплоснабжающей организацией;

– выполнен анализ фактических затрат до и после внедрения усовершенствованной системы утилизации тепла, а также сравнение его результатов с результатами технико-экономических расчетов.

Научная значимость работы заключается в следующем:

– разработана и внедрена на действующем предприятии схема утилизации теплоты конденсации холодильных машин в системе воздушного отопления;

– с установленного измерительного стенда получен объем данных (за период более года), позволивший провести сравнительный анализ фактических затрат до и после внедрения усовершенствованной системы.

Практическая значимость исследования определяется тем, что:

– разработана и внедрена эффективная технологическая схема системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин, позволяющая использовать бросовое тепло в системе воздушного отопления ледовых арен;

– реализованные технические решения могут быть использованы при проектировании и новом строительстве объектов с постоянной работой холодильных машин, а также для модернизации существующего технологического оборудования без существенных капитальных затрат и длительного срока простоя оборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

Анализ работы существующей системы частичной утилизации теплоты конденсации холодильных машин в СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках [9-10], показал следующее. Источником тепла в первом контуре нагрева является теплоноситель, поставляемый теплоснабжающей организацией, а источником тепла во втором – действующая на объекте система утилизации теплоты конденсации холодильных машин (рис. 1). В существующей схеме теплоноситель из форсконденсаторов отбора тепла горячих паров холодильного агента, поступает только в систему кондиционирования воздуха, где полезно не используется в связи с тем, что полностью отказаться от загрузки первого контура кондиционеров (для максимальной загрузки второго контура) нельзя, из-за возможного замораживания теплообменника и срабатывания системы автоматики. В виду этого, воздух попадает на второй контур уже подогретый (выше +25 °С). Максимально загрузить второй контур нагрева также не представляется возможным, т.к. значительное увеличение температуры элементов установки может привести к повреждениям двигателя, подшипников и деталей из синтетических материалов. В тоже время, подвод приточно-вытяжных трубопроводов на ледовые арены выполнен на высоте более 6 метров от уровня

пола (рис. 2), что не позволяет поддерживать установленные параметры микроклимата в соответствии с установленными требованиями: +6...+12 °С на уровне 1,5 метров от льда. Таким образом установлено, что система утилизации тепла в СПб ГБУ СШОР практически не используется.

Для увеличения полноты использования бросового тепла предложена модернизация существующей в СПб ГБУ СШОР системы частичной утилизации теплоты конденсации с целью использования низкопотенциального тепла в системе воздушного отопления ледовых арен, элементами которой являются тепловентиляторы (рисунок 3,а), расположенные непосредственно в отапливаемых помещениях на требуемой высоте (рисунок 3,б). Источником тепла в тепловентиляторах до выполнения модернизации, являлись два источника тепловой энергии, в зависимости от отопительного периода. В межотопительный период, источником тепла являлся тепловой насос, а в отопительный – тепло, поставляемое теплоснабжающей организацией. В модернизированной системе в качестве источника тепла в тепловентиляторах, предлагается круглогодичное использование тепла системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин.

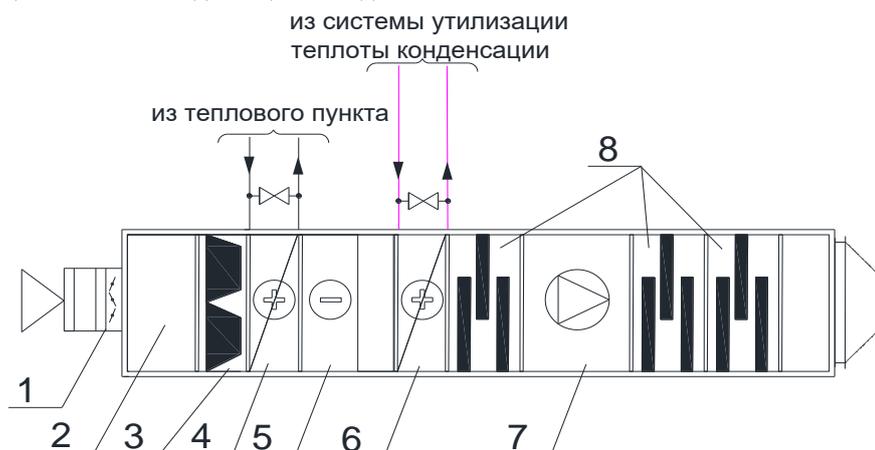


Рис. 1. Кондиционер ледовой арены: 1–воздушный клапан; 2 – секция смешения уличного и внутреннего воздуха; 3 – фильтр ячеистый карманный; 4 – секция первого нагрева от системы отопления; 5 – секция осушки; 6 – секция второго нагрева от системы утилизации теплоты конденсации; 7 – приточный вентилятор; 8 – секции шумоглушения

Fig. 1. Ice arena air conditioner: 1-air valve; 2 - section for mixing street and indoor air; 3 - cellular pocket filter; 4 - section of the first heating from the heating system; 5 - drying section; 6 - section of the second heating from the condensation heat recovery system; 7 - supply fan; 8 - noise reduction sections

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 2. Вентиляционный канал кондиционера К2

Fig. 2. Air conditioner ventilation duct K2

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



а)

Рис. 3 – Водяной тепловентилятор VOLCANO VR2 (а) и его размещение в помещении СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках (б)



б)

Fig. 3. Water fan heater VOLCANO VR2 (a) and its placement in the premises of the St. Petersburg State Budgetary Institution SSHOR for figure skating (b)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Технико-экономическое обоснование модернизации системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин показало следующее:

- реализация системы утилизации теплоты конденсации позволит на ~70% сократить долю сторонних источников тепла [12-13];
- увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем возможно достичь без существенных капитальных затрат при минимальных сроках (менее 1 месяца) внедрения и сокращения простоя оборудования [4]:

$$\tau_{ок.} = C_{затрат} / C_{экон.}, \quad (1)$$

где $\tau_{ок.}$ – срок окупаемости затрат на модернизацию системы, мес.; $C_{затрат}$ – локально-сметные затраты на модернизацию системы, руб.; $C_{экон.}$ – общая экономия от внедрения системы с учетом затрат на работу системы, рублей в год. Таким образом:

$$\tau_{ок.} = 115\,131 / 232\,000 \approx 1 \text{ мес.}$$

- эксплуатационные затраты на отопление и электроэнергию от сторонних поставщиков возможно снизить более чем на 2,6 млн. рублей в год [4]:

$$C_{экон.} = C_{тепло.} + C_{тепл.насос}, \quad (2)$$

где $C_{тепло.}$ – общая расчетная годовая экономия при отказе от использования тепла теплоснабжающей организации, руб./год; $C_{тепл.насос}$ – экономия при отказе от использования теплового насоса, руб./год. Таким образом:

$$C_{экон.} = 1\,920\,000 + 684\,064 = 2\,604\,064 \text{ руб/год.}$$

- сокращение прямого теплового загрязнения окружающей природной среды не менее чем на 1,4 ГВт в год [14-15]:

$$C_{выбр.} = T_{год.раб.} \cdot Q_{утил.} \cdot K_{исп.тепла}, \quad (3)$$

где $T_{год.раб.}$ – время работы тепловых машин, ч./год; $Q_{утил.}$ – время работы тепловых машин, ч./год; $K_{исп.тепла.}$ – вводится коэффициент использования теплоты конденсации, равный 0,5 из-за невозможности использования системы на 100%. Таким образом:

$$C_{выбр.} = 6098,4 \times 450 \times 0,5 = 1\,372\,140 \text{ кВт/год.}$$

После технико-экономического обоснования модернизации системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин, выполнены её проект и внедрение в СПб ГБУ СШОР (рис. 4) с круглогодичным режимом работы [16]

После модернизации системы, теплоноситель от форконденсаторов (поз. 3 рис. 4) поступает через установленный вентиль (поз. 10 рис. 4) и трубопроводы (поз. 11 рис. 4) в системы воздушного отопления трех ледовых арен (поз. 11 рис. 4) [14], которые оптимально утилизируют направленное на них тепло, а так же обеспечивают расчетные параметры микроклимата в помещениях, за счет чего появилась возможность полностью отказаться от использования тепла теплоснабжающей организации для воздушного отопления ледовых арен.

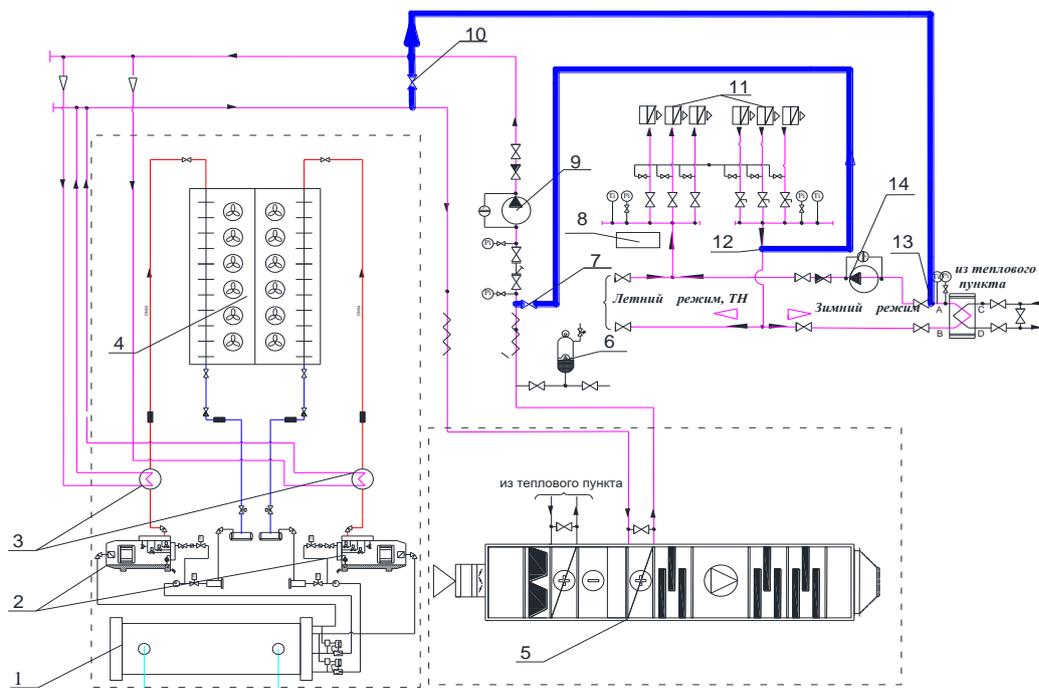


Рис. 4. Гидравлическая схема системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин: 1 – испарительно-компрессорный агрегат BE/SMED-BT 2402 (Climaveneta, Италия); 2 – полугерметичные винтовые компрессоры CSH8573-140Y-40D (Bitzer, Германия); 3 – форконденсаторы CPS/S145HR (Alfa Laval, Италия); 4 – воздушные конденсаторы ECA12N9P10C2 (Friga-Bohn, Франция); 5 – кондиционеры K1, K2 (VTS Clima, Польша); 6 – мембранный расширительный бак Reflex N200 (Reflex, Германия); 7, 10 – задвижка чугунная с обрезиненным клином BV GGG50 (HEBEI CENTRAL, Китай); 8 – измерительный стенд; 9 – циркуляционный насос IL50/170-7 (WILO, Германия); 11 – тепловентиляторы VR2 (VOLCANO, Польша); 12,13 – врезка в трубопроводы; 14 – циркуляционный насос IPL80/140-4/2 (WILO, Германия)

Fig. 4. Hydraulic diagram of the condensation heat recovery system for refrigeration machines: 1 – evaporation-compressor unit BE/SMED-BT 2402 (Climaveneta, Italy); 2 – semi-hermetic screw compressors CSH8573-140Y-40D (Bitzer, Germany); 3 – precapacitors CPS/S145HR (Alfa Laval, Italy); 4 – air condensers ECA12N9P10C2 (Friga-Bohn, France); 5 – air conditioners K1, K2 (VTS Clima, Poland); 6 – membrane expansion tank Reflex N200 (Reflex, Germany); 7, 10 – cast iron valve with rubber-coated wedge BV GGG50 (HEBEI CENTRAL, China); 8 – measuring stand; 9 – circulation pump IL50/170-7 (WILO, Germany); 11 – fan heaters VR2 (VOLCANO, Poland); 12,13 – insertion into pipelines; 14 – circulation pump IPL80/140-4/2 (WILO, Germany)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С целью получения опытных данных для проведения расчетов и анализа результатов, разработан и установлен вычислительный стенд (рис. 5), включающий, в том числе, стационарный теплосчетчик Streamlux-SLS-720FE и тепловычислитель СПТ-940. Данные этих приборов непрерывно записываются и сохраняются на персональном компьютере [16].

Для определения величины полученного экономического эффекта, на входе и выходе из реализованной системы, с помощью приборов вычислительного стенда выполнялся контроль и расчетное определение следующих параметров:

- температуры теплоносителя t_1 (t_2), °C (датчиками температуры накладного типа ДТС3225-PT100, предел допускаемых отклонений $\pm 0,30$ °C);
- давление теплоносителя на входе и выходе из системы P1 (P2), МПа (манометрами общетехническими стандартного исполнения ТМ-510Р.00);
- расход теплоносителя: V_1 , м³ (ультразвуковыми датчиками расхода (2 шт.) ТМ-1-НТ на Ду70-700 мм (диапазон температур: -30 °C...+160 °C, предел допустимой относительной погрешности при измерении объемного расхода $\pm 0,5$ %);
- разность температур на входе и выходе из системы Δt , °C;
- количество потребленного в системе тепла Q, Гкал.



Рис. 5. Стенд для фиксации параметров работы усовершенствованной системы: 1 – место установки измерительного стенда (поз.8 рис.4); 2 – тепловычислитель СПТ-940; 3 – теплосчетчик Streamlux-SLS-720FE; 4 – датчик температуры накладного типа ДТС3225-PT100; 5 – ультразвуковые датчики расхода ТМ-1-НТ

Fig. 5. Stand for recording the operating parameters of the improved system: 1 – installation location of the measuring stand (position 8, Fig. 4); 2 – heat meter SPT-940; 3 – heat meter Streamlux-SLS-720FE; 4 – surface-mounted temperature sensor DTS3225-PT100; 5 – ultrasonic flow sensors TM-1-HT

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Для определения средней расчетной теплоты потребления в усовершенствованной системе утилизации теплоты конденсации (в системе воздушного отопления), использована следующая зависимость:

$$\sum_0^{24} Q_i = \frac{\sum_0^{24} V_i}{n} \frac{\sum_0^{24} T1_i}{1000} - \frac{\sum_0^{24} T2_i}{n}, \quad (4)$$

где $\sum_0^{24} Q_i$ – расчетная теплота потребления за период i ; $\sum_0^{24} V_i / n$ – среднеарифметическое значение расхода теплоносителя за период i ; $\sum_0^{24} T1_i$ – среднеарифметическое значение температуры теплоносителя на выходе из системы за период i ; $\sum_0^{24} T2_i$ – среднеарифметическое значение температуры теплоносителя на входе в систему за период i ; 1000 – коэффициент перевода значений в Гкал.

Результаты работы стенда и записи опытных данных отражаются на диаграммах [16], одна из которых представлена на рис. 6 и иллюстрирует изменение температуры теплоносителя на входе в систему. Изменение параметров за рассматриваемый период позволило сделать вывод о том, что применение системы утилизации теплоты конденсации позволяет стабильно получать теплоноситель с температурой 35...40 °С, что достаточно для воздушного отопления помещений спортивного комплекса и подтверждает возможность отказа от использования тепла теплоснабжающей организации.

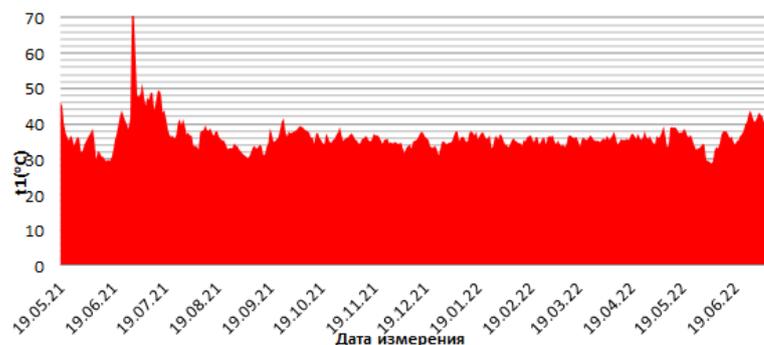


Рис. 6. Изменение температуры прямой воды в системе утилизации теплоты конденсации, по месяцам за рассматриваемый период, t1 (°C)

Fig. 6. Change in the temperature of direct water in the condensation heat recovery system, by month for the period under review, t1 (°C)

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Сравнением фактических затрат с результатами технико-экономических расчетов (табл. 1) подтверждено, что реализация проекта позволяет на ~70 % сократить долю сторонних источников тепла. В то же время, увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем достигается без существенных капитальных затрат при минимальных сроках внедрения и сокращении сроков простоя оборудования [16]

Таблица 1
Table 1

Коммунальные затраты на воздушное отопление ледовых арен до и после внедрения системы утилизации теплоты

Utility costs for air heating of ice arenas before and after the introduction of a heat recovery system

	Наименование затрат	Затраты, определенные расчетным путем, руб.	Фактические затраты, руб.	Экономия, руб.
До внедрения системы утилизации	Тепло для системы воздушного отопления ледовых арен, полученное от теплоснабжающей организации	1 920 000	1 235 654	0
	Электрическая энергия для теплового насоса системы воздушного отопления	684 064	1 225 565	0
	Итого:	2 604 064	2 461 219	
	Разница между расчетными и фактическими значениями	142 845		
После внедрения системы утилизации	Тепло для системы воздушного отопления ледовых арен, полученное от теплоснабжающей организации	0	0	1 920 000
	Электрическая энергия для теплового насоса системы воздушного отопления	0	0	684 064
	Электрическая энергия для циркуляционного насоса системы воздушного отопления	278 693	278 693	0

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Результаты, представленные в таблице 1 показывают, что затраты, полученные расчётным путем [10] имеют незначительное отклонение от фактических значений (не более 5 %), что подтверждает правильность расчетов и получаемый экономический эффект. Полные данные (за все время проведения исследования), с учетом остановки части холодильных машин в связи с плановой сплавкой двух ледовых арен, приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты использования бросового тепла в системе воздушного отопления СПб ГБУ СШОР в период с 01.07.2021 – 31.10.2023 гг.

The results of the use of waste heat in the air heating system of St. Petersburg GBU SSSOR in the period from 07/01/2021 – 10/31/2023.

Дата получения данных	V1 (м ³)	Q (Гкал)	Стоимость 1 Гкал, руб.	Полученная экономия по теплу за период исследования (2 года и 4 мес.), руб.	Средняя экономия по теплу в год, руб.
07.11.23	474 621,36	1 157,41	3 050	3 530 100	1 512 900

Из данных таблицы 2, собранных с модернизированной системы при помощи приборов учета, можно сделать вывод о хорошем совпадении величины экономии с данными технико-экономического обоснования.

Выполнена разработка рекомендаций для эффективного использования системы [12]. В результате выполнения которых (очистка тепловентиляторов от отложений пыли), получен экономический эффект, выражающийся в сокращении затрат на тепловую энергию на 13 % в день, из-за увеличения теплосъема тепловентиляторов.

Одновременно при проведении исследования зафиксировано увеличение энергетической эффективности холодильных машин (ввиду сокращения потребления

электрической энергии в связи с меньшим числом включений осевых вентиляторов на воздушных конденсаторах), что, в свою очередь, положительно отразилось на снижении давления и температуры конденсации холодильного агента. Работа компрессоров холодильных машин на меньшей нагрузке также приводит к снижению потребления электрической энергии, что увеличивает срок полезного использования оборудования при уменьшении межремонтного периода.

Результаты работы подтвердили ожидаемый экономический эффект от внедрения системы утилизации бросового тепла холодильных машин для воздушного отопления ледовых арен спортивного комплекса. Полное исключение теплового загрязнения окружающей среды возможно в случае использования бросового тепла для оттайки снега в яме снеготаяния льдозаливочных комбайнов (в межотопительный период осуществляется вручную за счет горячей воды из ГВС, а в отопительный – за счет радиаторов, находящихся в яме снеготаяния), а также для подогрева грунта от промерзания под ледовыми аренами (в настоящее время данную систему возможно применять только в отопительный период).

Заключение (Conclusion)

1. Подтверждена применимость разработанной схемы для повышения энергетической эффективности инженерных систем с единым контуром тепловых машин.

2. Реализация предложенной системы утилизации теплоты конденсации позволила примерно на 70% сократить долю сторонних источников тепла, а увеличение энергетической эффективности собственных инженерных систем достигнуто без существенных капитальных затрат при минимальных сроках внедрения и сокращении простоя оборудования.

3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных до и после внедрения системы, показал снижение эксплуатационных затрат на отопление и электроэнергию от сторонних поставщиков более чем на 2,6 млн. рублей в год, а также сокращение непосредственных тепловых выбросов в окружающую среду не менее чем на 1,4 ГВт в год.

Литература

1. Симбирев О.В. Перспективы модернизации систем отопления и вентиляции зданий. Colloquium-journal. №13-2(37)-2019. С. 207–208.

2. Лекомцев П.Л., Исупов Р.Ю. Повышение энергоэффективности холодного хранилища / АгроЭкоИнфо. – 2021. № 3(45). DOI 10.51419/20213312.

3. Исупов Р.Ю. Способы регулирования производительности конденсаторов воздушного охлаждения промышленных холодильных установок // Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов «Молодые ученые – Агропромышленному комплексу Дальнего Востока». – 2020. С. 22-27.

4. Kondrashov, A. Energy conservation and the use of the heat of refrigeration of ice arenas to heat the school of figure skating of St. Petersburg / A. Kondrashov, M. Egorov // Journal of Physics: Conference Series : 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control, IWHT 2019, Novosibirsk, 13–16 августа 2019 года. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012063. – DOI 10.1088/1742-6596/1369/1/012063.

5. Короткий И.А., Неверов Е.Н., Приб И.А. и др. Проектные решения схемы холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации // Холодильная техника. – 2020. № 6. С. 30-33.

