



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**

**(28) 3 / 2026**

**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)

|                                       |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| <b>Главный редактор</b>               | АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю. |
| <b>Второй главный редактор</b>        | АХМЕТОВА И.Г.     |
| <b>Заместитель главного редактора</b> | STANIMIR VALTCHEV |

|                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| <b>Ответственные секретари</b> | ГРАЧЕВА Е.И.<br>ЗВЕРЕВА Э.Р. |
|--------------------------------|------------------------------|

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| <b>Научный Редактор</b> | КАЛИНИНА М.В. |
|-------------------------|---------------|

**ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:**

**ВАК:**

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ) (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

|                                             |                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Свидетельство<br/>о регистрации СМИ:</b> | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г. |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                  |                                                           |
|------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Подписка:</b> | Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740 |
|------------------|-----------------------------------------------------------|

|              |                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Сайт:</b> | <a href="https://www.energyret.ru/">https://www.energyret.ru/</a> |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|

|                  |                                                      |
|------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Издатель:</b> | Казанский государственный энергетический университет |
|------------------|------------------------------------------------------|

|                        |                                                                 |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Адрес издателя:</b> | 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|

|                        |                                                                 |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Адрес редакции:</b> | 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| <b>Тел./факс:</b> | +7 (843) 527-92-76 |
|-------------------|--------------------|

|               |                       |
|---------------|-----------------------|
| <b>Email:</b> | problems_ener@mail.ru |
|---------------|-----------------------|

|                    |          |
|--------------------|----------|
| <b>Типография:</b> | ООО "45" |
|--------------------|----------|

|                          |                                                         |
|--------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Адрес типографии:</b> | 420023, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Чехова, 28 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------|



# **Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

---

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**2026  
Т.28, № 3  
Май – Июнь**

**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., Stanimir Valtchev, Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Андреев В.П., Аракелян Э.К., Борисов В.В., Боруш О.В., Бочкарев И.В., Брякин И.В., Ваньков Ю.В., Вафин Д.Б., Голенищев-Кутузов А.В., Грачева Е.И., Дмитриев А.В., Довгун В.П., Зверева Э.Р., Ившин И.В., Калайда М.Л., Касимов В.А., Козелков О.В., Корнилов В.Ю., Лаптев А.Г., Мещеряков В.Н., Мингалеева Г.Р., Николаева Л.А., Илюшин П.В., Сафин А.Р., Суслов К.В., Федотов А.И., Щинников П.А., Якимов Н.Д.

**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

**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:**

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT (BY TYPE OF MEASUREMENT)  
(TECHNICAL SCIENCES);  
METHODS AND INSTRUMENTS FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,  
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT (TECHNICAL SCIENCES);  
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);  
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);  
ELECTRIC POWER ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);  
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES (TECHNICAL SCIENCES);  
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);  
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES).

**EDITORIAL BOARD:**

Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Andreev Victor, Arakelyan Edik, Borisov Andrey, Borush Olesya, Bochkarev Igor, Briakin Ivan, Vankov Yury, Vafin Danil, Golenishchev-Kutuzov Alexander, Gracheva Elena, Dmitriev Andrey, Dovgun Valery, Zvereva Elvira, Igor Ivshin, Kalaida Marina, Vasil Kasimov, Kozelkov Oleg, Kornilov Vladimir, Laptev Anatoly, Meshcheryakov Viktor, Mingaleeva Guzel, Nikolaeva Larisa, Ilyushin Pavel, Safin Alfred, Suslov Konstantin, Fedotov Alexander, Shchinnikov Pavel, Yakimov Nikolay.

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

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

**Printing House:** LLC «45»

**Address of the printing house** 420023, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan,  
28 Chekhov str.

**Email:** problems\_ener@mail.ru

**Site:** <https://www.energyret.ru/>



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

- АБДУРАШИТОВ С.Ф., БАСЕНКО В.Р., ПЕТРОВ Т.И., ИВШИН И.В.** Разработка имитационной модели синхронного двигателя в составе электротехнических комплексов при проведении контроля технического состояния с применением лазерных технологий 3
- ЗАГРЕТДИНОВ А.Р., ЗИГАНШИН Ш.Г., КЛЮКИН И.И., АЛЕКСАНДРОВ Р.Н.** Акустический мониторинг утечек трубопроводов на основе фрактального анализа сигналов 16