6. Ометова М.Ю., Рыбкина Г.В., Дошлыгин Н.А. Утилизация низкопотенциального тепла от холодильных установок // Объектно-пространственное проектирование уникальных зданий и сооружений : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ I научно-практического форума «SMARTBUILD», к 100-летию строительного образования в Ивановской области и создания инженерно-строительного факультета Иваново-Вознесенского политехнического института, Иваново, 23–24 ноября 2018 г. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», 2018. С. 176–179.

7. Короткий И.А., Неверов Е.Н., Коротких П.С., Лоншаков В.Г. Разработка схемы системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин для снижения зависимости ледовой арены от городских систем отопления и горячего водоснабжения // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 34–39. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-2

8. Марченко А.В., Захаров А.А. Разработка способа по утилизации теплоты от холодильных машин / Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Материалы V Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 03 декабря 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. С. 157-160.

9. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov etc. Comparative efficiency of applying heat pumps within the system of disposal of the condensation heat of heat machines for heating ice arenas. E3S Web of Conferences. Volume 140, Article number 05011 (2019) DOI:10.1051/e3sconf/201914005011

10. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov. Energy conservation and the use of the heat of refrigeration of ice arenas to heat the school of figure skating of St. Petersburg. Journal of Physics: Conference Series. 2019 DOI: 10.1088/1742-6596/1369/1/012063

11 Ильина Т.Н., Феоктистов А.Ю., Мухамедов Р.Ю., Сериков С.В. Способы энергосбережения в системах создания микроклимата // Энергосбережение и экология в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве городов: Межд. науч.-практ. конф. Белгород, гос. технол. ун.-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С. 244 – 248.

12 Aleksey.V. Kondrashov, Aleksey A. Trinchenko. Implementation and research of operating parameters of energy-efficient engineering systems with a single circuit of heat engines, 2022 IEEE DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731451

13 Кондрашов, А.В. Система утилизации теплоты конденсации холодильных машин / А.В. Кондрашов, А.А. Тринченко // Современные технологии и экономика в энергетике : Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 267-269. – EDN OGIVPM.

14 Kondrashov A.V., Trinchenko A.A. Reducing of the Environment Thermal Pollution by Introducing Energy Efficient Technologies in Engineering Systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 г. – Vladivostok, 2020. – P. 9271312. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271312.

15 Солдатов А.И., Скотникова О.Г. Утилизация тепловых выбросов с АЭС – создание энергобиологического комплекса. Материалы международной студенческой научной конференции "Северное сияние", 1999.

16 Kondrashov, A.; Trinchenko, A. Reducing utility bills through the introduction of energy efficient systems; 2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 102 Article No 10202. doi: 10.4123/CUBS.102.2

Авторы публикации

Кондрашов Алексей Владимирович – аспирант высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0002-6649-8855>, kondrashov22@gmail.com

Тринченко Алексей Александрович – к-т техн. наук, доцент, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики, института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0003-1863-4186>, trinchenko@spbstu.ru

References

1. Simbirev O.V. Prospects for modernizing heating and ventilation systems of buildings. Colloquium-journal. No. 13-2(37)-2019. pp. 207–208.

2. Lekomtsev P.L., Isupov R.Yu. Increasing the energy efficiency of cold storage / AgroEcoInfo. – 2021. No. 3(45). DOI 10.51419/20213312.

3. Isupov R.Yu. Methods for regulating the performance of air-cooled condensers in industrial refrigeration units // Materials of the XX All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Specialists “Young Scientists - Agro-Industrial Complex of the Far East”. – 2020. pp. 22-27.

4. Kondrashov, A. Energy conservation and the use of the heat of refrigeration of ice arenas to heat the school of figure skating of St. Petersburg / A. Kondrashov, M. Egorov // Journal of Physics: Conference Series: 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control, IWHT 2019, Novosibirsk, August 13–16, 2019. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012063. – DOI 10.1088/1742-6596/1369/1/012063.

5. Korotkii I.A., Neverov E.N., Prib I.A. and others. Design solutions for a refrigeration machine with condensation heat recovery // Refrigeration equipment. – 2020. No. 6. P. 30-33.

6. Ometova M.Yu., Rybkina G.V., Doshlygin N.A. Utilization of low-grade heat from refrigeration units // Object-spatial design of unique buildings and structures: COLLECTION OF MATERIALS of the 1st scientific and practical forum “SMARTBUILD”, dedicated to the 100th anniversary of construction education in the Ivanovo region and the creation of the Faculty of Civil Engineering of the Ivanovo-Voznesensk Polytechnic Institute, Ivanovo, November 23–24, 2018 – Ivanovo: Federal State Budgetary

Educational Institution of Higher Education “Ivanovo State Polytechnic University”, 2018. pp. 176–179.

7. Korotkii I.A., Neverov E.N., Korotkikh P.S., Lonshakov V.G. Development of a scheme for recycling the heat of condensation of refrigeration machines to reduce the dependence of the ice arena on urban heating and hot water supply systems // Bulletin of the International Academy of Cold. 2021. No. 1. pp. 34–39. DOI: 10.17586/1606 4313 2021 2

8. Marchenko A.V., Zakharov A.A. Development of a method for recycling heat from refrigeration machines / Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency: Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference, Cheboksary, December 03, 2021. – Cheboksary: Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, 2021. pp. 157-160.

9. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov etc. Comparative efficiency of applying heat pumps within the system of disposal of the condensation heat of heat machines for heating ice arenas. E3S Web of Conferences. Volume 140, Article number 05011 (2019) DOI:10.1051/e3sconf/201914005011

10. Aleksey Kondrashov, Mikle Egorov. Energy conservation and the use of the heat of refrigeration of ice arenas to heat the school of figure skating of St. Petersburg. Journal of Physics: Conference Series. 2019 DOI: 10.1088/1742-6596/1369/1/012063

11. Il'ina T.N., Feoktistov A.Yu., Mukhamedov R.Yu., Serikov S.V. Methods of energy saving in microclimate creation systems // Energy saving and ecology in housing and communal services and urban construction: Int. scientific-practical conf. Belgorod. state technol. univ.-t. – Belgorod: Publishing house BSTU, 2012. P. 244 – 248.

12. Aleksey.V. Kondrashov, Aleksey A. Trinchenko. Implementation and research of operating parameters of energy-efficient engineering systems with a single circuit of heat engines, 2022 IEEE DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731451

13. Kondrashov, A. V. System for recycling condensation heat of refrigeration machines / A. V. Kondrashov, A. A. Trinchenko // Modern technologies and economics in the energy sector: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 27, 2022 . – St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. – P. 267-269. – EDN OGIIVPM.

14 Kondrashov A.V., Trinchenko A.A. Reducing of the Environment Thermal Pollution by Introducing Energy Efficient Technologies in Engineering Systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, October 06–09, 2020 – Vladivostok, 2020. – P. 9271312. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271312.

15. Soldatov A.I., Skotnikova O.G. Utilization of thermal emissions from nuclear power plants - creation of an energy-biological complex. Proceedings of the international student scientific conference "Northern Lights", 1999.

16. Kondrashov, A.; Trinchenko, A. Reducing utility bills through the introduction of energy efficient systems; 2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 102 Article No. 10202. doi: 10.4123/CUBS.102.2

Authors of the publication

Alexey V. Kondrashov –Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-6649-8855>, kondrashov22@gmail.com

Alexey A. Trinchenko –Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0003-1863-4186>, trinchenko@spbstu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено

16.10.2023 г.

Отредактировано

10.11.2023 г.

Принято

07.12.2023 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОРСКИХ СУДОВ

Савенко А.Е., Савенко П.С.

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть опыт использования и провести исследование электротехнических комплексов морских судов для выяснения возможности улучшения их эксплуатационных характеристик. Получить данные об уровнях шума и вибрации элементов электротехнического комплекса. *МЕТОДЫ.* В статье произведен анализ электротехнического комплекса винторулевыми колонками типа Azipod ледокола Балтика. Рассмотрен вопрос регулирования скорости вращения гребных электродвигателей с помощью частотного регулирования на основе звена постоянного тока и параллельно включенных инверторных блоков на IGBT транзисторах. Управление двигателем со стороны преобразователя частоты может быть основано на прямом управлении крутящим моментом, скалярном и векторном управлении. Существуют режимы контроля над снижением и повышением напряжения. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Приведены типичные зависимости уровней корпусного шума главных двигателей и генераторов. Проведены замеры на различных частотах уровней звуковой мощности двигателя, выхлопных газов и вибрации генераторных установок. Получены экспериментальные осциллограммы обменных и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной эксплуатации дизель генераторных установок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложено использовать многофазные электрические двигатели переменного тока для улучшения эксплуатационных характеристик, в том числе снижения шума и вибрации. Имеющийся опыт применения в гребных электрических установках с винторулевыми колонками Azipod частотных преобразователей на основе выпрямительного звена и инверторных блоков позволяет осуществить такое изменение. Для этого необходимо распараллелить инверторы, питающие каждую из трех фаз и обеспечить соответствующие сдвиги фаз.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; дизель-генератор; параллельная работа; обменные колебания мощности; синфазные колебания мощности; азимутальная винторулевая колонка; многофазный электропривод.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Улучшение эксплуатационных характеристик электротехнических комплексов морских судов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 78-88. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88.

IMPROVING THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF MARINE VESSELS

Savenko A.E., Savenko P.S.

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the experience of use and conduct a study of the electrical power systems of sea vessels to determine the possibility of improving their operational characteristics. Obtain data on noise and vibration levels of electrical power systems elements.

METHODS. The article analyzes the electrical power systems of the Azipod type steering columns of the Baltika icebreaker. The issue of regulating the rotation speed of propulsion electric motors using frequency control based on a DC link and parallel-connected inverter units on IGBT transistors is considered. Motor control on the frequency converter side can be based on direct torque control, scalar and vector control. There are control modes for reducing and increasing voltage. **RESULTS.** Typical dependences of structure-borne noise levels of main engines and generators are given. Measurements were taken at various frequencies of engine sound power levels, exhaust gases and vibration of generator sets. Experimental oscillograms of studies of the parallel operation of diesel generator sets were obtained, on which power exchange and common-mode oscillations were recorded. **CONCLUSION.** It is proposed to use multiphase AC electric motors to improve performance characteristics, including reducing noise and vibration. The existing experience in using frequency converters based on a rectifier section and inverter units in electric rowing installations with Azipod propellers makes it possible to implement such a change. To do this, it is necessary to parallelize the inverters that supply each of the three phases and provide the appropriate phase shifts.

Keywords: electrical power system; diesel-generator; parallel operation; power exchange oscillations; power common-mode oscillations; azimuth rudder; multiphase electric drive.

For citation: Savenko A.E., Savenko P.S. Improving the operational characteristics of electrical power systems of marine vessels. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 78-88. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88.

Введение (Introduction)

Состав и характеристики судовых электротехнических комплексов имеют значительные отличия в зависимости от типа судна. Так в работах [1,2] исследуется применение в судовых электростанциях обратимой валогенераторной установки по схеме машины двойного питания. В статьях [3,4] представлена методика расчета расхода топлива электростанций на базе дизель-генераторной установки с регулируемой скоростью для судов с интегрированной электрической движительной установкой, что позволяет экономить топливо и, следовательно, снижать вредные выбросы в атмосферу, показана топливная эффективность унифицированной электростанции на базе регулируемой дизель-генераторной установки мощностью 1000 кВт.

Необходимо отметить также влияние времени и места постройки судов. Морские суда имеют длительный срок эксплуатации, составляющий несколько десятков лет. В связи с этим, в настоящее время находятся в эксплуатации морские суда различных поколений. Электротехнические комплексы морских судов в большинстве случаев имеют в своем составе электростанцию переменного тока, источниками электроэнергии в которой чаще всего являются параллельно работающие дизель-генераторные установки. В случае необходимости использования потребителей постоянного тока, таковые получают питание от преобразователей переменного напряжения в постоянное. Достаточно редко можно встретить на морских судах генераторы постоянного тока в качестве основных источников электроэнергии. Особый интерес с точки зрения исследования вызывают морские суда с гребной электрической установкой.

Электротехнические комплексы морских судов постоянно совершенствуются. Настоящим открытием в области электродвижения морских судов, произошедшее в конце прошлого века, можно считать разработку концепции движения и управления судном с помощью винто-рулевых колонок. В работе [5] отмечается большая важность и ценность изобретения и широкого применения бестрансформаторных гребных установок с винторулевыми колонками Azipod в составе единых судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Статьи [6,7] посвящены использованию многофазных генераторов и многоуровневых инверторов напряжения в единых бестрансформаторных СЭЭС. В статьях [8,9,10] рассматривается сравнение алгоритмов расчетных методов учета потерь в низковольтных сетях с учетом основных параметров электрооборудования. Построены номограммы для определения эквивалентного сопротивления с различными параметрами оборудования, обладающие достаточной точностью и пригодные для практического применения.

В работе [11] рассмотрен асинхронный электропривод с частотным управлением, оснащенный дополнительными элементами - импульсным коммутатором и индуктивным накопителем энергии в звене постоянного тока (ПТ) преобразователя частоты (ПЧ),

обеспечивающий стабилизацию напряжения при просадке напряжения в питающей сети. Поскольку система управления типового ПЧ, выполненного на базе нерегулируемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения, не допускает работу при пониженных напряжениях в звене ПТ, ввиду наличия соответствующих защит по уровню напряжения, создан опытный образец преобразователя частоты с расширенными функциональными возможностями, управляемый микропроцессорным устройством фирмы «Texas Instruments» марки TMDX28069, обеспечивающий нормальную работу при просадках напряжения до 48%, за счет включения в звено постоянной высокочастотной импульсной системы повышения напряжения на базе транзисторного коммутатора и индуктивного накопителя энергии. В работе [12] решается задача математического моделирования многофазного синхронного двигателя с постоянными магнитами.

В работах [13,14,15] проводится анализ судовых электротехнических комплексов с точки зрения возникновения обменных колебаний мощности (ОКМ) и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной эксплуатации дизель-генераторных установок в единой СЭЭС с гребными электроприводами.

Целью статьи является анализ опыта использования и исследование электротехнических комплексов морских судов для выяснения возможности улучшения их характеристик, получить данные об уровнях шума и вибрации элементов электротехнического комплекса.

Материалы и методы (Materials and methods)

Морские суда, оснащенные винторулевыми колонками (рис. 1) обладают исключительной маневренностью и отличными ледоходными качествами. Двигательный модуль находится под дном судна и в нем находится электрический двигатель переменного тока. На судах с винторулевыми колонками отсутствует традиционный руль, а управление судном осуществляется рулевым модулем, который поворачивает гондолу. Мощность электрических двигателей винторулевых колонок достигает нескольких десятков МВт.

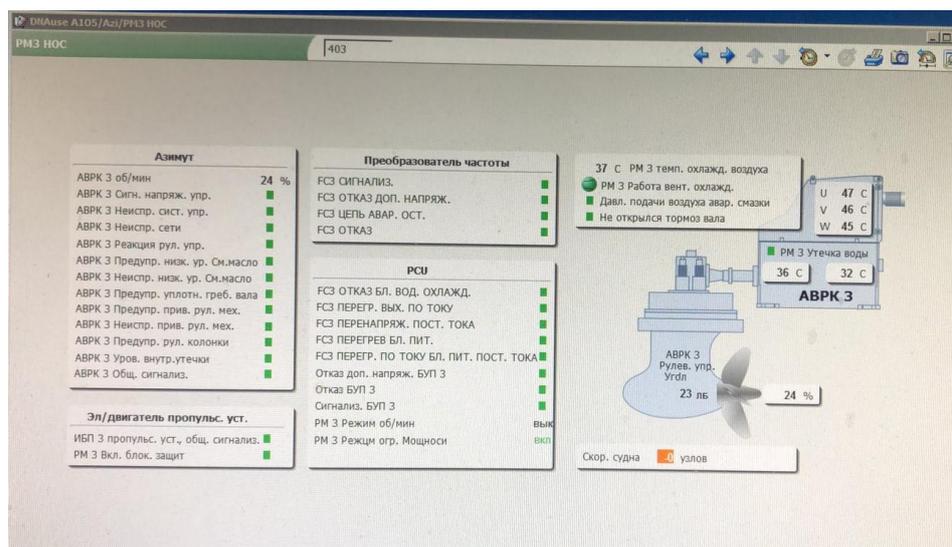


Рис. 1. Винторулевая колонка Azipod на ледоколе Балтика (интерфейс пользователя DNause) *Fig. 1. Rudder column Azipod on the Baltika icebreaker (DNause user interface)*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Даже по сравнению с винторулевой колонкой типа «z» винторулевые колонки с электродвигателем внутри типа Azipod обладают полным перечнем преимуществ. Azipod изначально предназначены для работы на ледоколе, они имеют механически более простую конструкцию, механические потери составляют всего 0,5 %, вибрация и шум даже при высокой скорости низкие, выдерживаемая перегрузка по крутящему моменту высокая, более высокая устойчивость частоты вращения, меньшая вероятность остановки гребного винта. Также электрические винторулевые колонки не имеют зубчатых колес, требуют небольшое количество смазочного масла, их валопровод крепится всего на двух подшипниках, а зазор между кромкой лопасти намного больше. По мере развития технологий винторулевые колонки стали оснащаться синхронными двигателями с постоянными магнитами. Изначально скорость вращения двигателя управлялась

преобразователями частоты, в качестве которых применялись циклоконверторы. Сейчас им на смену пришли цифровые ПЧ со звеном ПТ (рис. 2).

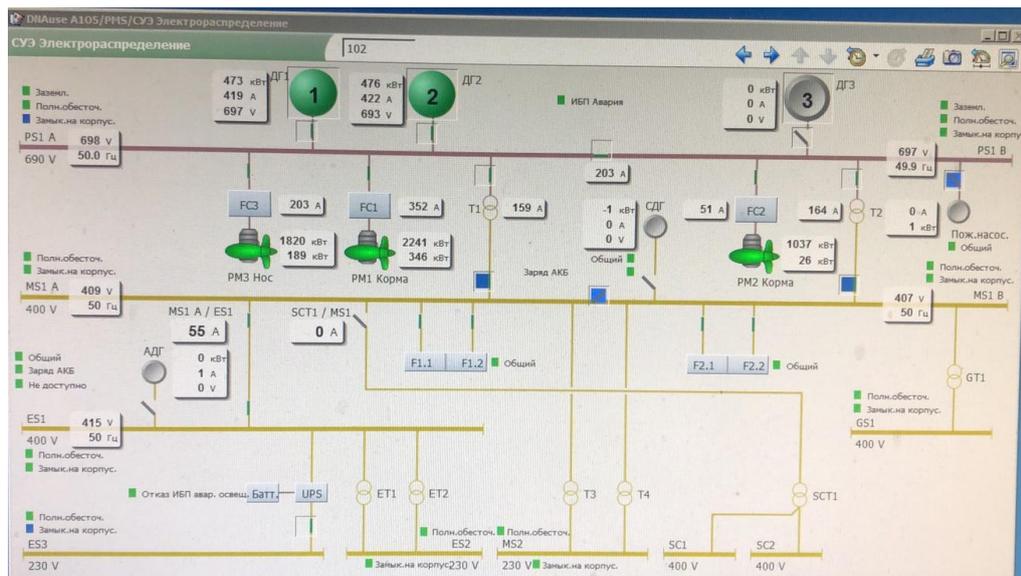


Рис. 2. Схема электротехнического комплекса ледокола «Балтика» (интерфейс пользователя DNaUse)

Fig. 2. Diagram of the electrical power system of the icebreaker “Baltika” (DNaUse user interface)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основным узлом блока управления приводом DSU является диодный выпрямитель. Он преобразует трехфазный переменный ток в постоянный ток, который далее поступает в звено ПТ электропривода. Звено ПТ затем подает питание на инвертор, который управляет электродвигателем. К промежуточной цепи могут быть подключены только один инвертор (одиночный привод) или несколько инверторов (мультидрайв).

DSU имеет два режима: рабочий режим и режим запуска. В рабочем режиме диоды соединяют фазы переменного тока с шиной постоянного тока в циклической последовательности. В режиме запуска DSU находится лишь несколько секунд после подачи команды запуска пользователем.

На рисунке 3 показана типичная зарядка шины постоянного тока.

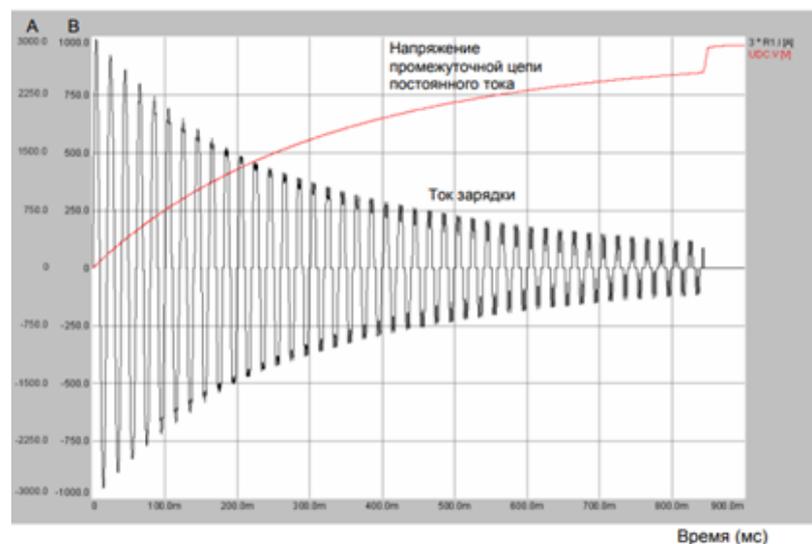


Рис. 3. Зарядка шины постоянного тока

Fig. 3. DC Bus Charging

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При снижении или исчезновении питающего напряжения двигатель снабжает привод энергией за счет своего вращения, сохраняя таким образом работоспособность привода (рис. 4). Если контактор за время отсутствия питания не разомкнулся, то после возобновления подачи питания система продолжит работу. Также возможна установка

источника бесперебойного питания в качестве схемы удержания главного контактора если напряжение звена ПТ не ниже $0,82 \cdot 1,35 \cdot U_{\text{Imin}}$, где U_{Imin} - минимальное значение напряжения. Таким образом, краткосрочные исчезновения питания не нарушают работу привода. Также существует защита от увеличения напряжения выше установленного предела $1,24 \times 1,35 \times U_{\text{Imax}}$, где U_{Imax} - максимальное значение входного напряжения.

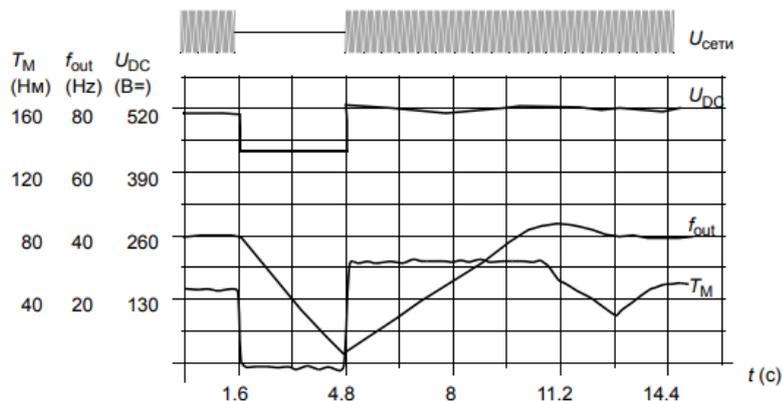


Рис. 4. Управление низким напряжением U_- – напряжение звена ПТ привода, f_{out} – частота привода на выходе, T_M – вращающий момент

Fig. 4. Low voltage control U_- – DC drive link voltage, f_{out} – drive output frequency, T_M – torque

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

DTC управление двигателем со стороны преобразователя частоты основано на прямом управлении моментом вращения. Также существует режим скалярного управления гребным электродвигателем.

Для питания переменным током каждой из трех фаз гребного двигателя предусмотрена параллельная работа от 2 до 12 инверторов (рис. 5). Таким образом обеспечивается номинальная мощность.

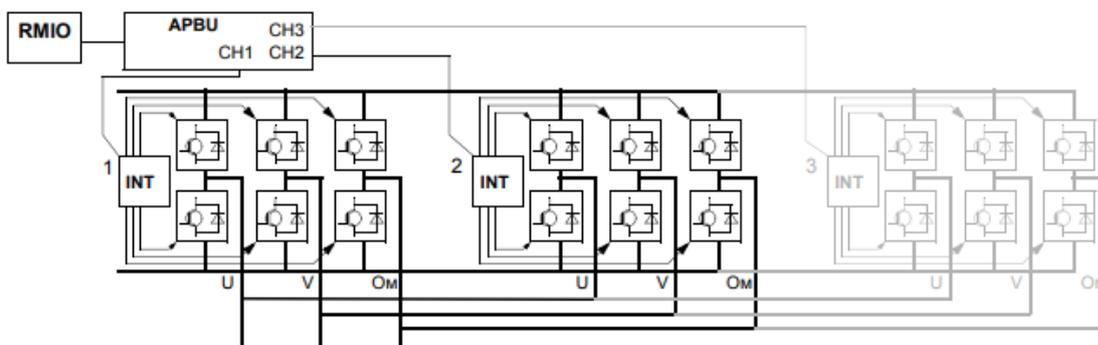


Рисунок 5 – Блок-схема инвертора (2 – 12 параллельных инверторов) RMIO - блок управления, AINT – интерфейсный блок, APBU – блок разветвления

Figure 5 – Inverter block diagram (2 – 12 parallel inverters) RMIO - control unit, AINT – interface unit, APBU – branching unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предусмотрена возможность продолжения работы схемы в случае выхода из строя одного или нескольких инверторов. При этом неисправный модуль удаляется и производится перепрограммирование параметра. Если продолжается работа с ограниченным током, то необходимо установить число имеющихся инверторных модулей. Происходит автоматическое изменение конфигурации линии связи PPCS, и максимальный ток ограничивается внутренним образом в соответствии с новой конфигурацией инверторов и номинальным током инверторов.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На ледоколе Балтика проведены исследования, направленные на выяснение уровней шума и вибрации при работе судового электротехнического комплекса. Типичные уровни структурного шума выше и ниже упругих опор дизель-генераторных установок представлены как скорость вибрации в дБ, отсчет 1×10^{-6} мм/с, на октавную полосу (рис. 6 и 7).

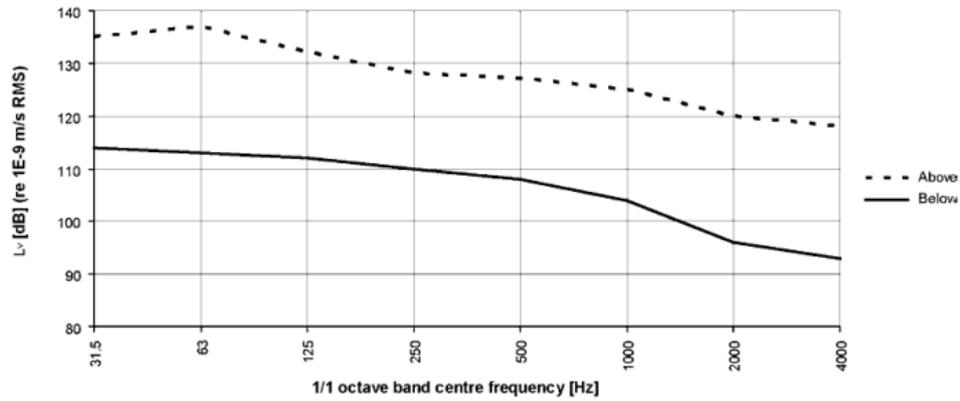


Рис. 6. Главные двигатели, типичные уровни корпусного шума выше и ниже упругого крепления

Fig. 6. Main engines, typical structure-borne noise levels above and below elastic mounting

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

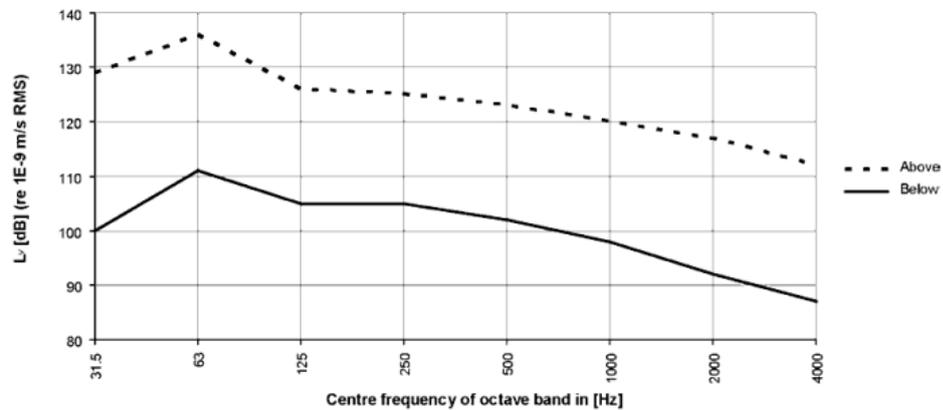


Рис. 7. Генераторные установки, типичные уровни структурного шума выше и ниже устойчивого крепления

Fig. 7. Generator sets, typical structure-borne noise levels above and below stable mounting

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздушный шум двигателей измеряется как уровень звуковой мощности в соответствии со стандартом ISO 9614-2. Результаты для каждой дизель-генераторной установки представляют собой уровень звуковой мощности двигателя, взвешенный по шкале А, при полной нагрузке и номинальном режиме скорости (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Уровень звуковой мощности двигателя W20 по шкале А в октавном диапазоне частот (дБ, по отношению к 1 пВт)

Sound power level of the W20 engine on the A scale in the octave frequency range (dB, ref. 1 pW)

Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Общий
8L	84	98	109	111	111	115	105	118
9L	97	97	106	110	113	113	111	120

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты в таблице 2 представляют собой типичный уровень звуковой мощности выхлопных газов, излучаемый из выпускного отверстия турбонагнетателя в свободное поле при полной нагрузке двигателя и номинальной частоте вращения. Строки 8L в таблицах 1 и 2 соответствует 8 цилиндровому рядному дизель-генераторному агрегату Wärtsilä 8L20, а строки 9L соответствует 9 цилиндровому рядному дизель-генераторному агрегату Wärtsilä 9L20. Wärtsilä 9L20 и 8L20 четырехтактные, нереверсивные, дизельные двигатели с турбонадувом и промежуточным охлаждением, с прямым впрыском топлива.

Таблица 2
Table 2

Уровень звуковой мощности выхлопных газов в свободном поле в октавном диапазоне частот (дБ, по отношению к 1 пВт)
Sound power level of exhaust gases in a free field in the octave frequency range (dB, ref. to 1 pW)

Гц	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	Общий
8L	135	141	143	135	137	122	118	112	146
9L	142	152	151	141	132	122	116	114	155

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования зафиксировали для дизель-генераторных установок уровни вибрации, приведенные в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Измерение вибрации при самовозбуждении, $n = 1000$ об/мин, $U_1 = 690$ В
Vibration measurement during self-excitation, $n = 1000$ rpm, $U_1 = 690$ V

Край со стороны дизеля	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	
	0,4	0,7	1,4	мм/с
Противоположный край	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	
	0,7	0,7	0,4	мм/с

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оптимизация магнитного потока электродвигателей винторулевых колонок ограничивает динамические характеристики управления приводом, поскольку при малом задании магнитного потока крутящий момент привода не может быстро увеличиваться. Это способствует уменьшению потребления электроэнергии и уменьшает уровень шума до 10 процентов.

Измерение формы сигнала напряжения дало следующие результаты - коэффициент нелинейного искажения формы линейного напряжения 4,21 % а коэффициент нелинейного искажения формы сигнала фазного напряжения 5,27 %.

Проведенные исследования выявили существование ОКМ (рис. 8) и синфазных (рис. 9) колебаний мощности при совместно параллельной работе главных дизель-генераторных установок.

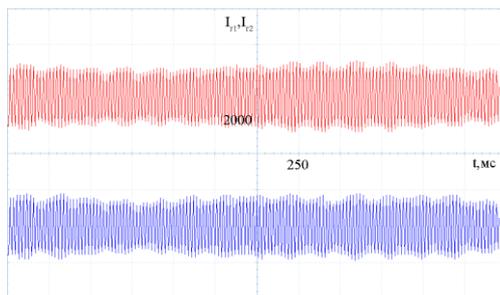


Рис. 8. Осциллограммы обменных колебаний мощности при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса

Fi.8 - Oscillograms of power exchange oscillations during joint-parallel operation of ship electrical power system generators

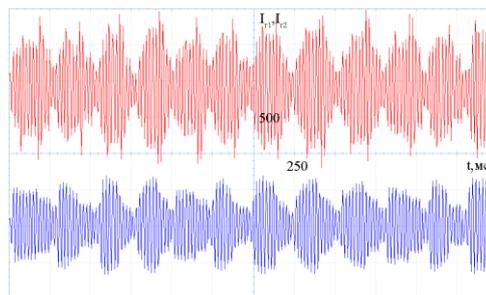


Рис. 9 - Осциллограммы синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса

Fig. 9 - Oscillograms of common-mode power oscillations during joint-parallel operation of ship electrical power system generators

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Такой режим работы используется постоянно для питания судовых потребителей, в том числе винторулевых колонок Azipod, например, на ледоколе Балтика. Такие колебания мощности приводят к ухудшению эксплуатационных характеристик судового электротехнического комплекса. Одним из последствий, вызываемых обменными и синфазными колебаниями мощности, является повышенные вибрации и шум.

Обсуждение (discussions)

Проведенные на ледоколе Балтика исследования выявили наличие шумов и вибраций элементов судового электротехнического комплекса. Наиболее существенный вклад в уровень шума и вибрации на судне вносят дизель-генераторные установки и гребные электрические двигатели, размещенные в винторулевых колонках. Наличие на судне вибрации вызывает появление усталостных повреждений. Также происходит ослабление резьбовых и клепанных соединений. Технологические зазоры меняют свои конструктивные значения и не могут выполнить на заданном уровне свою технологическую функцию. Вибрация увеличивает ошибку измерения приборов с подвижными элементами. Особенно чувствительны к вибрационным повреждениям электронные приборы и устройства, в которых могут образовываться трещины на платах и в местах пайки. Вибрация и шум оказывают вредное воздействие на людей, находящихся в зоне их действия. Как было отмечено выше обменные и синфазные колебания мощности усиливают вибрацию и шум при работе электроприводов, входящих в состав электротехнического комплекса судна, в том числе гребных электродвигателей системы Azipod. Однако, основной причиной существования таких колебаний мощности является наличие технологических зазоров люфта в системах управления частотой дизель-генераторных установок, на изменение которого оказывает влияние вибрация. Таким образом, между вибрацией и колебаниями мощности между параллельно работающими генераторами электротехнического комплекса существует взаимное влияние. Внедрение блока устранения ОКМ позволит уменьшить амплитуду колебаний мощности, что в свою очередь уменьшит вибрацию.

Значительного снижения шумов и вибраций электрических двигателей винторулевых колонок *Azipod* можно достичь влиянием на конфигурацию магнитного поля увеличением количества фаз обмоток. Таким образом, целесообразным является применение многофазных электрических машин переменного тока.

Увеличение числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя способствует исключению асинхронных гармоник из состава магнитного поля, что значительно улучшает виброшумовые характеристики.

На рисунке 10 изображены экспериментальные графики изменения относительных виброскоростей (по отношению к ее максимальному значению при $f=50$ Гц) в функции числа фаз [16].

При рассмотрении проекций напряжения статора, приведенного к первой пространственной гармонической для трех- и девятифазного АД (рис.11) очевидно, что несинусоидальность напряжения при увеличении числа фаз существенно уменьшается [16]. Эта особенность приводит к уменьшению величины пульсаций электромагнитного момента двигателя.

$$\Delta M_{ЭМ} \equiv \frac{1}{m^2}.$$

Частоту пульсаций можно найти умножив частоты питающего напряжения f на число фиксированных положений вектора напряжения на комплексной плоскости n .

Если пульсации момента изменяются по синусоидальному закону:

$$\Delta M_{ЭМ}(t) = \Delta M_{\max} \sin(2\pi fnt + \phi_{M0}),$$

то пульсации скорости будут изменяться в соответствии с формулой

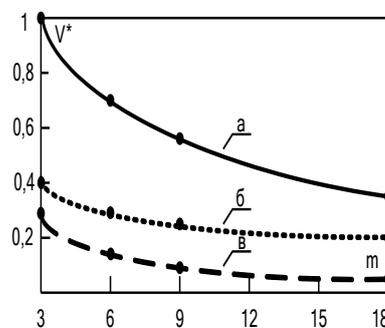


Рис. 10 - Графики относительных виброскоростей при а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 2,5 Гц
 Fig.10 - Graphs of relative vibration velocities at a – 50 Hz; b – 30 Hz; c – 2.5 Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

$$\Delta\Omega(t) = \frac{1}{J_{\Sigma}} \int \Delta M_{\Sigma M}(t) dt = \frac{\Delta M_{\max}}{2\pi f n J_{\Sigma}} \sin\left(2\pi f n t + \varphi_{M0} - \frac{\pi}{2}\right) = \Delta\Omega_{\max} \sin\left(2\pi f n t + \varphi_{M0} - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $\Delta\Omega_{\max} = \frac{\Delta M_{\max}}{2\pi f n J_{np}} \equiv \frac{1}{m^3} \frac{1}{f}$ - величина пульсаций скорости АД,

(J_{np} – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции).

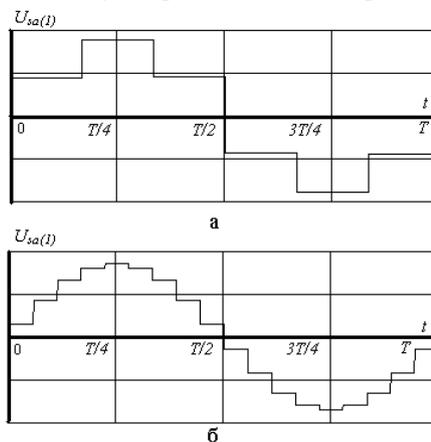


Рис. 11 - Напряжение статора, а – для трехфазного АД, б – для девятифазного асинхронного двигателя

Fig. 11 - Stator voltage, a – for three-phase asynchronous motor, b – for nine-phase for three-phase asynchronous motor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, величина пульсаций скорости вращения двигателя обратно пропорциональна кубу числа фаз статора и частоте питающего АД напряжения.

Использование синхронных двигателей с увеличенным числом фаз также позволяет получить существенные преимущества в снижении шума и вибрации и улучшает технико-экономические показатели. Многофазный электропривод обладает большим диапазоном регулирования скоростей, лучшей перегрузочной способностью и КПД, выше быстродействие и надежность.

В судовом электротехническом комплексе, например, на рассмотренном на ледоколе Балтика, можно распараллелить инверторы, питающие каждую из трех фаз и подключить их индивидуально или попарно на каждую отдельную фазу многофазного электродвигателя. Кроме этого, при таком подключении необходимо обеспечить соответствующие сдвиги фаз.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ и исследования работы электротехнических комплексов морских судов показал существование в них шумов, вибраций и колебаний мощности между параллельно работающими генераторными установками. В результате исследований, проведенных на примере электротехнического комплекса с винторулевыми колонками на ледоколе Балтика, предложено использовать многофазные электрические двигатели переменного тока для улучшения эксплуатационных характеристик, в том числе снижения шума и вибрации. Имеющийся опыт применения в гребных электрических установках с винторулевыми колонками Azipod частотных преобразователей на основе выпрямительного звена и инверторных блоков позволяет осуществить такое изменение в электротехнических комплексах.

Литература

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратной валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.
2. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Том: 120, Номер статьи: 109611 DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
3. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
4. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Том: 210, Номер статьи: 118558 DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.

5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), стр. 253–258.
6. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С., Кузнецов В. И., Сеньков А. П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.
7. Авдеев, Б. А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов. Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99–113.
8. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. Т.20 № 3-4. С. 62–71.
9. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices . International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
10. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ.2018;4(40):53-65.
11. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, 2015. №3(61). С. 36-38.
12. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 5. – С. 37-43.
13. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2016. – 172 с.
14. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46-54.
15. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.
16. Ананьев, С. С., Голубев А. Н. Асинхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками. Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2009. – 160 с.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. E-mail: Savenko-70@mail.ru.

Савенко Павел Станиславович – аспирант кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznecov P. V., Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta , 2021, № 3. С. 93–100.
2. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Book: 210, 118558, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
3. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
4. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Book: 120,109611, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), pp. 253–258.
6. Gubanov Y. A., Kalinin I. M., Kornev A. S., Kuznetsov V. I., Sen'kov A. P. Directions of improvement for ship unified power systems. Marine Intelligent Technology, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.
7. Avdeyev B. A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University. 2021; 4: 99-113.
8. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(3- 4):62-71.

9. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.

10. Gracheva E.I., Alimova A.N., Abdullazjanov R.Je. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoj moshhnosti i jelektroenergii v nizkovol'nyh cehovyh setjah. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2018;4(40):53–65.

11. Meshherjakov VN, Cherkasova VS, Meshherjakova OV. Korrekcija sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym jelektroprivodom. Sistemy upravlenija i informacionny etehnologii. 2015;3(61): 36-38.

12. Aleynikov A.V, Golubev A.N, Martynov V.A. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. Vestnik IGEU. 2017;5:37- 43.

13. Savenko A.E, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.

14. Savenko A.E, Savenko P.S. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(5-6):46-54.

15. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.

16. Ananyev S. S. Golubev A.N. Asynchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2009. 160 p.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru

Pavel S. Savenko - Kerch State Maritime Technological University.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено *10.12.2023 г.*

Отредактировано *15.12.2023 г.*

Принято *22.12.2023 г.*



РАЗРАБОТКА ИЗМЕНЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫЙ СВОД ПРАВИЛ В ЧАСТИ АКТУАЛИЗАЦИИ УДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Солюянов^{1,2,*} В.И., Солюянов^{1,2,3} Ю.И., Федотов^{1,3} А.И., Ахметшин^{1,3} А.Р.

¹Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

²АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>, vs@tatem.ru

Резюме. *ЦЕЛЬ.* Разработать изменения в строительный свод правил в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов. Выполнить сравнительный анализ мощности технологического присоединения многоквартирных жилых домов, рассчитанной по нормативно-техническим документам и по разработанным на основе фактических измеренных данных с оценкой эффекта от актуализации удельных расчетных электрических нагрузок. *МЕТОДЫ.* При выполнении поставленной цели были использованы математические и статистические методы анализа. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Выполнена статистическая обработка удельной электрической нагрузки квартир многоквартирных жилых домов Московской области кластера 11–18 этажей за двадцать три месяца 2021 – 2023 гг., которая позволила сформировать статистически значимые выборки путем исключения из них выбросов и получить их базовую описательную статистику. На основании полученных результатов разработаны изменения в нормативно-технический документ в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок квартир многоквартирных жилых домов Московской области кластера 11 – 18 этажей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Внедрение актуализированных значений удельной расчетной электрической нагрузки приведет к выбору силовых трансформаторов с оптимальной загрузкой, что, с одной стороны, сократит «запертую электрическую мощность», вследствие чего уменьшатся потери электроэнергии, а с другой стороны, снизит затраты на технологическое присоединение.

Ключевые слова: удельные расчетные электрические нагрузки; электроснабжение; запертая электрическая мощность; резервная электрическая мощность; проектирование жилых зданий.

Для цитирования: Солюянов В.И., Солюянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. Разработка изменений в строительный свод правил в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 89-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-89-100.

DEVELOPMENT OF CHANGES TO THE CONSTRUCTION CODE OF RULES IN PART OF UPDATED SPECIFIC ELECTRICAL LOADS

Soluyanov^{1,2,*} V.I., Soluyanov^{1,2,3} Yu.I., Fedotov^{1,3} A.I., Akhmetshin^{1,3} A.R.