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

- КУЛИКОВ А.Л., ФЕДОСОВ Д.С., ЧЕРНЕЕВ П.П.** Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи с заземленным грозозащитным тросом путём решения квадратных уравнений 26
- ПЕТРОВА Р.М., ГРАЧЕВА Е.И.** Моделирование параметров надёжности схем электроснабжения объектов в среде Matlab/Simulink 37
- СОЛОВЬЕВ Р.Ю., СОЛОВЬЕВ Р.Р., БУКРЕЕВ А.В.** Совершенствование методики тягового расчёта при проектировании электропривода гибридных сельскохозяйственных модульных платформ 49
- МАСКОВ Л.Р., САФИН А.Р.** Интеллектуальная система управления электроприводами вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа с аналитической диагностикой теплотехнического состояния 63
- СКОПИН Г.А., КОМКОВ А.Н.** Стабилизация критических переходных процессов ДКИН и построение аддитивной логики координации защит 86
- ГОЛОВИН М.М., ПОРТНЯГИН Н.Н.** Электронная метка для экспериментальной оценки задержки тока ротора асинхронного двигателя 103
- ДЕРКАЧЁВ С.В., СИДОРОВ В.А.** Оценка технического состояния электромеханической системы на основе вибрационных показателей в режиме пуска 112

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

- ОВСЯННИКОВ А.Г., ЖАРИЧ Д.С., ШВЕЦ Н.А.** Оценка степени загрязнения изоляции по спектру излучения поверхностных частичных разрядов 128

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ**

- ЛИТВИНЕНКО А.А., ВАНЬКОВ Ю.В.** Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов по изменению температурного напора и гидравлического сопротивления 141
- КАКУШИНА Е.Г., ЯКИМОВИЧ Б.А., ШАЙТОР Н.М.** Использование систем тригенерации для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов 151

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА**

- ЗАХАРОВ А.С., АЕТОВ А.У., САЛЯХОВ Р.Х., ГИЛЬМУТДИНОВ И.М.** Моделирование энергосберегающего режима работы компрессорной станции магистрального газопровода 164
- ЮДИН А.К., ВЛАДИМИРОВ Я.А., МУХАМЕТОВА Л.Р.** Моделирование теплового насоса и абсорбционной холодильной машины для утилизации тепловой энергии дата-центра 178
- КРУТОВА И.А., ЗОЛОТОНОСОВ Я.Д.** Влияние геометрических параметров на теплогидродинамическую эффективность конических теплообменников типа «труба в трубе» 192
- НИКОЛАЕВА Л.А., ЗАЙНУЛЛИНА Э.Р., САФИНА Г.Г.** Утилизация золошлаковых отходов в качестве сорбционных материалов для обессоливания обратноосмотического концентрата ТЭС 207

## CONTENTS

## METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ABDURASHITOV S.F., BASENKO V.R., PETROV T.I., IVSHIN I.V. Development of a simulation model of a synchronous motor as part of electrical complexes when conducting technical condition control using laser technologies | 3  |
| ZAGRETDINOV A.R., ZIGANSHIN SH.G., KLYUKIN I.I., ALEXANDROV R.N. Acoustic monitoring of pipeline leaks based on fractal analysis of signal                                                                              | 16 |

## ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| KULIKOV A.L., FEDOSOV D.S., CHERNEEV P.P. Fault-location on high-voltage overhead power lines with a grounded ground wire by solving quadratic equation                      | 26  |
| PETROVA R.M., GRACHEVA E.I. Modeling of reliability parameters of electrical power supply circuits of facilities in the Matlab/Simulink environment.                         | 37  |
| SOLOVYOV RY.U., SOLOVYOV R.R., BUKREEV A.V. Improvement of the traction calculation methodology for the electric drive design of hybrid agricultural modular platforms       | 49  |
| MASKOV L.R., SAFIN A.R. Optimization of discrete control of electric actuators of ventilators of gas air cooling appliances with analytical diagnostics of thermal condition | 63  |
| SKOPIN G.A., KOMKOV A.N. Stabilization of critical transient processes in DVR systems and development of additive protection coordination logic                              | 86  |
| GOLOVIN M.M., PORTNYAGIN N.N. Electronic marker for experimental estimation of rotor current delay in an induction motor                                                     | 103 |
| DERKACHEV S.V., SIDOROV V.A. Assessment of the technical condition of an electromechanical system based on vibration indicators in start-up mode                             | 112 |