¹Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

²JSC «Tatelectromontazh», Kazan, Russia

³Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>, vs@tatem.ru

Abstract. *THE PURPOSE.* Develop changes to the building code of rules regarding updating the specific calculated electrical loads of multi-apartment residential buildings. Perform a comparative analysis of the power of technological connection of multi-apartment residential buildings, calculated according to regulatory and technical documents and according to those developed on the basis of actual measured data with an assessment of the effect of updating

specific design electrical loads. METHODS. To achieve this goal, mathematical and statistical methods of analysis were used. RESULTS. Statistical processing of the specific electrical load of apartments in multi-apartment residential buildings in the Moscow region of a cluster of 11–18 floors for twenty-three months of 2021–2023 was carried out, which made it possible to form statistically significant samples by excluding outliers from them and obtaining their basic descriptive statistics. Based on the results obtained, changes were developed to the regulatory and technical document in terms of updating the specific calculated electrical loads of apartments in multi-apartment residential buildings in the Moscow region of the cluster 11 - 18 floors. CONCLUSION. The introduction of updated values of the specific calculated electrical load will lead to the selection of power transformers with optimal loading, which, on the one hand, will reduce the “locked electrical power”, resulting in reduced electricity losses, and on the other hand, will reduce the cost of technological connection.

Keywords: *specific design electrical loads; power supply; locked electrical power; standby electrical power; design of residential buildings.*

For citation: Soluyanov V.I., Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R. Development of changes to the building code of rules regarding the updating of specific calculated electrical loads of multi-apartment residential buildings. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 89-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-89-100.

Введение (Introduction)

С каждым годом в Российской Федерации (РФ) увеличивается объем вводимых многоквартирных жилых домов (МКД), рисунок 1, в соответствии с указами Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»¹. Поэтому актуальным является проведение работ по совершенствованию и созданию нормативной технической базы в сфере оптимизации проектных и электромонтажных работ в гражданском строительстве.

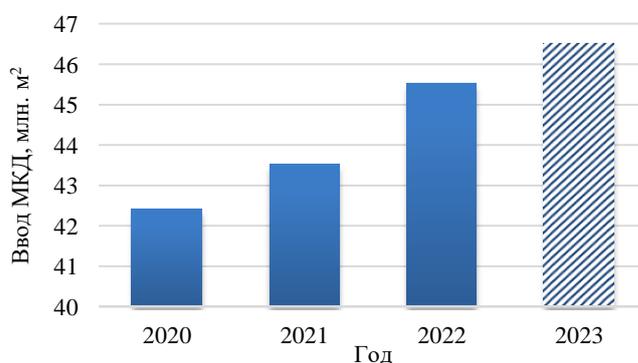


Рис. 1. Ввод МКД в РФ

Fig. 1. Commissioning of multi-apartment residential buildings in the Russian Federation

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Совершенствование нормативной базы² в части обновления значений удельных расчетных электрических нагрузок (УРЭН) является актуальной задачей в жилищном строительстве [1-10].

Использование устаревших значений УРЭН в жилищном строительстве привело к тому, что трансформаторные подстанции (ТП) загружены в среднем не более 45% [1-3], к примеру, в Московской области (МО) 42 % ТП имеют коэффициент загрузки (k_3) менее 30% (рис. 2).

Невысокая загрузка ТП (рис. 2) свидетельствует о необходимости пересмотра нормативных значений УРЭН. Решение этой задачи приведет к оптимальной загрузке ТП, что, с одной стороны, сократит «запертую электрическую мощность», вследствие чего уменьшатся потери электроэнергии [11-13], а с другой стороны, снизит затраты на технологическое присоединение [1-3].

¹ Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»

² СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (с Изменениями № 1-5)

Своевременная актуализация действующих нормативно-технических документов (НТД)² в части УРЭН необходима вследствие:

- улучшения класса энергопотребления бытовой техники до А++ (разница в электропотреблении между классом G и А++ составляет 75%)³;
- улучшения показателей удельного расхода тепловой и электроэнергии в МКД до 40% (с 2023 г.) и до 50% (с 2028 г.)⁴;
- внедрение энергосервисных договоров, предусматривающих осуществление полного комплекса работ по внедрению энергосберегающих решений специализированной энергосервисной компанией, что позволяет сократить потребление электрической энергии от 40 до 60%.

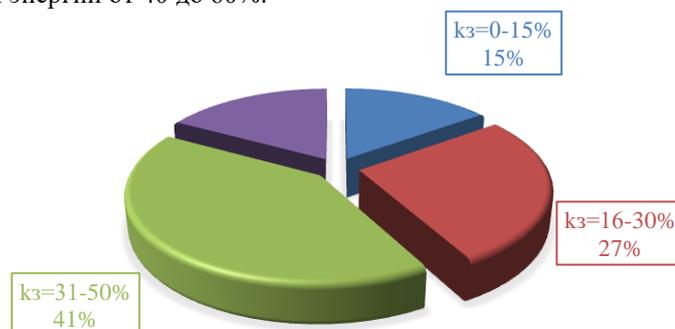


Рис. 2. Коэффициент загрузки ТП МО

Fig. 2. Loading of transformer substations in the Moscow region

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии (ИПУЭЭ) позволяет реализовать научно-исследовательскую работу (НИР) по актуализации УРЭН на основании фактических данных [14-17]. Современные МКД имеют возможность полного автоматизированного сбора информации (АСИ) по всем видам коммунальных услуг. Для примера представлена принципиальная схема автоматизированного сбора информации для одного из МКД МО, рисунке 3.

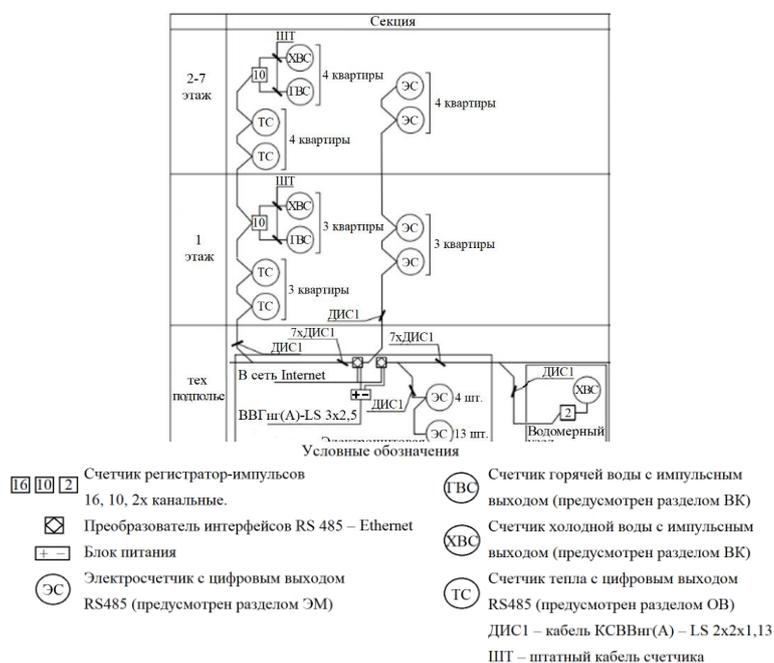


Рис. 3. Принципиальная схема АСИ по всем видам коммунальных услуг

Fig. 3. Schematic diagram of automated collection of information on all types of public services

³ Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года)

⁴ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.06.2016 № 399/пр «Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов»

Литературный обзор (Literature Review)

Проблема, связанная с расхождением фактически измеренных и рассчитанных по действующим НТД² электрических нагрузок МКД, неоднократно освещена в отечественной научной литературе.

Исследования, представленные в статье [1], показали, что фактические значения электрической нагрузки МКД в 1,5 - 2,5 раза ниже расчетных, что демонстрирует необходимость пересмотра НТД².

В статье [2] представлено решение данной проблемы на примере Республики Татарстан (РТ) путем актуализации УРЭН, что приведет к экономическому эффекту за счет снижения заявленной мощности на технологическое присоединение (уменьшается «запертая электрическая мощность»), как следствие уменьшатся мощности силовых трансформаторов (СТ), сечения питающих кабелей.

Результаты, полученные на основе получасовых графиков электрической нагрузки от ИПУЭЭ квартир МКД МО, представленные в статье [3], показывают обязательность анализа электропотребления МКД с целью выявления коммерческих помещений и неэксплуатируемых квартир на интервале измерений для точности расчета УРЭН МКД.

Проблема повышения точности расчёта электрических нагрузок МКД с квартирами, оснащёнными электроплитами, рассматривается в статье [4], в которой предлагаются методики определения электрических нагрузок квартир с электрическими плитами жилой части МКД. А проблемы расчёта электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей (КБП) микрорайонов мегаполиса с анализом фактических и расчётных значений электрических нагрузок микрорайонов приведены в статье [5-6].

В статье [7] проведены исследования соответствия фактического электропотребления расчетному в жилых комплексах с преобладанием КБП на примере ряда городов Челябинской области (ЧО) за период 2021-2022 гг. Предложен новый показатель - обобщенный коэффициент неопределенности A_i для повышения точности прогноза электропотребления и расчета электрических нагрузок в распределительных электрических сетях с преобладанием КБП ЧО.

Структура нагрузки КБП ВРУ современного МКД представлена в статье [8]. Суммарная максимальная нагрузка в данных МКД, рассчитанная без учета коэффициентов одновременности, может в ряде случаев превосходить нормативную нагрузку [8]. Анализ конфигурации современных графиков нагрузки жилых зданий показал значительное отличие от приведенных в литературных источниках как по наличию и значению характерных минимумов и максимумов, так и по продолжительности характерных периодов в суточном разрезе электрической нагрузки [9].

В статье [10] для актуализации действующих методик определения расчетной нагрузки МКД были получены регрессионные модели, по которым можно определить значение расчетных нагрузок различных категорий нагрузок вводного распределительного устройства (ВРУ) многоквартирного жилого дома (МКД) в зависимости от количества квартир и числа этажей. В результате сформирована математическая модель для определения расчетной нагрузки ВРУ современного МКД.

Многочисленность публикаций, посвящённых анализу электрических нагрузок МКД, подтверждает актуальность темы, затронутой авторами в статье.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для статистической обработки суточных профилей электрической нагрузки квартир МКД МО были использованы данные домов типовых проектов кластера 11–18 этажей, введенных в эксплуатацию с 2015–2019 гг. за период с 01 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 г. В МКД были выявлены и исключены малоэксплуатируемые квартиры, с целью повышения точности расчетов [1-3]. В разрезе дня с максимальным потреблением найдено значение максимальной электрической нагрузки, далее максимальной удельной электрической нагрузки квартир МКД.

За день максимального электропотребления в течение декабря 2021 г. и 2022 г. для примера приведены гистограммы распределения (рис. 4), плотность распределения вероятностей, полученная методом «ядерного сглаживания» (рис. 5), а в табл. 1 результаты проверки гипотезы на нормальность распределения [18, 19] максимальной удельной нагрузки квартир МКД МО.

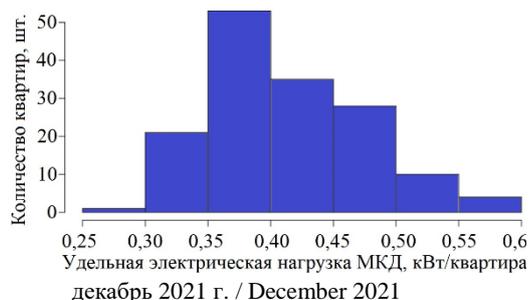


Рис. 4. Гистограмма распределения максимальной удельной нагрузки

*Источник: составлено автором.

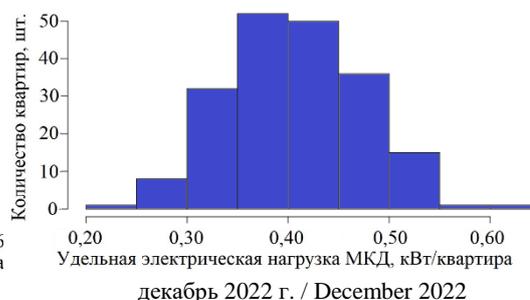


Fig. 4. Histogram of distribution of maximum power density

Source compiled by the author

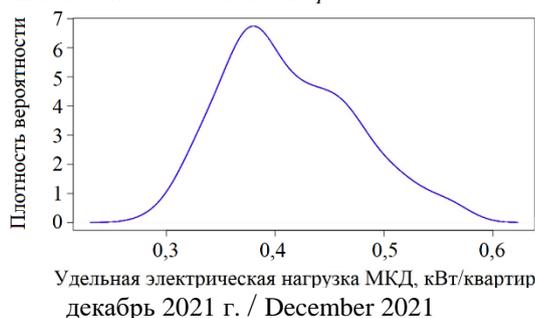


Рис. 5. Плотность распределения вероятностей, полученная методом «ядерного сглаживания»

*Источник: составлено автором.

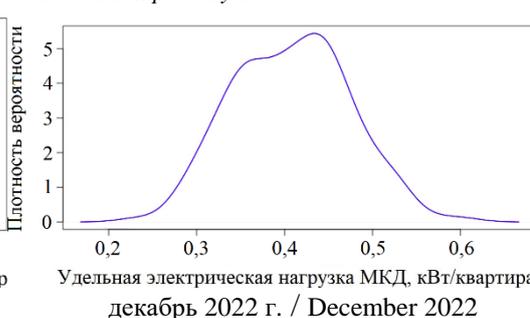


Fig. 5. Probability density distribution obtained by the «kernel smoothing» method

Source compiled by the author

Таблица 1
Table 1

Результаты проверки гипотезы на нормальность распределения максимальной удельной нагрузки квартир МКД
Results of testing the hypothesis for the normality of the distribution of the maximum specific power of apartments in residential buildings

Название теста	Тест Шапиро–Уилка	Тест Лиллие-форса	Тест омега-квадрат	Тест Андерсона-Дарлинга	Тест хи-квадрат Пирсона
декабрь 2021					
Значение p-value	0,69 > 0,05	0,37 > 0,05	0,28 > 0,05	0,37 > 0,05	0,07 > 0,05
декабрь 2022					
Значение p-value	0,74 > 0,05	0,43 > 0,05	0,32 > 0,05	0,43 > 0,05	0,08 > 0,05

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

По результатам за декабрь 2021 г. и декабрь 2022 г., приведенным на рисунках 4 и 5, в табл. 1, можно сделать вывод о том, что максимальная удельная электрическая нагрузка квартир МКД МО подчиняется закону нормального распределения.

В таблице 2 представлены базовые статистические показатели максимальной удельной нагрузки квартир выборки МКД МО после исключения выбросов (для выполнения закона нормального распределения) за день максимального электропотребления в декабре 2021 и 2022 г. Где Q25%, кВт/кв – первый квартиль; Q75%, кВт/кв – третий квартиль; пв - размер выборки (число домов); пср – среднее значение, кВт/кв; пмин - минимальное значение, кВт/кв; пмакс - максимальное значение, кВт/кв; Sd - среднеквадратическое отклонение, кВт/кв; Ме - медиана, кВт/кв.

Расчет минимального объема репрезентативной выборки проведен при допустимой ошибке определения среднего $\pm 5\%$ и доверительной вероятности 95%. Для декабря 2021 г. минимальный объем репрезентативной выборки составил 20 МКД, для декабря 2022 г. – 41 МКД. Так как размер исследуемой выборки больше минимального объема репрезентативной выборки, полученные результаты можно распространить на генеральную совокупность МКД МО.

Таблица 2
Table 2

Базовые статистические показатели

Basic statistics

Месяц декабрь	пв, шт	Q75%, кВт/кв	Q25%, кВт/кв	пмакс, кВт/кв	пср., кВт/кв	пмин, кВт/кв	Sd, кВт/кв	Ме, кВт/кв
2021 г.	152	0,56	0,37	0,56	0,41	0,29	0,06	0,40
2022 г.	196	0,45	0,36	0,60	0,41	0,23	0,07	0,41

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Для нахождения диапазона значений удельной нагрузки МКД МО кластера 11 – 18 этажей проведен расчет доверительного интервала для средней удельной нагрузки МКД генеральной совокупности МО данного кластера. Результаты расчета доверительного интервала для средней удельной нагрузки МКД генеральной совокупности МО кластера 11 – 18 этажей за период с 01 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 гг. приведены на рисунке 6.

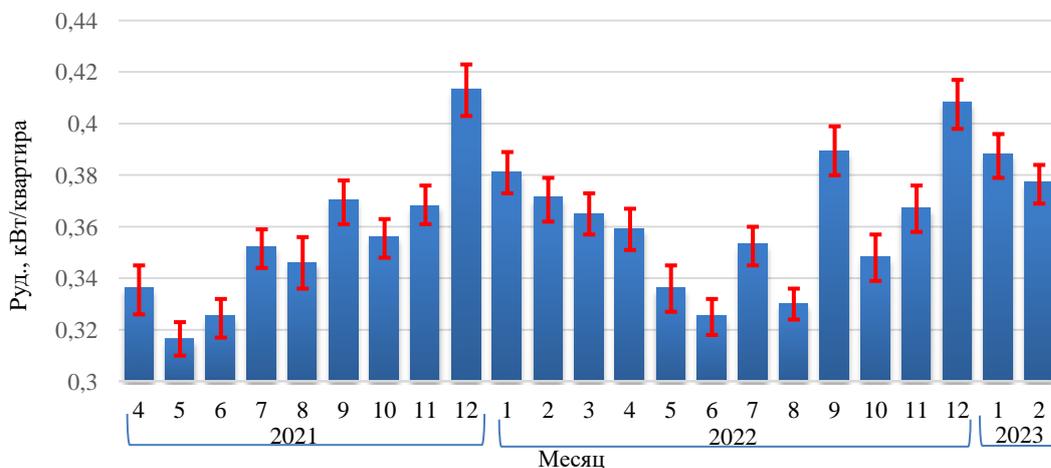


Рис. 6. Доверительный интервал для средней удельной нагрузки МКД генеральной совокупности

Fig. 6. Confidence interval for the average power density of residential buildings in the general population

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Истинное среднее значение удельной нагрузки генеральной совокупности МКД МО (рис. 6), имеет границы 0,403 – 0,423 кВт/квартира (декабрь 2021 г.) и 0,398 – 0,417 кВт/квартира (декабрь 2022 г.), в пределах которого с доверительной вероятностью 95 % находится интервал значений. Среднее выборочное значение 0,413 кВт/квартира (декабрь 2021 г.) и 0,408 кВт/квартира (декабрь 2022 г.).

На рисунке 7 представлено изменение уровня максимальной удельной нагрузки квартир МКД МО кластера 11–18 этажей за период с 1 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 г.

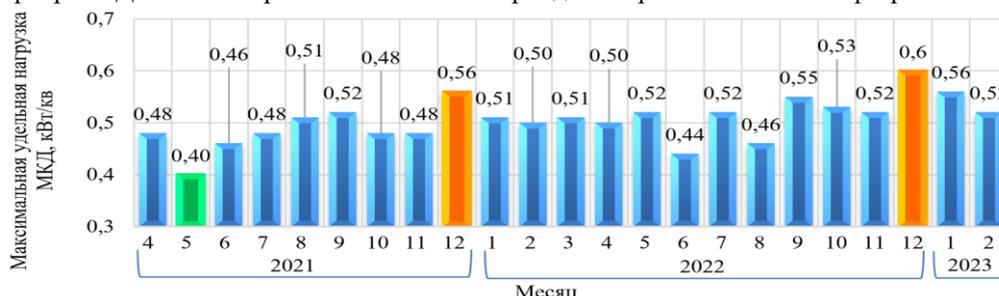


Рис. 7. Максимальная удельная нагрузка квартир МКД за период с 1 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 г.

Fig. 7. Maximum specific load of apartments in a residential building for the period from April 1, 2021 to February 28, 2023.

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Из расчетов, представленных на рис. 7, видно, что наибольшая электрическая нагрузка выборочной совокупности МКД МО кластера 11 – 18 этажей по данным за период с 1 апреля по 28 февраля 2023 г. наблюдалась в декабре 2022 г. (0,60 кВт/квартира), а в разрезе месяца – 31 декабря 2022 г. (у 69% МКД выборки). Минимальное электропотребление было зафиксировано в мае 2021 г. (0,40 кВт/квартира).

На рис. 8 приведены зависимости максимальной удельной электрической нагрузки от количества квартир, рассчитанные для примера по данным за декабрь 2021 г. и 2022 г.

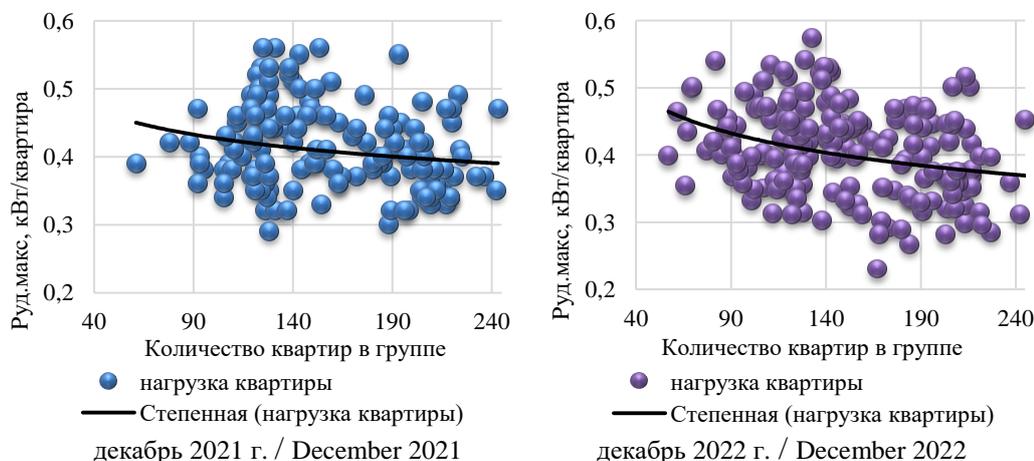


Рис. 8. Зависимость максимальной электрической нагрузки квартиры от их количества в группе

Fig. 8. Dependence of the maximum electrical load of apartments on their number in the group

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Как видно из рисунка 8, удельная электрическая нагрузка квартир в МКД уменьшается при увеличении количества, что объясняется несовпадением максимумов. Значения электрических нагрузок квартир (рис. 8), рассчитанные для периода декабрь 2021 г. и 2022 г., лежат ниже утвержденных значений, приведенных в НТД².

Результаты (Results)

Анализ жилищного строительства РФ демонстрирует, что существует тренд в возведении МКД с числом квартир более 1000, рассчитать электрическую нагрузку для данных МКД затруднительно, поскольку таблица 7.1² ограничивается 1000 квартирами.

В основу расчетов положены выборочные совокупности получасовых графиков электрической нагрузки квартир МКД МО размером 36 804 по кластеру 11 – 18 этажей.

Для расчета УРЭН МКД для более 1000 квартир случайным образом производилась группировка квартир в количестве от 20 до 3000 в группе. Для группы каждого размера формировалось по 100 сочетаний квартир. Для каждой группы квартир определялись сутки с максимальным потреблением за каждый интервал наблюдения. В разрезе этих суток находилась максимальная нагрузка группы квартир и по ней – удельная нагрузка одной квартиры для данной группы. Для каждой группы квартир рассчитано максимальное значение УРЭН, представленное на рисунке 9.

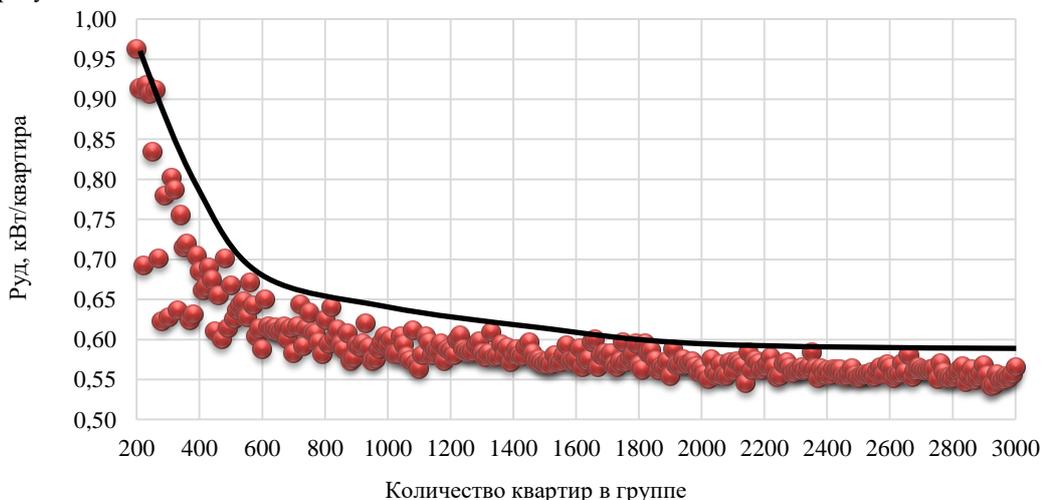


Рис. 9. Зависимость УРЭН от количества квартир в группе

Fig. 9. Dependence of the specific calculated electrical load on the number of apartments in the group

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Использование рисунка 9 позволяет определять соответствующее значение УРЭН одной квартиры для группы с количеством квартир от 200 до 3000.

Поскольку, начиная с 2000 квартир, УРЭН изменяются не значительно, предлагается ограничить таблицу 7.1² 2000 квартирами. На основании выполненной НИР разработан проект изменения в НТД² в части актуализации УРЭН для МО. Фрагмент предлагаемых изменений представлен в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Удельная расчетная электрическая нагрузка электроприемников квартир жилых зданий с электрическими плитами мощностью до 8,5 кВт
Specific design electrical load of electrical receivers of apartments in residential buildings with electric stoves with a power of up to 8.5 kW

Удельная расчетная электрическая нагрузка при количестве квартир, кВт/квартира					
200	400	600	1000	1500	2000 и более
0,91	0,79	0,67	0,63	0,61	0,59

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Эффект от применения предлагаемых изменений заключается в снижении мощности технологического присоединения, представлен на примере расчета электрической нагрузки 17 этажного 2 подъездного МКД, выполненного по типовым проектам, состоящего из 200 квартир (100 квартир на подъезд) средней общей площадью 70 м² (квартиры от 35 до 90 м²). Расчет электрической нагрузки проводится для двух вариантов: 1) по действующей НТД²; 2) по предложенным новым значениям УРЭН (табл. 3).

1. Расчетная нагрузка питающих линий, вводов и на шинах РУ-0,4 кВ ТП от электроприемников квартир определяется по формуле:

$$\text{Вариант 1: } P_{\text{кв}} = P_{\text{кв,уд}} \cdot n = 1,36 \cdot 200 = 272 \text{ кВт,}$$

$$\text{Вариант 2: } P_{\text{кв}} = 0,91 \cdot 200 = 182 \text{ кВт,}$$

где $P_{\text{кв,уд}}$ - удельная нагрузка электроприемников квартир, кВт/квартира (для варианта 1 принимаемая по таблице 7.1², для варианта 2 – табл. 3); n - число квартир, присоединенных к ТП.

2. Расчетная нагрузка линии питания лифтовых установок определяется по формуле (в подъезде установлено 2 лифтовые установки⁵, пассажирский лифт с установленной мощностью электродвигателя – 6 кВт и грузовой – 9,5 кВт):

$$P_{\text{р.л}} = K_{\text{с.л}} \sum_{i=1}^{n_{\text{л}}} P_{\text{ни}} = 0,8 \cdot (2 \cdot 9,5 + 2 \cdot 6) = 24,8 \text{ кВт,}$$

где $K_{\text{с.л}}$ - коэффициент спроса, определяемый в зависимости от количества лифтовых установок и этажности зданий, табл. 7.4²; $n_{\text{л}}$ - число лифтовых установок, питаемых линиями; $P_{\text{ни}}$ - установленная мощность электродвигателя i -го лифта по паспорту, кВт.

3. Нагрузка насосов ($P_{\text{кнс}}$) принята равной 18 кВт и ($P_{\text{дн}}$) 1,92 кВт.

4. Расчетная нагрузка жилого дома $P_{\text{р.ж.д}}$, кВт, определяется по формуле:

$$\text{Вариант 1: } P_{\text{р.ж.д}} = k_{\text{п.к}} \cdot P_{\text{кв}} + 0,9 \cdot (P_{\text{кнс}} + P_{\text{дн}} + P_{\text{рл}}) = 0,81 \cdot 272 + 0,9 \cdot (24,8 + 18 + 1,92 + 24,8) = 260,6 \text{ кВт.}$$

$$\text{Вариант 2: } P_{\text{р.ж.д}} = P_{\text{кв}} + 0,9 \cdot (P_{\text{кнс}} + P_{\text{дн}} + P_{\text{рл}}) = 182 + 0,9 \cdot (24,8 + 18 + 1,92 + 24,8) = 222,3 \text{ кВт,}$$

где $k_{\text{п.к}}$ - поправочный коэффициент для определения расчетной нагрузки жилого дома, принимается для МО по табл. 7.5а². Для значений $P_{\text{кв}}$, рассчитанных по значениям из табл. 3, поправочный коэффициент $k_{\text{п.к}}$ не применяется.

Расчеты демонстрируют, что актуализация нормативных значений УРЭН МКД МО (табл. 3) снижает заявленную мощность технологического присоединения на 14,7%.

На рисунке 10 представлен эффект от применения актуализированных УРЭН для МКД МО с количеством квартир от 200 – 1000 (при условии, что на один подъезд

⁵ СП 54.13330.2022 «Здания жилые многоквартирные СНиП 31-01-2003»

приходится 100 квартир и 2 лифтовые установки: пассажирский и грузовой лифты, нагрузка насосов ($P_{кнс}$) и ($P_{дл}$) увеличивается в два раза при числе квартир в МКД 500 и выше).

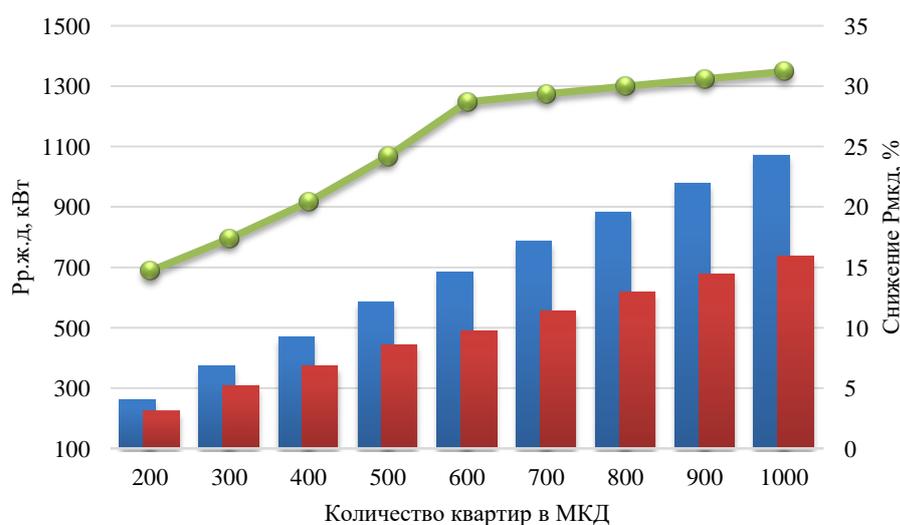


Рис. 10. Эффект от применения актуализированных УРЭН

*Источник: составлено автором.

Fig. 10. The effect of using updated specific design electrical loads

Source compiled by the author

Как видно из рис. 10, предлагаемые изменения (табл. 3) позволят сократить требуемую мощность для электроснабжения МКД. Мощности технологического присоединения снижаются в зависимости от числа квартир МКД, к примеру, для 300 квартирного МКД снижение составит 17,4 %, а для 900 квартирного – 30,6%.

Обсуждение (Discussions)

Внедрение полученных результатов при проектировании сетей электроснабжения жилых зданий позволит для строительных компаний снизить затраты на технологическое присоединение МКД. Что достигается снижением количества и оптимизации загрузки СТ, а также уменьшением сечения кабельно-проводниковой продукции.

Важно отметить, что средняя нагрузка мощностей по данным ПАО «Россети» составляет 35%⁶. В управлении ПАО «Россети» находятся ТП общей мощностью 835 тыс. МВА⁶, соответственно эффективно используется только 292,25 тыс. МВА. Низкая нагрузка СТ свидетельствует об увеличенных потерях электроэнергии в них [11, 12]. К примеру, фактические потери электрической энергии в 2022 году по данным ПАО «Россети» составили 24,7 млрд кВт·ч (компенсация затрат на потери электроэнергии – 47,4 млрд руб.)⁶, часть из которых возникла из-за недогруженных СТ, выбранных по устаревшим УРЭН.

По данным Системного оператора Единой энергосистемы установленная мощность электрических станций составляет 247,6 ГВт⁷, а максимальная нагрузка электростанций в течение 2022 г. не превышает 158,8 ГВт (13.01.2022 г.)⁷, т.е. 88,8 ГВт не используются, из них на жилые и общественные здания приходится в среднем 20%, т.е. 17,8 ГВт. В свою очередь строительство тепловой электростанции может обойтись от 40 до 70 млн. руб. за каждый МВт, соответственно, 17,8 ГВт – в среднем 1 трлн. руб., неиспользуемых инвестиций, вызванных в частности устаревшими НТД.

Выводы (Conclusions)

Максимальных значений удельная нагрузка квартир МКД МО достигает в декабре 2022 г., и численная разница, по сравнению с другими месяцами года, достаточно существенная. Поэтому формирование представления о максимальном электропотреблении МКД МО в течение года предпочтительно основывать на данных декабря.

Обобщая полученные результаты расчета удельной нагрузки, можно сделать вывод о том, что за период наблюдения с 1 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 г. максимальное значение удельной электрической нагрузки квартир не превышает значения 0,60 кВт/квартира и лежит ниже нормативных значений².

⁶ Годовой отчет ПАО «Россети» 2022 г.

⁷ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году

Полученная зависимость УРЭН от количества квартир позволяет рассчитать электрические нагрузки МКД с числом квартир свыше 1000. Так как, начиная с 2000 квартир, УРЭН изменяются не значительно, предлагается ограничить таблицу 7.1² 2000 квартирами.

Применение на практике новых нормативных значений УРЭН МКД приведёт к тому, что застройщики снизят стоимость и сроки строительства электрических сетей для электроснабжения МКД, за счет оптимального выбора электрооборудования и кабельно-проводниковой продукции.

Литература

1. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р. и др. Актуализация расчетных электрических нагрузок с последующим практическим применением на примере Республики Татарстан // Промышленная энергетика. 2021. № 2. С. 32-40. DOI 10.34831/EP.2021.15.61.005. EDN RKRWXX.
2. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р. и др. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 5(62). С. 68-73. EDN CRFVEN.
3. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р. и др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика. 2022. № 4. С. 20-28. DOI 10.34831/EP.2022.41.57.003. EDN HXYLKK.
4. Надтока И. И., Павлов А. В. Расчёты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 36-39. EDN SIAKJT.
5. Надтока И. И., Павлов А. В., Новиков С. И. Проблемы расчёта электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 136-138. EDN PWPXNL.
6. Надтока И. И., Звозникова И. А., Туруткин С. Ю. и др. Влияние длительности интервала измерений потребления электроэнергии на точность определения максимальной нагрузки по нагреву // Промышленная энергетика. 2022. № 12. С. 21-25. DOI 10.34831/EP.2022.36.20.003. EDN CEOPYU.
7. Таваров С. Ш., Сидоров А. И., Суворов И. Ф. и др. Метод прогнозирования и расчёта электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределённости // iPolytech Journal. 2023. Т. 27, № 3. С. 565-573. DOI 10.21285/1814-3520-2023-3-565-573. EDN TVYZCE.
8. Морсин И. А., Шведов Г. В. Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов // Промышленная энергетика. 2023. № 7. С. 22-29. DOI 10.34831/EP.2023.39.42.003. EDN COUNZV.
9. Соловьева А. С., Шведов Г. В. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 1. С. 27-37. DOI 10.14529/power230103. EDN WNEGUM.
10. Морсин И. А., Шведов Г. В. Математическая модель электрической нагрузки вводного распределительного устройства многоквартирного жилого дома // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 5(80). С. 20-25. EDN RWWHCO.
11. Грачева Е. И., Наумов О. В., Федотов Е. А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 71-77. EDN ZTQXSD.
12. Грачева Е. И., Наумов О. В., Садыков Р. Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 53-63. EDN VXLFSB.
13. Юндин М., Пономаренко Т., Юндин К. Анализ сверхнормативных потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ, имеющих нагрузку с преобладанием нелинейных потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S1(20). С. 6-12. EDN HJJBUL.
14. Albert A., Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you // IEEE Trans. Power Syst. vol. 28. iss. 4. 2013. INSPEC Accession Number: 13849579. Pp. 4019-4030. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266122.

15. Ledva G. S., Mathieu J. L. Separating Feeder Demand into Components Using Substation, Feeder, and Smart Meter Measurements // IEEE Transactions on Smart Grid. vol. 11. iss. 4. 2020. INSPEC Accession Number: 19710011. Pp.3280-3290. DOI: 10.1109/TSG.2020.2967220.

16. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia, Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid // IEEE Transactions on Smart Grid. 2010. vol. 1. iss. 3. INSPEC Accession Number: 11655620. Pp. 320-331. DOI: 10.1109/TSG.2010.2089069.

17. Paula Carroll, Tadhg Murphy, Michale Hanley, Daniel Dempsey, John Dunne, Household Classification Using Smart Meter Data // Journal of official statistics. vol. 34. No 1. 2018. Pp. 1-25. DOI: 10.1515/jos-2018-0001.

18. Гореева Н. М., Демидова Л. Н. Статистика // Москва: Изд.: Прометей. 2019. 496 с.

19. James G, Witten D, Hatie T, Tibshirani R. An introduction to statistical learning with Applications in R 2nd ed. Cham: Springer. 2021. p. 612.

Авторы публикации

Солюянов Владимир Иванович – начальник КМУ-1 АО «Татэлектромонтаж», ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж», секретарь комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. *Email: vs@tatem.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>.*

Солюянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж», председатель технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», председатель комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. *Email: info@roselmon.su.*

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, главный специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж», эксперт комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. *Email: fed.ai@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>.*

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж», эксперт комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. *Email: ahmetshin.ar@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>.*

References

1. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R. et al. Updating calculated electrical loads with subsequent practical application using the example of the Republic of Tatarstan. *Industrial Energy*. 2021; 2: 32-40.

2. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R. et al. Energy-saving solutions in electrical distribution networks based on the analysis of their actual loads. *Electricity. Transmission and distribution*. 2020; 5(62): 68-73.

3. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R. et al. Analysis of actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region. *Industrial Energy*. 2022; 4: 20-28.

4. Nadtoka I. I., Pavlov A. V. Calculations of electrical loads of the residential part of apartment buildings with electric stoves, based on the average loads of apartments. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2014; 3: 36-39.

5. Nadtoka I. I., Pavlov A. V., Novikov S. I. Problems of calculating electrical loads of municipal and household consumers in microdistricts of megacities. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2013; 1: 136-138.

6. Nadtoka I. I., Zvoznikova I. A., Turutkin S. Yu. et al. The influence of the duration of the measurement interval of electricity consumption on the accuracy of determining the

maximum heating load. *Industrial Energy*. 2022; 12: 21-25.

7. Tavarov S. Sh., Sidorov A. I., Suvorov I. F. et al. Method for forecasting and calculating the electrical load of municipal consumers under conditions of uncertainty. *iPolytech Journal*. 2023; 3: 565-573.

8. Morsin I. A., Shvedov G. V. Formation of electrical loads on the buses of the input distribution device of modern apartment buildings. *Industrial Energy*. 2023; 7: 22-29.

9. Solovyova A. S., Shvedov G. V. Comparative analysis of winter and summer schedules of electrical load of working days and weekends of apartment buildings with electric stoves in power supply systems of large cities. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2023; 1: 27-37.

10. Morsin I. A., Shvedov G. V. Mathematical model of the electrical load of the input distribution device of an apartment building. *Electricity. Transmission and distribution*. 2023; 5: 20-25.

11. Gracheva E. I., Naumov O. V., Fedotov E. A. Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2017; 7-8: 71-77.

12. Gracheva E. I., Naumov O. V., Sadykov R. R. Accounting for no-load waste of transformers during operation when calculating electricity losses in distribution networks. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2016; 1-2: 53-63.

13. Yundin M., Ponomarenko T., Yundin K. Analysis of excess power losses in 10/0.4 kV power transformers having a load with a predominance of nonlinear consumers. *Electricity. Transmission and distribution*. 2021; S1: 6-12.

14. Albert A., Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you. *IEEE Trans. Power Syst*. 2013; 28: 4019-4030.

15. Ledva G. S., Mathieu J. L. Separating Feeder Demand into Components Using Substation, Feeder, and Smart Meter Measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020; 11: 3280-3290.

16. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia, Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010; 1: 320-331.

17. Paula Carroll, Tadhg Murphy, Michale Hanley, Daniel Dempsey, John Dunne, Household Classification Using Smart Meter Data. *Journal of official statistics*. 2018; 34: 1-25.

18. Goreeva N. M., Demidova L. N. *Statistics // Moscow: Publishing House: Prometheus*. 2019; 496.

19. James G, Witten D, Hatie T, Tibshirani R. An introduction to statistical learning with Applications in R 2nd ed. Cham: Springer. 2021; 612.

Authors of the publication

Vladimir I. Soluyanov - "Tatelektromontazh" JSC, Kazan, Russia.

Yuri I. Soluyanov – "Roselectromontazh" Association, Moscow, Russia

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено 10.12.2023 г.

Отредактировано 15.12.2023 г.

Принято 22.12.2023 г.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 639.3

DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-101-118

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗВИТИЯ ЗООПЛАНКТОНА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ РЫБОЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ ТИПА ВОДОВОЗДУШНАЯ ЗАВЕСА В ВОДОЕМЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ ГРЭС

Калайда М.Л., Саетов А.Р., Хамитова М.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

kalayda4@mail.ru

Резюме. *ЦЕЛЬ.* Исследование особенностей гидробиологических характеристик развития зоопланктона в условиях работы рыбозащитного сооружения по типу водовоздушной завесы (ВВЗ) на объекте энергетики. *МЕТОДЫ.* Собран, обработан и проанализирован гидробиологический материал по физико-химическим характеристикам воды и по качественному и количественному составу зоопланктона в районе водозабора Заинской ГРЭС. Проведен сравнительный анализ собственных исследований и литературных данных по характеристике вод в районе рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы. Обработку материала проводили общепринятыми гидробиологическими методами в лаборатории кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Показано, что рыбозащитное устройство по типу водовоздушной завесы является многофункциональным техническим решением, которое в процессе работы изменяет физико-химические характеристики состояния экосистемы, особенно в придонном слое. Выявлено, что рыбозащитное сооружение (РЗС) по типу водовоздушной завесы не снижает видового разнообразия зоопланктона. В районе функционирования ВВЗ отмечены максимальная численность и биомасса зоопланктона по сравнению с контрольными станциями. Основу численности и биомассы зоопланктона составляли ракообразные: на ветвистоусых ракообразных приходилось 50,2% от общей биомассы, на веслоногих рачков – 46,1%. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по гидробиологическим показателям выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации.

Ключевые слова: аквакультура; объекты энергетики; рыбозащитное сооружение; водовоздушная завеса; зоопланктон.

Для цитирования: Калайда М.Л., Саетов А.Р., Хамитова М.Ф. Исследование особенностей гидрохимических характеристик и развития зоопланктона в районе размещения рыбозащитного сооружения типа водовоздушная завеса в водоеме-охладителе ГРЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 101-118. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-101-118.

STUDY OF THE FEATURES OF HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT OF ZOOPLANKTON IN THE AREA OF WATER-AIR CURTAIN TYPE FISH PROTECTION STRUCTURE IN THE COOLING RESERVOIR OF THE SDPP

Kalaida M.L., Saetov A.R., Khamitova M. F.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
kalayda4@mail.ru

Abstract. *PURPOSE.* Study of the features of hydrobiological characteristics of zooplankton development under operating conditions of a fish protection structure similar to a water-air curtain (WAC) at an energy facility. *METHODS.* Hydrobiological material was collected, processed and analyzed on the physical and chemical characteristics of water and on the qualitative and quantitative composition of zooplankton in the water intake area of the Zainskaya State District Power Plant. A comparative analysis of our own research and literature data on the characteristics of water in the area of a water-air curtain fish protection structure was carried out. The material was processed using generally accepted hydrobiological methods in the laboratory of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture of Kazan State Energy University. *RESULTS.* It is shown that a fish protection device of the water-air curtain type is a multifunctional technical solution, which during operation changes the physical and chemical characteristics of the state of the ecosystem, especially in the bottom layer. It was revealed that a fish protection structure (FPS) like a water-air curtain does not reduce the species diversity of zooplankton. In the area where the WAC operates, the maximum abundance and biomass of zooplankton were noted compared to control stations. The basis of the number and biomass of zooplankton were crustaceans: cladocerans accounted for 50.2% of the total biomass, copepods accounted for 46.1%. *CONCLUSION.* Observations of the state of the ecosystem in the area of operation of the water-air curtain and assessment of water quality based on hydrobiological indicators revealed high water quality in the area where the WAC operates, and an improvement in the environmental situation.