## ELECTRIC POWER INDUSTRY

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| OVSYANNIKOV A.G., ZHARICH D.S., SHVETS N.A. Assessment of the degree of contamination of insulation by the radiation spectrum of surface partial discharges | 128 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LITVINENKO A.A., VANKOV Y.V. Diagnostics of the technical condition of heat exchange equipment by changes in temperature pressure and hydraulic resistance | 141 |
| KAKUSHINA E.G., YAKIMOVICH B.A., SHAITOR N.M. Using trigeneration systems to increase energy efficiency and sustainability of computing complexes          | 151 |

## THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ZAKHAROV A.S., AETOV A.U., SALYAKHOV R.KH., GILMUTDINOV I.M. Modeling of energy-saving operating mode of a compressor station of a main gas pipeline.                  | 164 |
| YUDIN A.K., VLADIMIROV Y.A., MUKHAMETOVA L.R. Simulation of a heat pump and an absorption refrigerating machine for the utilization of thermal energy in a data center | 178 |
| KRUTOVA I.A., ZOLOTONOSOV YA.D. Influence of geometric parameters on the thermal and hydrodynamic efficiency of conical pipe-in-pipe heat exchangers                   | 192 |
| NIKOLAEVA L.A., ZAINULLINA E.R., SAFINA G.G. Utilization of ash and slag waste as sorption materials for desalination of reverse osmosis concentrate TES               | 207 |

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



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Абдурашитов С.Ф., Басенко В.Р., Петров Т.И., Ившин И.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
abdurashitov.samir@gmail.com

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Обеспечение надежной и эффективной работы электрооборудования является критически важным для функционирования различных отраслей промышленности. В связи с этим, разработка методов и средств контроля технического состояния электротехнических комплексов приобретает особую актуальность. Использование лазерных технологий в данном контексте открывает новые возможности для неразрушающей диагностики и мониторинга состояния оборудования. Предлагаемая имитационная модель синхронного двигателя в составе электротехнических комплексов будет базироваться на современных программных платформах, позволяющих проводить многопараметрическое моделирование электромагнитных, тепловых и механических процессов, протекающих в электрооборудовании. Это обеспечит высокую степень соответствия виртуальной модели реальному объекту и, следовательно, достоверность результатов контроля. **ЦЕЛЬ.** Цель исследования – разработать имитационную модель, которая позволит изменять параметры синхронного двигателя для имитации различных типов неисправностей и отклонений от нормального состояния, в частности для подшипниковой системы. **МЕТОДЫ.** Для точного анализа динамического поведения подшипниковых узлов синхронного двигателя, входящего в электротехнический комплекс, применяется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий дискретизировать сложную геометрию двигателя и учитывать неоднородность материалов. В данной работе используются коммерческие пакеты программного обеспечения COMSOL Multiphysics, обладающие широкими возможностями для моделирования твердотельной механики и динамики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Создание имитационной модели позволяет воссоздать поведение подшипника в различных условиях эксплуатации, а также исследовать его реакцию на наличие дефектов. Это дает возможность выявить закономерности, описывающие связь между параметрами вибрации, акустическими сигналами и характером повреждений. В данном исследовании при повреждении внутреннего кольца, которое задано как небольшой дефект (глубина 1 мм) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 133,84 Гц. При повреждении наружного кольца, которое задано как небольшой скос (1 мм глубиной) в геометрической модели, во

всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 106,16 Гц. При повреждении тел качения, которое задано как небольшой дефект (глубина 0,2 мм) одного шарика в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 3,7908 Гц. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований показывают, что наибольшее влияние на возникновение колебаний в подшипнике оказывает состояние его кольцевых элементов (наружного и внутреннего). Изменение конфигурации поверхностного слоя наружных и внутренних колец, такое как образование минимальных углублений (например, глубиной 1 мм), вызывает резкое возрастание виброактивности. Экспериментально подтверждено, что диагностирование и моделирование процессов износа и повреждений подшипников должно учитывать особое внимание состоянию кольцевых элементов, поскольку их деградация оказывает решающее влияние на общую работоспособность механизма. Создание точной имитационной модели, способной анализировать степень изношенности колец и тел качения, позволит повысить эффективность диагностики неисправностей и своевременно выявлять потенциальные проблемы, влияющие на надежность и долговечность подшипниковых узлов синхронных электродвигателей.

**Ключевые слова:** имитационная модель; синхронные двигатели; лазерные технологии; электротехнический комплекс; техническое состояние.

**Благодарности:** Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2026-543 от 16.01.2026 по теме "Разработка инновационных компонентов для электромобилей различного климатического исполнения с использованием технологии цифрового двойника".

**Для цитирования:** Абдурашитов С.Ф., Басенко В.Р., Петров Т.И., Ившин И.В. Разработка имитационной модели синхронного двигателя в составе электротехнических комплексов при проведении контроля технического состояния с применением лазерных технологий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15.

## **DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF A SYNCHRONOUS MOTOR AS PART OF ELECTRICAL COMPLEXES WHEN CONDUCTING TECHNICAL CONDITION CONTROL USING LASER TECHNOLOGIES**

**Abdurashitov S.F., Basenko V.R., Petrov T.I., Ivshin I.V.**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

*abdurashitov.samir@gmail.com*

**Abstract:** RELEVANCE. Ensuring the reliable and efficient operation of electrical equipment is critical to the functioning of various industries. Therefore, the development of methods and means for monitoring the technical condition of electrical systems is particularly relevant. The use of laser technologies in this context opens up new possibilities for non-destructive diagnostics and monitoring of equipment condition. The proposed simulation model of a synchronous motor in electrical systems will be based on modern software platforms enabling multiparameter modeling of electromagnetic, thermal, and mechanical processes occurring in electrical equipment. This



will ensure a high degree of correspondence between the virtual model and the actual object and, consequently, the reliability of the testing results. **OBJECTIVE.** The objective of the study is to develop a simulation model that will allow for varying the parameters of a synchronous motor to simulate various types of faults and deviations from the normal state, particularly for the bearing system. **METHODS.** To accurately analyze the dynamic behavior of the bearing assemblies of a synchronous motor, part of an electrical system, we used the finite element method (FEM). This method allows us to discretize the complex geometry of the motor and account for material heterogeneity. This study utilizes the commercial COMSOL Multiphysics software package, which offers extensive capabilities for modeling solid-state mechanics and dynamics. **RESULTS:** Creating a simulation model allows us to recreate the behavior of the bearing under various operating conditions and study its response to defects. This makes it possible to identify patterns describing the relationship between vibration parameters, acoustic signals, and the nature of damage. In this study, damage to the inner ring, defined as a small defect (1 mm deep) in the geometric model, resulted in a change in the oscillation frequency in all eight experiments, with the average value obtained being 133.84 Hz. In the case of damage to the outer ring, which is defined as a small chamfer (1 mm deep) in the geometric model, a change in the oscillation frequency occurred in all 8 experiments, and the average value obtained was 106.16 Hz. In the case of damage to the rolling elements, which is defined as a small defect (0.2 mm deep) of one ball in the geometric model, a change in the oscillation frequency occurred in all 8 experiments, and the average value obtained was 3.7908 Hz. **CONCLUSION.** The results of the conducted studies show that the condition of the annular elements (outer and inner) has the greatest influence on the occurrence of vibrations in a bearing. Changes in the configuration of the surface layer of the outer and inner rings, such as the formation of minimal depressions (e.g., 1 mm deep), cause a sharp increase in vibration activity. It has been experimentally confirmed that the diagnosis and modeling of bearing wear and damage processes should pay special attention to the condition of the annular elements, since their degradation has a decisive impact on the overall performance of the mechanism. The development of an accurate simulation model capable of analyzing the degree of wear on rings and rolling elements will improve the efficiency of fault diagnostics and promptly identify potential problems affecting the reliability and durability of synchronous electric motor bearing assemblies.

**Key words:** simulation model; synchronous motors; laser technologies; electrical engineering complex; technical condition.

**Acknowledgments:** The results of the study were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignment No. 075-03-2026-543 dated January 16, 2026, on the topic "Development of innovative components for electric vehicles of various climates using digital twin technology."

**For citation:** Abdurashitov S.F., Basenko V.R., Petrov T.I., Ivshin I.V. Development of a simulation model of a synchronous motor as part of electrical complexes when conducting technical condition control using laser technologies. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15.