Keywords: *aquaculture; energy facilities; fish protection structure; water-air curtain; zooplankton.*

For citation: Kalaida M.L., Saetov A.R., Khamitova M. F. Study of the features of hydrochemical characteristics and development of zooplankton in the area of water-air curtain type fish protection structure in the cooling reservoir of the SDPP. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 101-118. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-101-118.

Введение(Introduction)

В настоящее время тепловые электростанции являются неотъемлемой частью энергетической системы и наиболее крупными потребителями воды с наибольшим расходом ее для охлаждения технологического оборудования. Основное потребление технической воды на ТЭС вызвано с необходимостью отвода теплоты от отработавшего пара в конденсаторах турбин – 85-95 %. В соответствии с Водным Кодексом РФ, Постановлением правительства Российской Федерации № 380 от 29.04.2013 г. «Об утверждении Положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания» запрещена эксплуатация водозаборных сооружений, не оборудованных рыбозащитными устройствами или сооружениями, то есть законодательно определено, что все водозаборные сооружения должны быть оснащены эффективно функционирующими рыбозащитными сооружениями (РЗС). Вид рыбозащиты основывается на комбинации принципов рыбозащиты (экологического, поведенческого, физического) и определяет механизм взаимодействия рыб (ориентацию, реакцию и др.), водной среды и сооружения. Конструктивные особенности отдельных решений определяются плановым положением экрана и количеством рыбоотводов. В последнее время разработчики РЗС, а также органы рыбоохраны ставят задачу обеспечить надежную защиту 70-75 % сносимой молоди рыб, поскольку для 100 % защиты требуются значительные затраты на сооружения и эксплуатацию РЗС. Одним из наиболее эффективных технических решений по установке рыбозащитных сооружений является РЗС по типу водовоздушной завесы. Одним из наиболее эффективных и в то же время наиболее экологических типов рыбозащитных устройств являются конструкции воздушно-пузырькового типа - водовоздушная завеса [1, 2, 3]. Рассматриваемое РЗУ работает по принципу восходящей водовоздушной завесы, сформированной системой придонных модулей РЗУ с аэрирующими соплами. Принцип работы данного типа сооружений состоит в подаче насосами воды на модули РЗУ с одновременным забором воздуха по отдельному трубопроводу-воздуховоду. Эффект водовоздушной завесы, создается подачей в перфорированный трубопровод мелкодисперсной водовоздушной суспензии (рис.1). Для современного этапа эксплуатации водохранилищ характерны изменения климатических характеристик – повышение в летний период температуры воды, снижение содержания растворенного кислорода, цветение за

счет развития цианобактерий, приводящие к «заморным» условиям – массовой гибели рыбы [4, 5, 6, 7, 8].

Актуальность данного исследования заключается в том, что гидробионты являются биоиндикаторами состояния экосистемы и могут быть использованы для характеристики эксплуатации РЗС типа водовоздушная завеса.

Научная значимость работы заключается в том, что впервые изучены особенности состояния зоопланктона в зоне работы РЗС по типу водовоздушной завесы в сравнении с контрольными участками водохранилища.

Практическая значимость исследования рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы заключается в том, что результаты исследования опробованы в условиях реально функционирующего РЗС предприятия энергетики. Результаты данной работы можно использовать при разработке, модернизации и внедрении РЗС, что будет полезно как для владельцев функционирующих РЗС, так и для разработчиков РЗС.

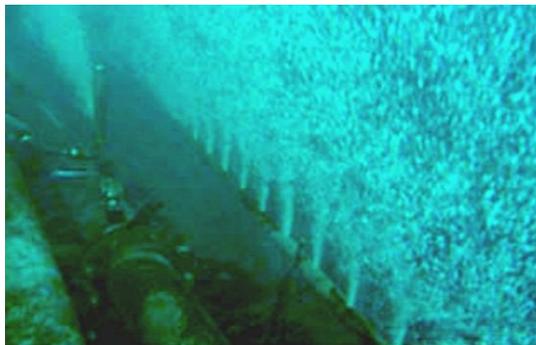


Рис 1. Работа РЗУ типа «водовоздушная завеса» в действии

Fig.1. The work of the "water-air curtain" type FPS in action

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

В сентябре 2015 года Организация Объединенных Наций обозначила среди главных направлений деятельности обеспечение устойчивого развития на период до 2030 года [9, 10]. Отмечено, что 17 целей в области устойчивого развития (ЦУР) пока не достигли необходимых темпов и масштабов. В связи с этим основными задачами сегодняшнего времени стало рассмотрение состояния мирового рыболовства и аквакультуры с позиций выбора мер по повышению устойчивости. Подчеркивается все более важная роль рыболовства и аквакультуры в обеспечении продовольствия, питания и занятости населения.

В материалах ФАО (2020) отмечаются стратегии включения рыбы в продовольственные системы в интересах обеспечения продовольственной безопасности и питания, среди которых подчеркивается значимость переосмысления подходов к промышленному рыболовству в XXI веке, повышению качества оценки рыболовства во внутренних водоемах в мировом масштабе [9]. Переосмысление освоения ресурсов внутренних водоемов включает такие задачи как направленное формирование ихтиофауны, пастбищную аквакультуру, увеличение компенсационных выпусков молоди рыб от искусственного воспроизводства. Подобными работами занимаются и в Республике Татарстан. Так по информации ИА «Регнум» [20] Заинская ГРЭС проводила зарыбление Куйбышевского водохранилища двухлетками сазана, выращенного в Заинском водохранилище. Еще в 1996 году в Заинское водохранилище для улучшения качества вод, борьбы с водной растительностью и увеличения кормовой базы была завезена из Рязани ханнанская пресноводная креветка, которая акклиматизировалась. Не менее значимым мероприятием в этих условиях становится повышение эффективности рыбозащитных сооружений на водозаборах энергетических предприятий. Выбор методов рыбозащиты с обоснованием состояния гидробиоценоза является важной компонентой сохранения водных биоресурсов.

Постановка задачи

Цель данного исследования – изучить изменения гидробиологических характеристик развития зоопланктона в условиях работы рыбозащитной водовоздушной завесы на объекте энергетики.

Материал и методика исследования (Materials and methods)

Материалом для работы послужили пробы зоопланктона собранные в августе 2022 года в районе водозабора Заинской ГРЭС (рис.2).

Заинское водохранилище создано в результате зарегулирования стока реки Степной Зай (рис.2). Гидроузел на реке Степной Зай входит в состав сооружений Заинской ГРЭС. Створ плотины гидроузла на реке Степной Зай расположен в 71 км от устья реки Степной Зай (место впадения в реку Каму). НПУ составляет 73 м. Самый низкий уровень сработки – 70,075 м. Полный объем при НПУ равен 0,063 км³, полезный объем 0,035 км³. Площадь водосбора составляет – 2,91 тыс. км², площадь водного зеркала – 20,45 км² [11,12]. Средняя глубина – 3,8 м, наибольшая – 9 м. Средняя ширина – 1 км, максимальная – 2,5 км. Длина в период половодья достигает 15 км. Заинское водохранилище по объему водной массы среди термальных водохранилищ, является одним из крупных (после Лукомльского, Электрэнского и Кармановского, объем которых 90,5-243 млн. м³) и имеет довольно высокий показатель условного водообмена. Смена воды происходит более 5 раз в год. В 1972 году Заинская ГРЭС выведена на проектированную мощность – 2 400 Мвт. Сброс подогретой воды осуществляется в верхнюю часть водоема по каналу №2 и в нижнюю по каналу №1, что вызывает неравномерное распределение тепла по акватории водоема (рис.2). Система водоснабжения Заинской ГРЭС выполнена оборотной, с охлаждением сбросной воды в Заинском водохранилище. Для подачи циркуляционно-технической воды на электростанции имеются три береговые насосные станции: БНС-1, БНС-2, БНС-3. Вода от водохранилища к водоприемникам насосных станций поступает по открытым подводным каналам. На входе каждого канала установлены водозаборные устройства. Суммарный расход циркуляционной воды 100 м³ /сек. Подводящие каналы в зоне береговой линии оборудованы закрытыми водоподводящими оголовками длиной по 25-30м каждый с заглублением верхней кронки под НПУ на 2,4 и 3,25м. Скорость воды в оголовках 0,75-1,3 м/сек. Смена воды происходит более 5 раз в год.

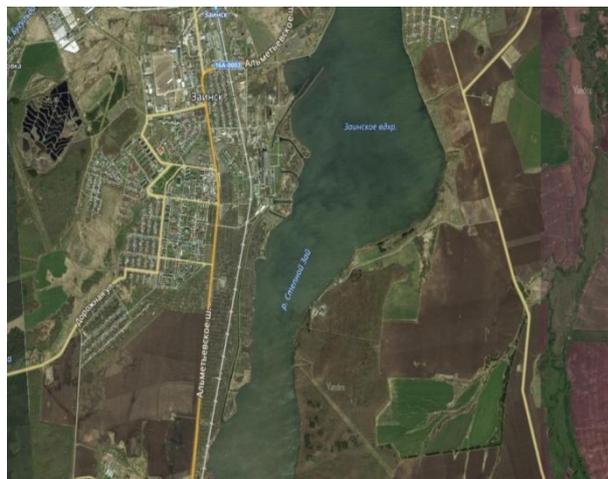


Рис.2. Карта–схема расположения Заинского водохранилища (<https://www.google.com/maps>) и акваториального районирования по распределению температуры (красный – максимальные температуры; розовый – слабый прогрев; сиреневый – эпизодический подогрев; голубой – естественный температурный режим)

*Источник: составлено автором.

Fig.2. Schematic map of the location of the Zainsk Reservoir (<https://www.google.com/maps>) and aquatorial zoning by temperature distribution (red - maximum temperatures; pink - weak heating; lilac - episodic heating; blue - natural temperature regime)

Source compiled by the author

Площадь водохранилища, участвующая в охлаждении, составляет около 15 км^2 . По степени подогрева водоем можно разделить на четыре участка: верхний площадью около 6 км^2 – зона максимального прогрева, средний – зона слабого подогрева, в которой расположена зона водозабора, ниже зона эпизодического подогрева, после которой расположена зона с естественным температурным режимом (рис. 1 в). Объем водной массы составляет примерно 9 млн. м^3 . Сбросные теплые воды в водоемах-охладителях являются определяющим антропогенным экологическим фактором, влияющим на естественную среду. Воздействие на компоненты гидробиоценоза проявляется в увеличении количества градусодней на протяжении сезона, что проявляется в исчезновении ледового покрова, увеличении проточности вод.

Гидробиологические пробы зоопланктона были отобраны с 5 станций (рис.3):

Ст.1 – в центральной части водозаборного канала (прозрачность 2,0 м, глубина 4,5 м, температура $26,07^\circ\text{C}$);

Ст.2 – над водовоздушной завесой (прозрачность 1,2 м, глубина 3,7 м, температура $26,69^\circ\text{C}$);

Ст.3 – в 50 м перед водовоздушной завесой (прозрачность 2,0 м, глубина 2,5 м, температура $27,71^\circ\text{C}$);

Ст.4 – выше водозабора по течению (прозрачность 2,0 м, глубина 4,0 м; температура $27,42^\circ\text{C}$);

Ст.5 – ниже водозабора по течению (прозрачность 2,2 м, глубина 4,2 м, температура $27,40^\circ\text{C}$).



Рис.3. Станции обора проб зоопланктона и гидрохимических характеристик в районе РЭС типа водовоздушная завеса (ВВЗ)

Fig.3. Stations for sampling zooplankton and hydrochemical characteristics in the area of the water-air curtain type FPS

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Для рассматриваемого участка были характерны глубины от 2,5 до 4,5 м. По распределению глубин в водохранилище Заинской ГРЭС выделяются следующие основные зоны (рис.4):

1. Зона мелководья с глубинами – 0-2м;
2. Зона средних глубин – 2-5м;
4. Зона глубоководная – с глубинами более 5м.



Рис. 4. Станции 2 и 3 обора проб зоопланктона в районе РЭС типа водовоздушная завеса (ВВЗ)

Fig.4.. Stations 2 and 3 for zooplankton sampling in the area of the water-air curtain type (WAC) FPS

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

На рисунке 5 представлена карта – схема акваториального районирования Заинского водохранилища по глубине.

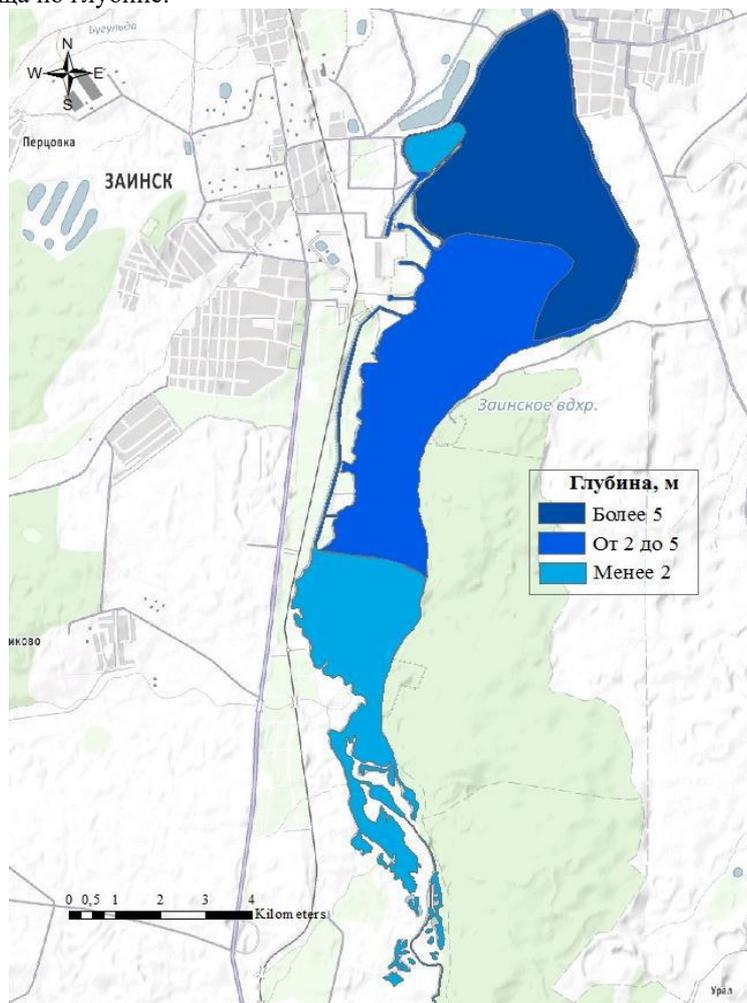


Рис. 5. Карта – схема акваториального районирования Заинского водохранилища по глубине

*Источник: составлено автором.

Fig.5. Schematic map of aquatorial zoning of the Zainsk reservoir by depth

Source compiled by the author

При отметке НПУ общая площадь, занимаемая мелководьем, составляет около $6,2\text{ км}^2$ (38 % от общей площади водохранилища). Зона средних глубин водохранилища составляет около 4 км^2 (25% от общей площади водохранилища).

Глубоководная зона составляет $5,8\text{ км}^2$ или 37% от общей площади водохранилища

Во время исследований определялись гидрологические параметры станций отбора проб с помощью эхолота *Lowrance Elite-4X DSI*; прозрачность измеряли диском Секки.

Измерения концентрации кислорода и температуры проводились с помощью портативного оксиметра, для измерения гидрохимических характеристик использовался прибор с мультипараметрическим датчиком HANNA HI 98195с глубин до 3 м. Пробы зоопланктона отбирались с помощью количественной сети Апштейна, по 50 л на пробу. Пробы фиксировались формалином (4%).

Обработку материала проводили общепринятыми гидробиологическими методами в лаборатории кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета. Для обработки проб использовались оптический микроскоп плоского поля МИКМЕД-5 и стереоскопический микроскоп МСП-2. Организмы зоопланктона определяли, по возможности до вида или более крупных таксономических групп. При обработке проб проводилась фотосъемка объектов с помощью цифрового микроскопического комплекса. Определение видов велось по определителям и руководствам в зависимости от групп организмов.

Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussions)

Подогрев воды в водохранилище вызывает увеличение биологической активности организмов и ускорение темпа оборота всех звеньев пищевой цепи, что приводит к перестройке структуры и функционирования экосистемы. Количество дополнительного

тепла, поступающего в водохранилище в результате сброса подогретых вод распределяется по акватории водохранилища в том числе в зависимости от метеорологических условий.

Температура воды в Заинском водохранилище в зимний период бывает не выше 10-15° С и превышает естественную на 10-11° С. Зимой в подогреваемой зоне имеется постоянная полынья, охватывающая большую площадь, подогрев распространяется на нижние слои воды. В подогреваемой зоне в это время наблюдается обратная термическая стратификация. Летом подгреваются верхние слои воды. Температура воды в водохранилище может превышать 30° С, а в отдельные периоды - 35-40° С. По сравнению с летним периодом весной и осенью прогреваются более глубокие слои воды.

По данным лаборатории Зай ГРЭС самым теплым месяцем в году до последнего периода являлся июль, поэтому наибольшая тепловая нагрузка на турбины ГРЭС приходилась именно на этот месяц. Анализ динамики изменения температуры воды в период с 1985 по 2013 годы выявил:

верховье водохранилища с глубинами 1,5-2 м, обильно развитой водной растительностью испытывает влияние подогретых вод сбросного канала №2. На этом участке водохранилища отмечался устойчивый тренд повышения температуры воды – в период с 1985 по 2013 гг. она увеличилась на 8°С (рис.2);

средняя часть водохранилища, выше БНС с глубинами 2,5 - 3,5 м это зона, в которой происходит забор воды на охлаждение, в этот же период температура оставалась примерно на одном уровне (летом - 25 °С), а ее колебания отражали климатические особенности отдельных лет;

приплотинная часть водохранилища с глубинами 1,5-6 м - это зона влияния подогретых вод сбросного канала №1. Для нее не выявлен тренд роста температур в период с 1985 по 2013 гг.

Таким образом, увеличение температуры воды было выявлено только в верховьях водохранилища. Это наиболее мелководная, хорошо прогреваемая зона, обильно покрытая погруженной и полупогруженной растительностью.

Сравнивая температуры на исследуемом участке с данными по годовому ходу среднемесячных температур (рис.6) на территории Республики Татарстан можно отметить значительное увеличение температур в последний период, особенно в августе. Это приводит к «заморным» условиям – снижению содержания кислорода на фоне высоких температур воды [4, 5, 8].

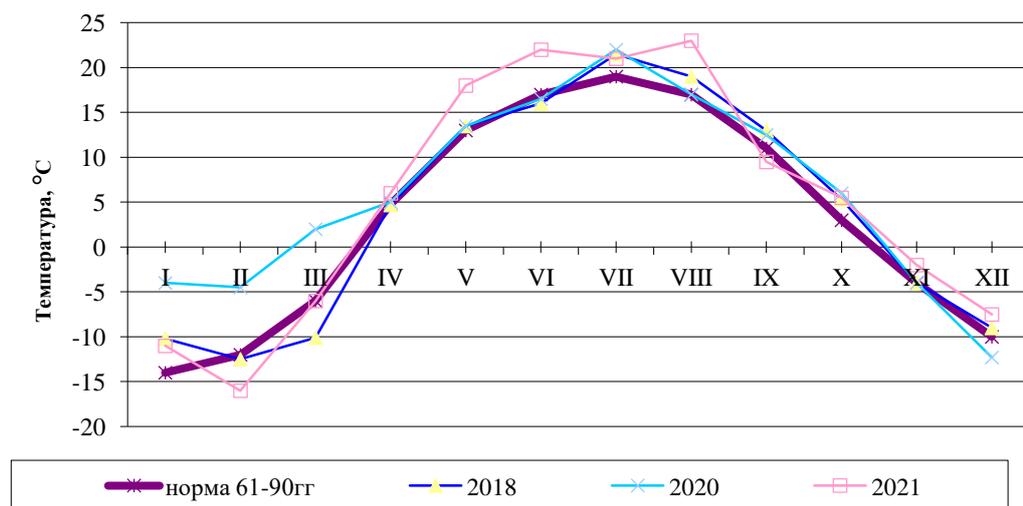


Рис.6. Годовой ход среднемесячной температуры воздуха в 2018-2021 гг. в сравнении с нормой на территории РТ (°С) по данным ФГБУ «УГМС РТ» в Республике Татарстан

Fig.6. Annual course of average monthly air temperature in 2018-2021. in comparison with the norm in the territory of the Republic of Tatarstan (°C) according to the Federal State Budgetary Institution "UGMS RT" in the Republic of Tatarstan
Source compiled by the author

*Источник: составлено автором.

Например, в условиях жаркой температуры, которая держалась три недели летом 2016 г на Заинском водохранилище, в садковом рыбноводном хозяйстве смертность рыбы за одну ночь привела к потере 170 тонн карпа в ООО «Заинский рыбхоз». Рыба погибала и в самом водоеме (рис.7).