### **Введение (Introduction)**

В современном мире возрастающие требования к надежности и безопасности функционирования электротехнических комплексов (ЭТК) выдвигают на первый план задачи эффективного контроля технического состояния электрооборудования. Традиционные методы диагностики, основанные на периодических осмотрах и измерениях, зачастую не позволяют выявить скрытые дефекты на ранних стадиях их развития, что

может приводить к аварийным ситуациям и значительным экономическим потерям. В этой связи актуальным становится разработка и внедрение автоматизированных систем контроля технического состояния, основанных на применении современных технологий, в частности, лазерных методов. Лазерные системы обладают рядом преимуществ, таких как высокая точность измерений, возможность бесконтактной диагностики, а также способность обнаруживать дефекты на микроскопическом уровне. Целью исследования является разработка имитационной модели для проведения контроля технического состояния электрооборудования в составе электротехнического комплекса с применением лазерных технологий. Имитационная модель позволит исследовать эффективность различных алгоритмов диагностики, оптимизировать параметры лазерных систем, а также оценить надежность и безопасность функционирования ЭТК в целом.

#### **Литературный обзор (Literary review)**

Для реализации математической модели, описывающей процессы деградации электрооборудования, целесообразно использовать аппарат теории случайных процессов [1,2]. Это позволит учесть случайный характер изменения параметров оборудования во времени, а также влияние различных факторов, таких как температура, влажность и механические нагрузки. В качестве базовых моделей могут быть использованы модели экспоненциального, линейного и степенного износа, параметры которых определяются на основе статистических данных и результатов экспертных оценок [3]. Модель лазерной системы контроля технического состояния должна включать в себя описание процесса взаимодействия лазерного излучения с поверхностью электрооборудования, а также характеристики приемной системы. Необходимо учитывать такие факторы, как отражательная способность материала, форма поверхности, наличие загрязнений и вибраций. Для повышения точности моделирования целесообразно использовать методы геометрической оптики и дифракционной теории. Алгоритм обработки данных, получаемых от лазерной системы, должен обеспечивать выделение полезного сигнала из шума, а также идентификацию дефектов на основе анализа полученных данных [4,5]. Для этого могут быть использованы методы цифровой фильтрации, спектрального анализа и машинного обучения. Важным этапом является разработка критериев оценки технического состояния оборудования на основе данных лазерного контроля. Имитационное моделирование процесса контроля технического состояния электрооборудования позволит оценить эффективность разработанных моделей и алгоритмов, а также оптимизировать параметры лазерной системы [6]. Использование имитационного моделирования предоставляет возможность всестороннего анализа влияния различных факторов на процесс контроля. Например, моделирование можно использовать для оценки эффективности различных методов диагностики, определения оптимальной периодичности технического обслуживания и прогнозирования остаточного ресурса оборудования. Кроме того, такой подход позволяет учитывать влияние случайных факторов, таких как колебания напряжения, температуры и вибрации, на техническое состояние электрооборудования [7]. В ходе моделирования необходимо учитывать различные сценарии развития дефектов, а также варьировать параметры лазерной системы и алгоритма обработки данных. Результаты моделирования позволят определить оптимальные параметры системы контроля и оценить ее влияние на надежность и безопасность функционирования ЭТК. В последние годы для решения задач диагностики активно применяются методы компьютерного моделирования.

Создание точной 3D-модели и проведение модального анализа методом конечных элементов (МКЭ) является эффективным инструментом для проектирования электродвигателей и прогнозирования их вибрационных характеристик [8]. Точность 3D-моделирования играет ключевую роль в успешности модального анализа. Детализированное воспроизведение геометрии двигателя, включая ротор, статор, обмотки и корпус, позволяет учесть все важные конструктивные особенности, влияющие на его вибрационное поведение. Для создания 3D-моделей применяются различные CAD-системы,