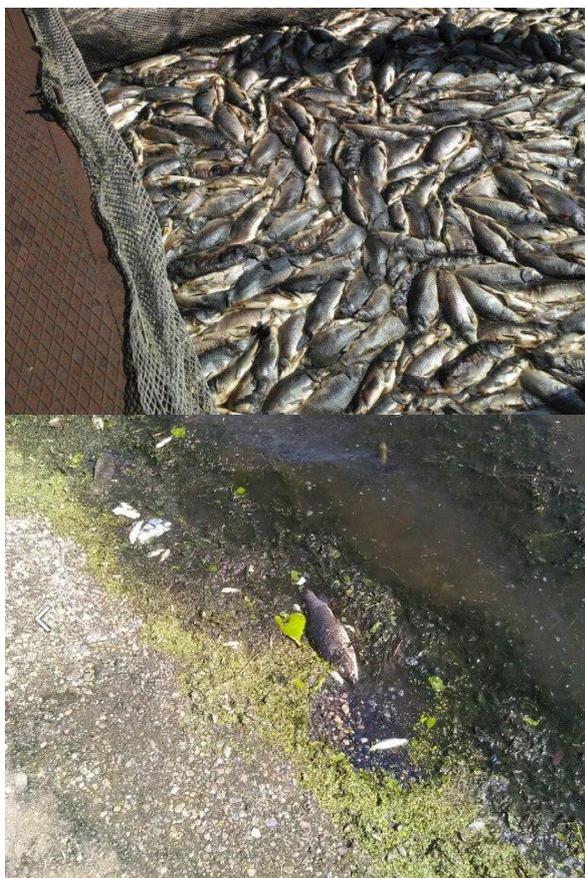


Рис.7. Гибель рыбы 15 августа 2016 г. в ООО «Заинский рыбхоз»

*Источник: составлено автором.



Fig.7. Death of fish on August 15, 2016 at Zainsk Fish Farm LLC

Source compiled by the author

Исследование изменения температуры и других физико-химических характеристик воды в районе функционирования ВВЗ проведено в августе, поскольку в августе складывается наихудшая экологическая ситуация в связи с увеличением температуры воды.

Проведенное исследование выявило, что в районе ВВЗ отмечается большая мутность воды и наибольшая выравненность температуры в поверхностном слое и у дна по сравнению с контрольными участками Заинского водохранилища перед зоной ВВЗ (рис.8).

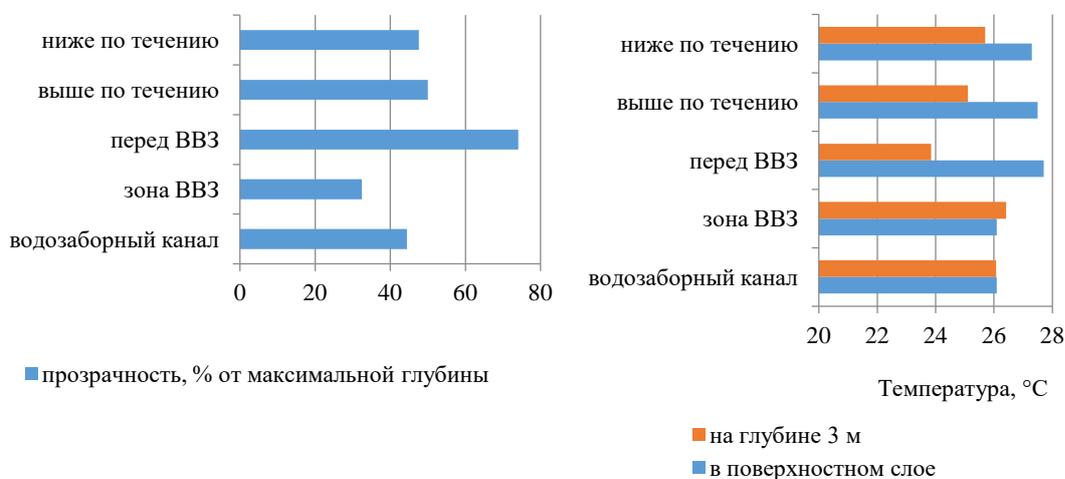


Рис.8. Прозрачность и температура воды в августе в районе РЭС типа водовоздушная завеса

*Источник: составлено автором.

Fig.8. Water transparency and temperature in August in the area of the water-air curtain type FPS

Source compiled by the author

Важной характеристикой для оценки экологического и санитарногосостояния водной экосистемы является содержание растворенного кислорода. Кислород должен содержаться в воде в достаточном количестве, обеспечивая условия для дыхания гидробионтов, а также

для самоочищения водоемов, т. к. участвует в процессах окисления органических и других примесей и разложения отмерших организмов. Содержание кислорода зависит от температуры, атмосферного давления, движения вод, количества осадков, минерализации воды. Снижение концентрации растворенного кислорода до $2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ вызывает массовую гибель рыб и других гидробионтов, поэтому в воде водоемов в любой период года до 12 часов дня концентрация кислорода должна быть не менее 4 мг/л . По данным лаборатории ЗайГРЭСв Заинском водохранилище средняя концентрация растворенного кислорода достаточно высока и варьирует от $5,8$ до $8,7 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$.

При исследовании содержания кислорода в районе ВВЗ наибольшая разница в концентрации растворенного кислорода отмечена в зоне перед ВВЗ. Необходимо отметить, что максимальная концентрация кислорода в придонном слое была в зоне ВВЗ (рис.9)

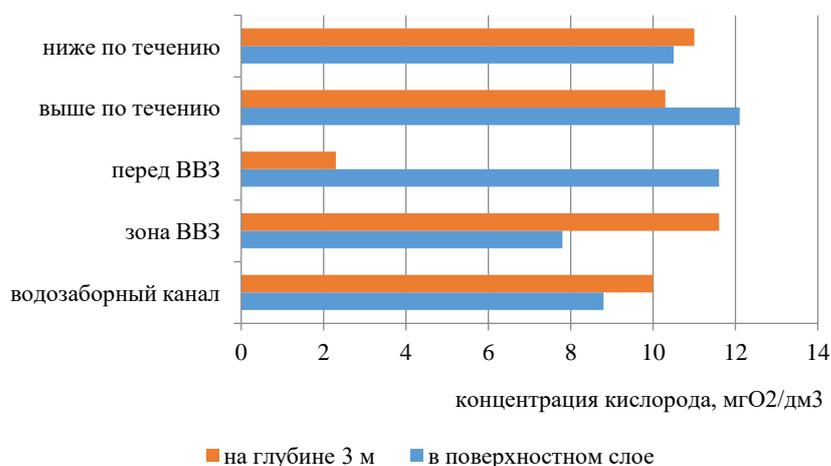


Рис.9. Концентрация кислорода в воде в августе в районе РЗС типа водо-воздушная завеса
*Источник: составлено автором.

Fig.9. Oxygen concentration in water in August in the area of the water-air curtain type FPS
Source compiled by the author

В районе функционирования ВВЗ отмечаются также более выровненные значения ЭДС (mVpH) в поверхностном и придонном слое (-85,4 у поверхности; -90,6 на глубине 3 м), по сравнению с контрольными участками, где показатель варьировал у поверхности от -91,1 до -98,1 и на глубине 3 м от -61,0 до -89,3 (рис.10).

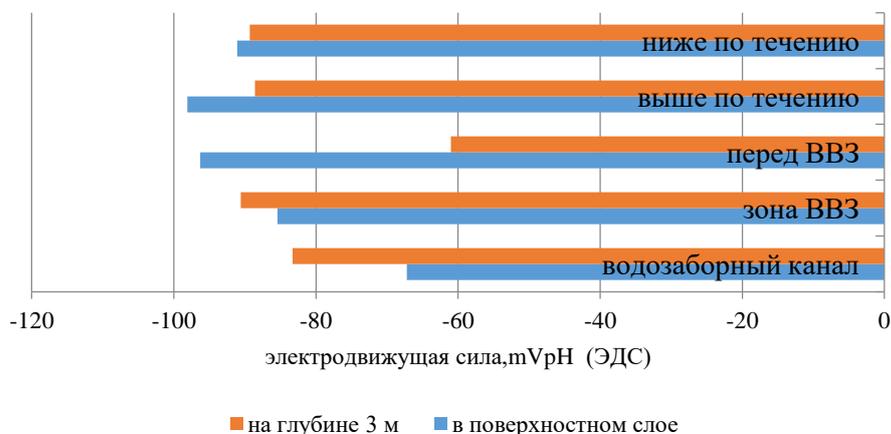


Рис. 10. Электродвижущая сила (ЭДС,mVpH) воды в августе в районе РЗС типа водо-воздушная завеса
*Источник: составлено автором.

Fig.10. Electromotive force (EMF, mVpH) of water in August in the area of the water-air curtain type RZS
Source compiled by the author

Аналогично характеризовался участок ВВЗ и по ОВП (рис.11): в поверхностном и придонном слое (107,8 мВ у поверхности; 107,4 мВ на глубине 3 м), по сравнению с контрольными участками, где показатель варьировал у поверхности от 111,2 до 131,0 и на глубине 3 м от 128,0 до 132,7).

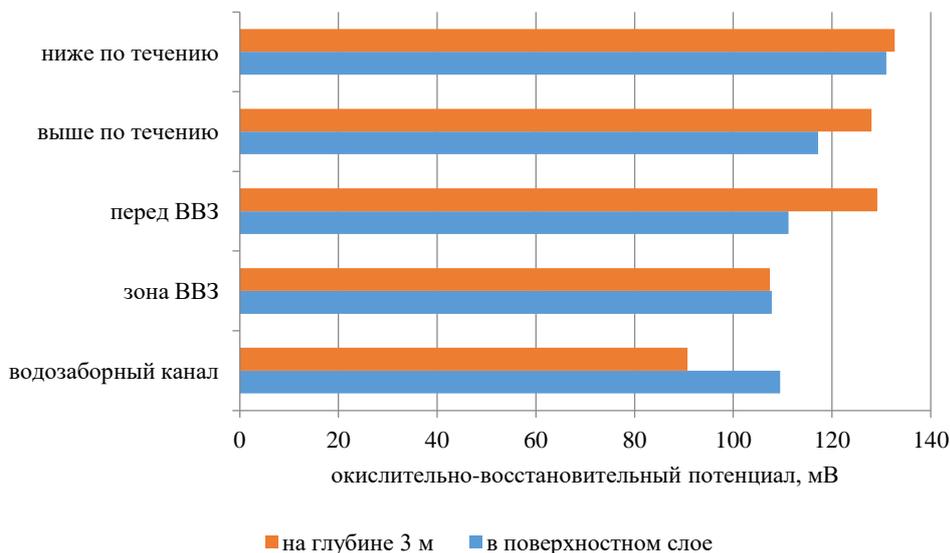


Рис. 11. Окислительно-восстановительный потенциал (мВ) воды в августе в районе РЗС типа водо-воздушная завеса

Результаты исследований позволяют прийти к выводу: рыбозащитное сооружение (РЗС) по типу водовоздушной завесы является многофункциональным техническим решением, которое в процессе работы изменяет физико-химические характеристики состояния экосистемы, особенно в придонном слое.

Исследования зоопланктона Заинского водохранилища в начале XXI столетия выявили доминирование веслоногих рачков в структуре зоопланктона [13, 14], как по численности, так и по биомассе. Средняя биомасса зоопланктона за вегетационный период составляла 0,83 г/м³. В состав зоопланктона входили 69 видов организмов зоопланктона: 26 видов коловраток, 17-ветвистоусых и 26-веслоногих рачков, количественные характеристики которых по [13, 14] представлены на рисунке 12.

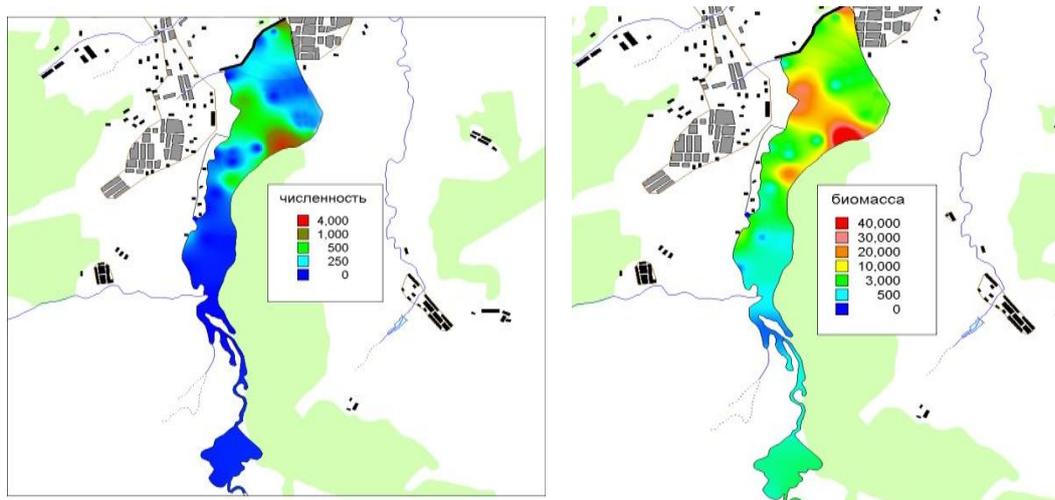
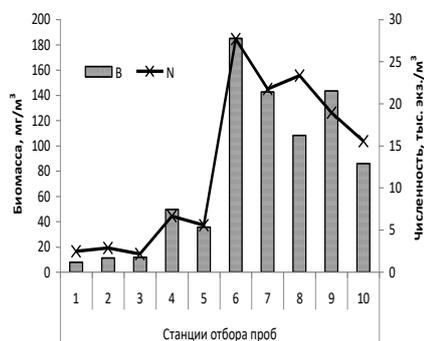
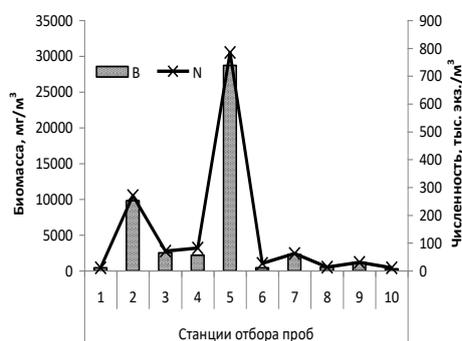


Рис. 12. Распределение численности (тыс. экз./м³) и биомассы (мг/м³) зоопланктона в Заинском водохранилище (тыс. экз./м³)

На следующем этапе исследований в 2014 году [15] в составе зоопланктона Заинского водохранилища были выявлены 31 вид, из которых ветвистоусых ракообразных – 13, веслоногих – 3 и коловраток – 15 видов. Был сделан вывод о ротаторно-кладоцерном характере зоопланктона Заинского водохранилища. Как в качественном, так и в количественном отношении наиболее богато были представлены группы коловраток и ветвистоусых ракообразных. Постоянным компонентом зоопланктона на всех

исследованных станциях являлись науплиальные и копеподитные стадии развития веслоногих рачков. Количественные показатели развития зоопланктона в проведенных исследованиях [13, 14, 15] представлены на рис. 13. Обращает на себя внимание разница в количественных характеристиках зоопланктона в пробах разных лет: если в материалах начала XXI столетия максимальная численность зоопланктона составляла около 800 тыс. экз./м³ при максимальной биомассе около 28 г/м³, то в 2014 г. максимальная численность зоопланктона составляла около 30 тыс. экз./м³ при максимальной биомассе около 0,2 г/м³.



по [13, 14]

Рис.13. Количественные показатели развития зоопланктона в Заинском водохранилище (N – численность, тыс. экз./м³, B – биомасса, мг/м³)

по [15]

Fig.13. Quantitative indicators of zooplankton development in the Zainsk Reservoir (N – number, thousand specimens/m³, B – biomass, mg/m³)

Из данных рисунка 13 видно, что наибольшие показатели численности и биомассы зоопланктона по [13, 14] отмечались в Верхнем плесе, минимальные значения наблюдались в Среднем и Нижнем плесе. Доминировали веслоногие ракообразные. Количественные показатели зоопланктона в 2014 году по [15] колебались по численности от 2,16 до 27,64 тыс. экз./м³, составляя в среднем 12,68 тыс. экз./м³, по биомассе, соответственно, от 7,79 до 184,77 мг/м³ и 78,04 мг/м³ (рис. 13). Наибольшие показатели численности и биомассы отмечены на участках Нижнего плеса.

Проведенное нами исследование в 2022 году выявило в составе зоопланктона в августе 16 видов и форм, из которых 3 относились к коловраткам, 4 – ветвистоусым, 6 – веслоногим рачкам, кроме которых в пробах отмечались раковинные амёбы, яйца мшанок и планктонные стадии личинок хирономид (табл.1).

Таблица 1

Table 1

Встречаемость видов и форм зоопланктона Заинского водохранилища в районе водозабора Зай ГРЭС, по материалам августа 2022 г

The occurrence of zooplankton species and forms of the Zainsky reservoir in the area of the ZYGRES water intake, based on materials from August 2022

Вид и форма	Станции				
	1	2	3	4	5
Тип Rotifera					
Класс Eurotatoria					
Отряд Ploima					
Сем. Trichotriidae					
<i>Trichocercacapucina</i> (Wierzejski & Zacharias, 1893)	+				
Сем. Brachionidae					
<i>Keratella</i> valga (Gosse, 1851)	+	+	+	+	+
Сем. Synchaetidae					
<i>Polyarthravulgaris</i> (Carlin, 1943)			+	+	
Яйцо коловратки		+		+	
Надкласс Crustacea					
Класс Branchiopoda					
Подкласс Diplostraca					
Надотряд Cladocera					
Отряд Anomopoda					

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

Сем. Bosminidae					
<i>Bosminalongirostris</i> (O.F. Muller, 1785)	+	+	+	+	+
Сем. Daphniidae					
<i>Ceriodaphniaaffinis</i> (Dana, 1853)	+	+	+	+	+
<i>Daphniacucullata</i> (Sars, 1862)	+	+	+	+	+
Сем. Moinidae					
<i>Moinamacrocopa</i> (Straus, 1820)		+	+	+	+
Яйцо <i>Cladocera</i>		+		+	
Покоящееся яйцо	+	+	+		+
Класс Maxillopoda					
Подкласс Copepoda					
Инфракласс Neocopepoda					
Надотряд Podoplea					
Отряд Cyclopoidea					
Сем. Cyclopidae					
<i>Cyclopskolensis</i> (Lilljeborg, 1901)	+		+	+	+
<i>Mesocyclopsleuckarti</i> (Claus, 1857)	+	+	+	+	+
<i>Mesocyclopscrassus</i> (Fisher, 1853)	+	+	+	+	+
<i>Ahanthocyclopslanguoides</i>	+	+	+	+	+
<i>Copepodita</i>	+	+	+	+	+
<i>Nauplii</i>	+	+	+	+	+
Яйца	+				+
Прочие виды и формы					
Тип Amoebozoa					
Класс Tubulinea					
Сем. Diffflugidae					
<i>Diffflugiaoblonga</i>	+				
Тип Bryozoa					
<i>Plumatellafungosa</i> яйцо		+			
Тип Arthropoda					
Класс Insecta					
<i>Chironomidaesp</i>					+
Всего видов и форм	14	14	13	14	14

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Из коловраток наиболее часто в водоёме встречались *Keratellavalga*; изветвистоусых рачков – *Bosminalongirostris*, *Ceriodaphniaaffinis* *Daphniacucullata*; из веслоногих рачков – науплиальные и копеподитные стадии, *Mesocyclopsleuckarti*, *Mesocyclopscrassus*, *Ahanthocyclopslanguoides*. Частота встречаемости этих видов и форм на всех станциях составила 100%.

Если для зоопланктона р.Волга соотношение (%)«коловратки – ракообразные» до зарегулирования составляло 61,4 – 70,3% к 38,6 - 29,7%, после зарегулирования – соответственно 40 к 60%, то на исследуемом участке Заинского водохранилища в среднем по станциям соотношение «коловратки – ракообразные»составило 15% к 85% (рис.14), что характеризует зоопланктон этого участка как лимнофильный.

Численность зоопланктона варьировала от 24,0 тыс. экз./м³ до 51,6 тыс. экз./м³ и в среднем составляла 38,2 тыс. экз./м³. Основу численности составляли ракообразные. В среднем на долю веслоногих ракообразных приходилось 60,7% от общей численности, на долю ветвистоусых рачков – 34,5% (рис. 15). По численности доминировали копеподитные стадии веслоногих ракообразных (7,9 тыс. экз./м³), *Ceriodaphniaaffinis* (7,1 тыс. экз./м³) и *Mesocyclopsleuckarti* (6,1 тыс. экз./м³). Среди коловраток по численности доминировала *Keratellavalga*, ее численность в среднем по станциям составляла 0,6 тыс. экз./м³.

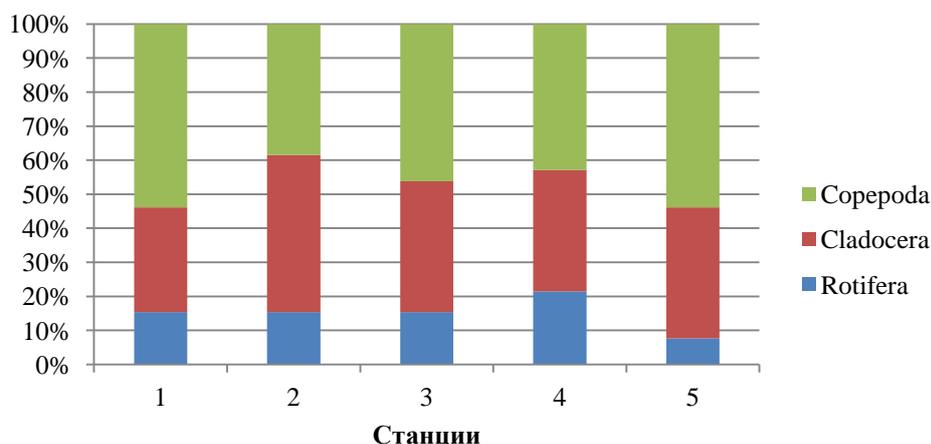


Рис. 14. Соотношение по числу видов основных групп зоопланктона в районе водозабора Зай ГРЭС, по материалам августа 2022г

Fig.14. The ratio of the number of species of the main groups of zooplankton in the water intake area of Zai State District Power Plant, based on materials from August 2022

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

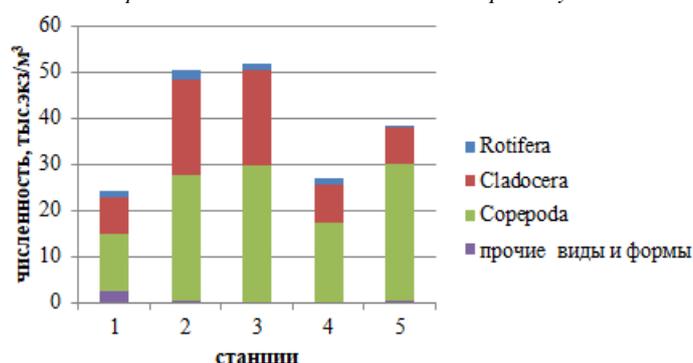


Рис.15.Численность зоопланктона в районе водозабора Зай ГРЭС в августе 2022г

Fig.15. The number of zooplankton in the water intake area of Zai SDPP in August 2022

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Анализ данных показывает, что в районе функционирования ВВЗ отмечена максимальная численность зоопланктона – около 50 тыс.экз/м³. Сравнивая наши данные с данными по [13, 14,15] можно отметить, что без ВВЗ на данном участке отмечалась численность зоопланктона 20-30 тыс.экз/м³. Как видно из данных рисунков13 и 14 в районе функционирования ВВЗ численность зоопланктона возрастает за счет развития всех групп.

Известно, что общая численность циклопов и изменение их возрастного состава служат показателем качества воды: чем меньше отношение числа науплиев к количеству взрослых особей (0,35), тем ниже качество вод. На благополучных станциях, как правило, это отношение составляло 1,24 - 1,60 [21]. С увеличением степени загрязнения снижалась общая численность циклопов. Соотношение численности науплий к численности взрослых циклопов на участке в районе функционирования РЗС по типу ВВЗ представлено на рисунке 16.

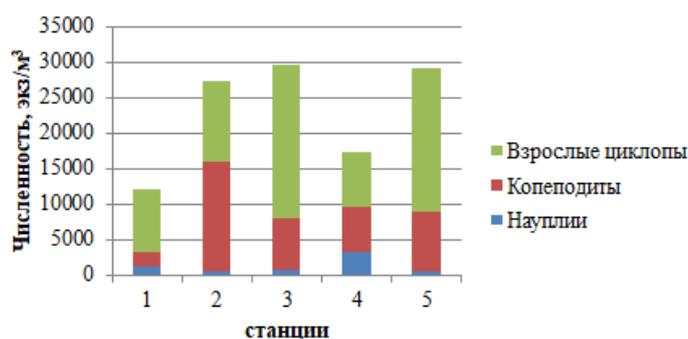


Рис.16.Численность (экз/м³) разновозрастных стадий веслоногих рачков

Fig.16. Number (individuals/m³) of different age stages of copepods

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Как видно из данных рисунка 16 для участка функционирования ВВЗ характерно увеличение численности копепоидитных стадий циклопов.

Биомасса зоопланктона на станциях варьировала от 1,0 г/м³ до 2,3 г/м³ и в среднем составляла 1,6 г/м³. Основу биомассы составляли ракообразные: на ветвистоусых ракообразных приходилось 50,2% от общей биомассы, на веслоногих – 46,1% (рис.17).

Следует отметить, что наибольшие численность и биомасса зоопланктона отмечались на станциях у водовоздушной завесы (Ст.2 и Ст.3).

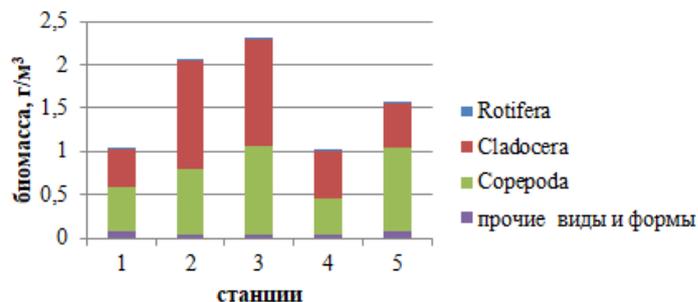


Рис.17. Биомасса зоопланктона в районе водозабора Зай ГРЭС в августе 2022 г

Fig.17. Zooplankton biomass in the water intake area of Zai SDPP in August 2022

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

По биомассе доминировали *Ceriodaphniaaffinis* (0,43 г/м³) и *Mesocyclopsleuckarti* (0,25 г/м³). Среди коловраток по биомассе так же доминировала *Keratellavalga*, ее биомасса в среднем по станциям составляла 3,2 мг/м³. Анализ данных показывает, что в районе функционирования ВВЗ отмечена максимальная биомасса зоопланктона – около 2,2г/м³. Как видно из данных рис.15в районе функционирования ВВЗ биомасса зоопланктона возрастает в основном за счет развития ветвистоусых рачков.

Для оценки состояния водных экосистем широко использовался информационный индекс видового разнообразия Шеннона (ИВР) в модификации Вильма и Дорриса [16, 17]. Индекс является комплексным и позволяет учесть количество видов (видовую плотность) и их выравненность. ИВР зоопланктона на изученном участке представлен на рисунке 18.

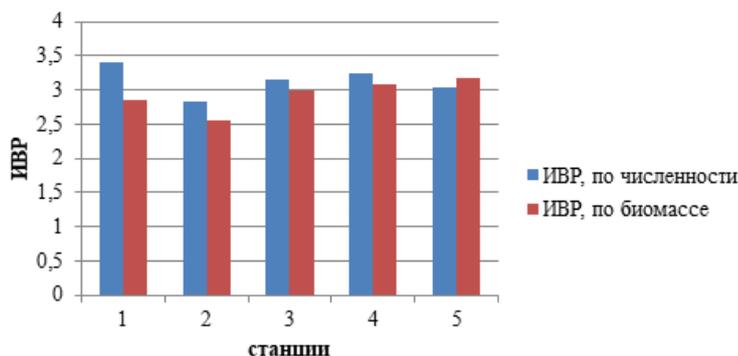


Рис.18. Индекс видового разнообразия Шеннона, рассчитанный по численности и биомассе зоопланктона, в районе функционирования ВВЗ Зай ГРЭС

Fig.18. Shannon's species diversity index, calculated based on the abundance and biomass of zooplankton in the operating area of the Zai State District Power Plant

*Источник: составлено автором.

Source compiled by the author

Индексы видового разнообразия (около 3 бит) свидетельствуют о высоком качестве вод на этом участке.

По индексам сапробности, рассчитанным по индикаторным видам зоопланктона по [18, 19], участок функционирования ВВЗ относится к олигосапробной (чистой) зоне (рис.19). При этом лучшее качество воды отмечено в районе водозабора (ст.1).

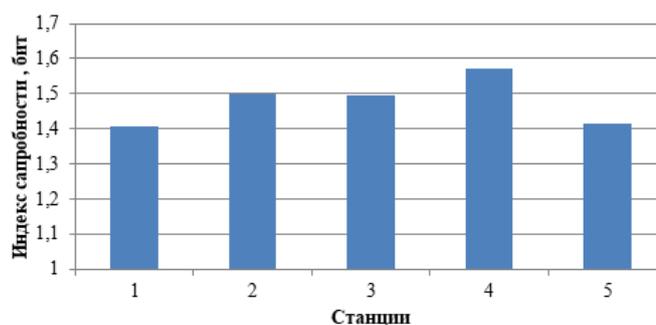


Рис. 19. Индекс сапробности в районе функционирования ВВЗ Зай ГРЭС Fig.19. Saprobity index in the area where the WAC of Zai SDPP operates

Таким образом, проведенное исследование качественного и количественного состава зоопланктона в районе рыбозащитного сооружения типа водовоздушная завеса (ВВЗ) в сравнении с контрольными точками выше и ниже по течению выявили следующие особенности:

В составе зоопланктона в августе 16 видов и форм, из которых 3 относились к коловраткам, 4 – ветвистоусым, 6 – веслоногим рачкам, кроме которых в пробах отмечались ракообразные амебы, яйца мшанок и планктонные стадии личинок хирономид.

Снижения видового разнообразия зоопланктона в районе функционирования ВВЗ не отмечается. Видами – доминантами являлись из коловраток – *Keratellavalga*; из ветвистоусых рачков – *Bosminalongirostris*, *Ceriodaphniaaffinis* *Daphniacucullata*; из веслоногих рачков – *науплиальные и копеодитные стадии*, *Mesocyclopsleuckarti*, *Mesocyclopscrassus*, *Ahanthocyclopslanguidoides*.

Соотношение «коловратки – ракообразные» составило 15% к 85%.

Численность зоопланктона варьировала от 24,0 тыс. экз./м³ до 51,6 тыс. экз./м³ и в среднем составляла 38,2 тыс. экз./м³. Основу численности составляли ракообразные. В среднем на долю веслоногих ракообразных приходилось 60,7% от общей численности, на долю ветвистоусых рачков – 34,5%.

Биомасса зоопланктона на станциях варьировала от 1,0 г/м³ до 2,3 г/м³ и в среднем составляла 1,6 г/м³. Основу биомассы составляли ракообразные: на ветвистоусых ракообразных приходилось 50,2% от общей биомассы, на веслоногих рачков – 46,1%.

В районе функционирования ВВЗ отмечена максимальная численность и биомасса зоопланктона, соответственно около 50 тыс. экз./м³ и более 2 г/м³.

Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по гидробиологическим показателям выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации, снижение цветения воды в зоне РЗУ.

Заключение (Conclusions)

При повышении эффективности рыбохозяйственных работ на водохранилищах - организации мероприятий по направленному формированию ихтиоценозов, пастбищной аквакультуре - повышается роль рыбозащитных устройств при заборе воды [1-4]. Основным элементом РЗУ типа «водовоздушная завеса» обеспечивает формирование водо-воздушную смеси с пузырьками воздуха диаметром 1...3 мм за счет использования гидродинамического кавитационного аэратора, устанавливаемого на берегу на линии обратного сброса воды [3]. Проведено исследование фактического состояния водной экосистемы по физико-химическим характеристикам и уровню развития зоопланктона в зоне функционирования РЗУ типа «водовоздушная завеса». Впервые изучены качественные и количественные особенности состояния зоопланктона в зоне реально функционирующей ВВЗРЭС предприятия энергетики в сравнении с контрольными участками водохранилища.

Показано, что в период максимальных температур в районе ВВЗ отмечается большая мутность воды и наибольшая выравненность температуры в поверхностном слое и у дна по сравнению с контрольными участками Зайнского водохранилища. Максимальная концентрация кислорода в придонном слое была отмечена в зоне ВВЗ, отмечаются также более выровненные значения ЭДС (mVpH) в поверхностном и придонном слое (- 85,4 у поверхности; -90,6 на глубине 3 м), по сравнению с контрольными участками, где показатель варьировал у поверхности от -91,1 до -98,1 и на глубине 3 м от -61,0 до -89,3. Аналогично характеризовался участок ВВЗ и по ОВП. В целом рыбозащитное устройство по типу водовоздушной завесы является многофункциональным

техническим решением, которое в процессе работы изменяет физико-химические характеристики состояния экосистемы, особенно в придонном слое.

На собранном гидробиологическом материале в период максимальных температур показано, что в качественном составе зоопланктона в районе функционирования ВВЗ встречались 16 видов и форм, из которых 3 относились к коловраткам, 4 – ветвистоусым, 6 – веслоногим рачкам, кроме которых в пробах отмечались раковинные амёбы, яйца мшанок и планктонные стадии личинок хирономид. Снижения видового разнообразия зоопланктона в районе функционирования ВВЗ не отмечается. Видами – доминантами являлись из коловраток - *Keratellavalga*; из ветвистоусых рачков – *Bosminalongirostris*, *Ceriodaphniaaffinis* и *Daphniacucullata*; из веслоногих рачков – науплиальные и копепоидные стадии, *Mesocyclopsleuckarti*, *Mesocyclopscrassus*, *Ahanthocyclopslanguidoides*.

Численность зоопланктона варьировала от 24,0 тыс. экз./м³ до 51,6 тыс. экз./м³ и в среднем составляла 38,2 тыс. экз./м³. Основу численности составляли ракообразные. В среднем на долю веслоногих ракообразных приходилось 60,7% от общей численности, на долю ветвистоусых рачков – 34,5%. Биомасса зоопланктона на станциях варьировала от 1,0 г/м³ до 2,3 г/м³ и в среднем составляла 1,6 г/м³. Основу биомассы составляли ракообразные: на ветвистоусых ракообразных приходилось 50,2% от общей биомассы, на веслоногих рачков – 46,1%. В районе функционирования ВВЗ отмечена максимальная численность и биомасса зоопланктона, соответственно около 50 тыс. экз./м³ и более 2 г/м³.

Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по гидробиологическим показателям выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации, снижение цветения воды в зоне РЗУ.

Литература

1. Калайда М. Л., Саетов А. Р. Рыбозащитные сооружения на водоемах объектов энергетики как важное мероприятие по сохранению стада рыб. - Международный водно-энергетический форум-2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1.-Казань: Казан.гос.энерг.унт, 2018.- 373 с.- С.108-113.
2. Калайда М.Л., Саетов А.Р. Экологическая составляющая эксплуатации рыбозащитных устройств филиала АО «Татэнерго» -Заинская ГРЭС.-XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: сборник материалов конференции. - В 3-х томах. /Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова .- Казань, 2022. С. 388-391.
3. Калайда М.Л., Саетов А.Р. Водные биологические ресурсы в структуре экологических проблем энергетических объектов/Проблемы энергетики, 2022, т.24, №2.- С.175-185.
4. Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Современная гидрологическая характеристика Куйбышевского водохранилища как основа для развития водных биоресурсов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
5. Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Особенности изменений водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища в современных климатических и гидрологических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.
6. Хамитова, М.Ф. Исследование изменений гидробиологических характеристик в условиях локальных загрязнений в регионе Средней Волги / М.Ф. Хамитова, М.Л. Калайда. – LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Германия, 2018. – 310 с
7. Калайда М.Л., Гордеева М.Э. Особенности физико-химического состояния вод водоемов объектов энергетики. - Международный водно-энергетический форум -2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1. -Казань: Казан.гос.энерг.унт, 2018. 373 с. С.284-290.
8. Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Современное состояние водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища.- Состояние и пути развития аквакультуры в Российской Федерации: материалы VIII национальной научно-практической конференции с международным участием, Керчь, 4-6 октября 2023 г. / под ред. И.В. Поддубной; Вавиловский университет. – Саратов, 2023. – 259 с.
9. ФАО. 2020. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2020. Меры по повышению устойчивости. Рим, ФАО. – 223 с.
10. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры: достижение целей устойчивого развития 2018 // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/Состояние202018.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
11. Махнин В.Г. Рыбохозяйственное освоение Заинского водохранилища. Сб. науч. трудов. Л., 1988, вып. 280, с. 75-83.

12. Киткина Ж.В. Экологическая ситуация и процессы самоочищения в Заинском водохранилище Республики Татарстан // Материалы III межвузовской студенческой научно-практической конференции. Экологическая политика: проблемы и перспективы. Пермь, 2015, с. 110-113.
13. Горшкова А.Т. Пространственный анализ биологического потенциала устойчивости водных экосистем (на примере поверхностных вод РТ): Автореф. дис. кан. геогр. наук. – Ярославль, 2003.- 24 с.
14. Горшкова А.Т. Использование показателя комбинаторики видовой структуры сообществ гидробионтов в качестве оценочного критерия Эколого-биоценологического равновесия водной среды/Биоразнообразии и роль животных в экосистемах// Сборник трудов 4 международной научной конференции.-Днепропетровск: Изд-во ДНУ, 2007.-63-66с.
15. Лапин А.А. Киткина Ж.В. Исследование зоопланктона Заинского водохранилища республики Татарстан. Сб. науч. трудов. М., 2016, вып. 23, с. 157-161.
16. Woodiwiss, F. S. The biological system of stream classification used by Trent River Board // Chemistry and Industry. – 1964. – Vol. 11. – P. 443–447.
17. Wilhm J. L., Dorris T. C. Biological parametris for water quality enteric // Biosciense .- 1968.- Vol. 18 .- N 6'.- P. 477 - 480.
18. Zelinka M., Marvan P. Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation der Reinheitsfließender Gewässer // Arch.f. Hydrobiol.-1961 .-Bd. 57.-N3.-S. 389-407.
19. Zelinka M., Marvan P. Verh. Internat. Verein. Limnol.- 1966.- N 16.-P. 817-822.
20. Заинская ГРЭС (Татарстан) занялась зарыблением Куйбышевского водохранилища [Электронный ресурс]// regnum URL: <https://regnum.ru/news/167512> (дата обращения: 30.06.2023).
21. Иванова М.Б. Влияние загрязнения на планктонных ракообразных и возможность их использования для определения степени загрязнения рек / М.Б. Иванова// Методы биологического анализа пресных вод .-Л.-1976.-С.68-80.

Авторы публикации

Марина Львовна Калайда – д-р биол. наук, профессор; зав кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры; Казанский государственный энергетический университет; kalayda4@mail.ru.

Айнур Расихович Саетов – аспирант, Казанского государственного энергетического университета, Россия, 420066, Казань; saetov67@mail.ru.

Хамитова Мадина Фархадовна – канд. биол. наук., доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура», Казанский государственный энергетический университет; it-sk@bk.ru.

References

1. Kalaida M. L., Saetov A. R. Fish protection structures on reservoirs of energy facilities as an important measure for the conservation of fish population. - International Water and Energy Forum-2018: collection of materials of reports/ in 2-vols. Vol.1.-Kazan: Kazan State Energy University, 2018. - 373 p.-p.108-113.
2. Kalaida M. L., Saetov A. R. Environmental component of the operation of fish protection structures of the branch of JSC Tatenergo - Zainsk SDPP.- In the collection: XXV All-Russian postgraduate and master's scientific seminar dedicated to Power Engineer's Day. Conference materials. In 3 volumes. Under general editorship of E.U. Abdullazyanov . Kazan, 2022. P. 388-391.
3. Kalaida M. L., Saetov A. R. Aquatic biological resources in the structure of environmental problems of energy facilities / Problems of energy, 2022, vol.24, №2.- P.175-185.
4. Kalaida M. L., Sharafutdinov R. G. Modern hydrological characteristics of the Kuibyshev reservoir as a basis for the development of aquatic biological resources // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2023. Vol.25. № 1. P. 166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
5. Kalaida M. L., Sharafutdinov R. G. Features of changes in aquatic biological resources of the Kuibyshev reservoir in modern climatic and hydrological conditions // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2023. Vol.25. № 3. P. 150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.
6. Khamitova M.F., Kalaida M.L. Investigation of changes in hydrobiological characteristics under conditions of local pollution in the Middle Volga region. LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Germany.2018, 310 p.
7. Kalaida M. L., Gordeeva M.E. Features of the physico-chemical state of water in reservoirs of energy facilities. - International Water and Energy Forum -2018: collection of reports / in 2volumes. Vol.1. - Kazan: Kazan State Energy University, 2018. 373 p. P.284-290.

8. Kalaida M. L., Sharafutdinov R. G. Current state of aquatic biological resources of the Kuibyshev Reservoir.- State and ways of development of aquaculture in the Russian Federation: materials of the VIII national scientific and practical conference with international participation, Kerch, 4-6 October 2023 / edited by I.V. Poddubnaya; Vavilov University. – Saratov, 2023. – 259 p.
9. FAO. 2020. The state of world fisheries and aquaculture – 2020. Measures to increase sustainability. Rome, FAO. – 223 p.
10. The state of world fisheries and aquaculture: achieving the Sustainable Development Goals 2018 // Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/State202018.pdf> (accessed: 02/20/2020).
11. Makhnin V.G. Fishery development of the Zainsk reservoir. Collection of scientific works. L., 1988, issue. 280, p. 75-83.
12. Kitkina J.V. Ecological situation and self-purification processes in the Zainsk reservoir of the Republic of Tatarstan // Materials of the III Interuniversity Student Scientific and Practical Conference. Environmental policy: problems and prospects. Perm, 2015, p. 110-113.
13. Gorshkova A.T. spatial analysis of the biological potential of the sustainability of aquatic ecosystems (using the example of surface waters of the Republic of Tatarstan): Author's abstract PhD thesis on geography – Yaroslavl, 2003.- 24 p.
14. Gorshkova A.T. Using the combinatorics indicator of the species structure of aquatic communities as an assessment criterion for the Ecological-biocenotic balance of the aquatic environment / Biodiversity and the role of animals in ecosystems // Collection of works of 4 international scientific conference.- Dnepropetrovsk: Publishing House of DNU, 2007.-63-66p.
15. Lapin A.A. Kitkina J.V. Study of zooplankton in the Zainsky reservoir of the Republic of Tatarstan. Collection of scientific works. M., 2016, issue. 23, p. 157-161.
16. Woodiwiss, F. S. The biological system of stream classification used by Trent River Board // Chemistry and Industry. – 1964. – Vol. 11. – P. 443–447.
17. Wilhm J. L., Dorris T. C. Biological parametris for water quality enteric // Bioscience .-1968.- Vol. 18 .- N 6'- P. 477 - 480.
18. Zelinka M., Marvan P. Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation der Reinheitsfließender Gewässer // Arch. f. Hydrobiol.-1961 .-Bd. 57.-N3.-S. 389-407.
19. Zelinka M., Marvan P. Verh. Internat. Verein. Limnol.- 1966.- N 16.-P. 817-822.
20. Zainsk SDPP (Tatarstan) began stocking the Kuibyshev reservoir with fish [Electronic resource]// Regnum URL: <https://regnum.ru/news/167512> (date of access: 30.06.2023).
21. Ivanova M.B. The effect of pollution on planktonic crustaceans and the possibility of using them to determine the degree of river pollution / M.B. Ivanova // Methods for biological analysis of fresh water. - L.-1976.-P.68-80

Authors of the publication

Marina L. Kalaida – Doctor of Biology, Professor; Head of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture; Kazan State Power Engineering University; Russia, 420066, Kazan; kalayda4@mail.ru.

Aynur R. Saetov – Postgraduate Student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture; Kazan State Power Engineering University; Russia, 420066, Kazan; saetov67@mail.ru.

Madina F. Khamitova – PhD of Biology, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, Kazan State Energy University; Russia, 420066, Kazan, it-sk@bk.ru.

Шифр научной специальности: 2.10.2 Экологическая безопасность.

Получено

10.12.2023 г.

Отредактировано

15.12.2023 г.

Принято

22.12.2023 г.

Сдано в набор 15.12.2023 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 29.12.2023 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5294
Дата выхода в свет 30.12.2023 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