такие как SolidWorks, AutoCAD, CATIA, каждая из которых обладает своими преимуществами в плане функциональности и удобства работы. Выбор конкретной CAD-системы зависит от сложности конструкции двигателя, требуемой точности моделирования и личных предпочтений инженера [9]. Одним из самых уязвимых узлов синхронных двигателей являются подшипники. Их исправная работа критически важна для обеспечения надежной эксплуатации оборудования. Такие дефекты, как износ, сколы и трещины, приводят к вибрациям, шумам, повышению температуры и, в конечном итоге, к аварийной остановке двигателя [10, 11]. В связи с этим своевременное выявление и локализация дефектов подшипниковых узлов является ключевой задачей диагностики. Алгоритм обработки данных, получаемых от лазерной системы, должен обеспечивать выделение полезного сигнала на фоне шума и идентификацию дефектов. Дефекты, как правило, проявляются в виде отклонений от ожидаемой формы сигнала, таких как пики, провалы или искажения. Важным аспектом является применение методов машинного обучения, в частности обучение для классификации дефектов по их характерным признакам. Для этого необходима предварительная подготовка обучающей выборки, содержащей данные о различных типах дефектов и соответствующих им параметрах сигнала [12]. Таким образом, имитационное моделирование процесса контроля технического состояния электрооборудования позволяет оценить эффективность разработанных моделей и алгоритмов, а также оптимизировать параметры лазерной системы [13,14]. Вариация сценариев развития дефектов, параметров лазерной системы и алгоритмов обработки данных в ходе моделирования позволяет определить оптимальные настройки системы контроля и оценить ее влияние на надежность и безопасность функционирования ЭТК.

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

Для реализации исследования по определению информативного частотного диапазона выбран программный пакет COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics - это комплексная интегрированная среда для моделирования различных физических явлений. Данный программный пакет имеет полную совместимость с системами типа CAD/CAM/CAE, что позволяет использовать дополнительные инструменты для создания 3D геометрии исследуемого синхронного двигателя и его подшипникового узла. Блок-схема алгоритма расчета частот колебаний синхронного двигателя представлена на рисунке 1.

Интеграция 3D моделирования с методами МКЭ представляет собой мощный инструмент для проектирования надежных и эффективных синхронных двигателей с минимальным уровнем вибраций. Одним из самых уязвимых узлов синхронных двигателей являются подшипники. Их исправная работа критически важна для обеспечения надежной и долговечной эксплуатации оборудования. Дефекты подшипников, такие как износ, сколы, трещины, приводят к вибрациям, шумам, повышению температуры и, в конечном итоге, к аварийной остановке двигателя. Своевременное выявление и локализация дефектов – задача, требующая применения современных методов диагностики.

Моделирование механических колебаний элементов синхронного двигателя осуществляется через понятия механических напряжений и тензора напряжений, описанных в уравнении (1).

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} = \nabla \times s + F_v \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала (кг/м<sup>3</sup>);

$u$  – величина механического напряжения (Па);

$s$  – смещение (мкм);

$F_v$  – воздействие на подшипник (Н).

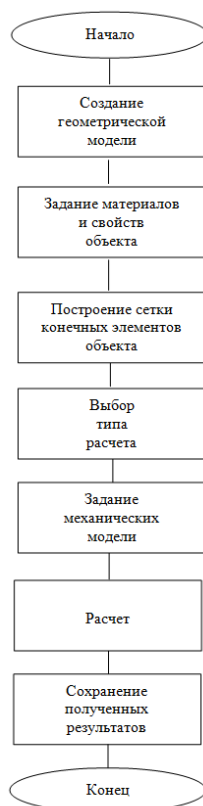


Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследования при создании имитационной модели

Fig.1. Flowchart of the research algorithm for creating a simulation model

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

### **Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

*Результаты исследования вибрационных характеристик на основе разработанной имитационной модели.*

Создание 3D модели синхронного двигателя для определения вибрационных параметров – это сложный, но крайне важный процесс, играющий ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности электромеханического оборудования. Точная 3D модель позволяет инженерам детально изучить структуру двигателя, выявить потенциальные источники вибраций и оптимизировать конструкцию для минимизации этих нежелательных явлений [8,9]. Первым этапом является геометрическое моделирование всех компонентов двигателя, включая статор, ротор, обмотки, подшипники и корпус. Необходимо учитывать мельчайшие детали, такие как пазовые структуры, вентиляционные каналы и сварные швы, поскольку каждый из них может оказывать влияние на вибрационные характеристики. Использование CAD-системы КОМПАС 3D позволяет создавать высокоточные модели, отражающие реальную геометрию двигателя.

Далее следует этап определения физических свойств материалов, используемых в конструкции двигателя. Для этого применялось программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Необходимо учитывать плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и демпфирующие характеристики каждого материала. Эти параметры необходимы для точного моделирования поведения двигателя под воздействием электромагнитных сил и механических нагрузок. На рисунке 2 представлена синхронного двигателя серии BM 1418 для построения имитационной модели.

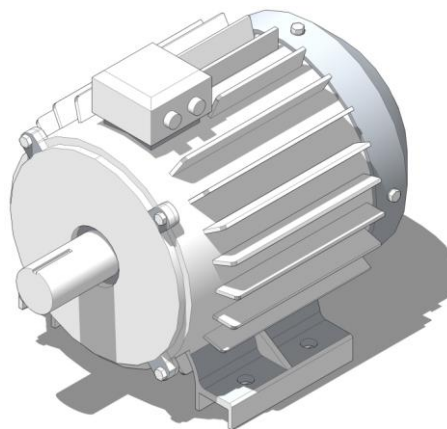


Рис. 2. 3D модель синхронного двигателя для построения имитационной модели  
*Fig.2. 3D model of a synchronous motor for building a simulation model*  
Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors*

Технические характеристики представленного двигателя:

1. Тип двигателя: синхронный, с постоянными магнитами.
2. Номинальное напряжение: Зависит от модели (380/220 Вольт переменного тока; 24 Вольт, 36 Вольт или 48 Вольт постоянного тока).
3. Номинальный ток: Зависит от модели и напряжения.
4. Номинальная скорость: Варьируется в зависимости от исполнения (данная модель 2750 об/мин).

Крутящий момент: Зависит от скорости и напряжения.

Эффективность: Высокая, КПД 85%.

Вес: 4 кг.

Конструктивные особенности двигателя заключаются в конструкции, обеспечивающую долговечность и надежную работу. Корпус обычно изготавливается из алюминиевого сплава для улучшения теплоотвода. Встроенные подшипники обеспечивают плавное и бесшумное вращение.

После создания 3D модели и определения свойств материалов, ее можно использовать для проведения модального анализа методом конечных элементов (МКЭ). Такой анализ позволяет определить собственные частоты и формы колебаний двигателя, что крайне важно для избегания резонансных явлений, которые могут привести к разрушению конструкции. На рисунке 2 представлена 3D синхронного двигателя для дальнейшего ее применения, в рамках создания имитационной модели. Результаты модального анализа используются для оптимизации конструкции двигателя. Путем изменения геометрии компонентов, использования демпфирующих материалов или изменения способов крепления можно значительно снизить уровень вибраций и тем самым увеличить срок службы двигателя.

Для локализации дефектов в рамках данного исследования принято рассматривать имитационную модель подшипника и определения ее имитационных параметров. Имитационное моделирование позволяет воссоздать поведение подшипника в различных условиях эксплуатации, а также исследовать его реакцию на наличие дефектов. Это дает возможность выявить закономерности, описывающие связь между параметрами вибрации, акустическими сигналами и характером повреждений. В качестве основы для имитационной модели используются математические уравнения, описывающие динамику качения тел качения, работу смазочного слоя, а также свойства материалов подшипника. Модель учитывает факторы, такие как геометрические параметры, нагрузки и температуры, влияющие на вибрационное состояние. Введение в модель имитации дефектов



осуществляется путем изменения параметров, характеризующих геометрию и жесткость элементов подшипника. На рисунке 3 представлена геометрическая модель подшипника синхронного двигателя серии ВМ 1418 для построения имитационной модели и определения частотных характеристик данного подшипника.

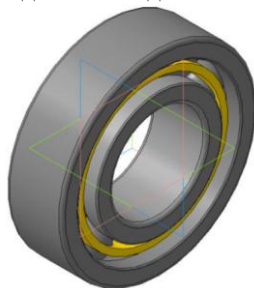


Рис. 3. 3D модель подшипника синхронного двигателя для построения имитационной модели

Fig. 3. 3D model of synchronous motor bearing for building a simulation model

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Для дальнейшей верификации и определения повреждений синхронных двигателей, а именно их подшипниковых систем произведены расчёты основной собственной частоты подшипников для 3 типов повреждений при различных размерах тел. Одними из самых распространённых повреждений подшипников синхронных двигателей с постоянными магнитами являются:

- неровности наружного кольца;
- неровности внутреннего кольца;
- неровности тел качения.

С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics рассчитаны собственные колебаний и выделена частота первой моды колебаний, имеющая наибольшее значение амплитуды колебаний. Результаты представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1  
Table 1

Частота первой моды колебаний при различных размерах тел качения (без дефектов)  
Frequency of the first mode of oscillations for different sizes of rolling elements (without defects)

| № | Гвр (Гц) | Ртк (мм) | Рс (мм) | $\cos \alpha$ | Fc (Гц)     |
|---|----------|----------|---------|---------------|-------------|
| 1 | 50       | 5        | 20      | 0,5           | 21,875      |
| 2 | 40       | 4        | 18      | 0,5           | 17,77777778 |
| 3 | 30       | 3        | 18      | 0,5           | 13,75       |
| 4 | 20       | 6        | 20      | 0,5           | 8,5         |
| 5 | 10       | 6        | 22      | 0,5           | 4,318181818 |
| 6 | 50       | 4        | 20      | 0,5           | 22,5        |
| 7 | 40       | 4        | 18      | 0,5           | 17,77777778 |
| 8 | 30       | 4        | 16      | 0,5           | 13,125      |

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Проведено 8 численных экспериментов для различных размеров тел качения (Ртк) при различной частоте вращения подшипника (Гвр) с различным диаметров сепаратора (Рс) при одинаковом угле контакта подшипника ( $\cos \alpha$ ). Средняя частота первой моды колебаний получилась 14,95 Гц (среднее значение по столбику Fc)

В полученном выше расчёте при повреждении наружного кольца, которое задано как небольшой скос (1 мм глубиной) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 106,16 Гц.

Таблица 2  
Table 2Частота первой моды колебаний при неровности наружного кольца  
*Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of the outer ring*

| №  | Фвр (Гц) | R <sub>тк</sub> (мм) | R <sub>с</sub> (мм) | cos α | F <sub>с</sub> (Гц) |
|----|----------|----------------------|---------------------|-------|---------------------|
| 9  | 50       | 5                    | 20                  | 0,5   | 175                 |
| 10 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 124,4444444         |
| 11 | 30       | 3                    | 18                  | 0,5   | 82,5                |
| 12 | 20       | 6                    | 20                  | 0,5   | 68                  |
| 13 | 10       | 6                    | 22                  | 0,5   | 30,22727273         |
| 14 | 50       | 4                    | 20                  | 0,5   | 135                 |
| 15 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 142,2222222         |
| 16 | 30       | 4                    | 16                  | 0,5   | 91,875              |

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Таблица 3  
Table 3Частота первой моды колебаний при неровности внутреннего кольца  
*Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of the inner ring*

| №  | Фвр (Гц) | R <sub>тк</sub> (мм) | R <sub>с</sub> (мм) | cos α | F <sub>с</sub> (Гц) |
|----|----------|----------------------|---------------------|-------|---------------------|
| 17 | 50       | 5                    | 20                  | 0,5   | 175                 |
| 18 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 124,4444444         |
| 19 | 30       | 3                    | 18                  | 0,5   | 82,5                |
| 20 | 20       | 6                    | 20                  | 0,5   | 68                  |
| 21 | 10       | 6                    | 22                  | 0,5   | 30,22727273         |
| 22 | 50       | 4                    | 20                  | 0,5   | 135                 |
| 23 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 142,2222222         |
| 24 | 30       | 4                    | 16                  | 0,5   | 91,875              |

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

В полученном выше расчёте при повреждении внутреннего кольца, которое задано как небольшой дефект (глубина 1 мм) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 133,84 Гц.

Таблица 4  
Table 4Частота первой моды колебаний при неровности тел качения  
*Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of rolling elements*

| №  | Фвр (Гц) | R <sub>тк</sub> (мм) | R <sub>с</sub> (мм) | cos α | F <sub>с</sub> (Гц) |
|----|----------|----------------------|---------------------|-------|---------------------|
| 25 | 50       | 5                    | 20                  | 0,5   | 6,15234375          |
| 26 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 4,38957476          |
| 27 | 30       | 3                    | 18                  | 0,5   | 2,482638889         |
| 28 | 20       | 6                    | 20                  | 0,5   | 2,9325              |
| 29 | 10       | 6                    | 22                  | 0,5   | 1,338279489         |
| 30 | 50       | 4                    | 20                  | 0,5   | 4,95                |
| 31 | 40       | 4                    | 18                  | 0,5   | 4,38957476          |
| 32 | 30       | 4                    | 16                  | 0,5   | 3,69140625          |

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

В полученном выше расчёте при повреждении тел качения, которое задано как небольшой дефект (глубина 0,2 мм) одного шарика в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 3,7908 Гц.

Полученные результаты показывают, что спектр частот колебаний подшипника характеризуется наличием нескольких доминирующих пиков. Анализ показал, что основные частоты колебаний лежат в диапазоне от 3 Гц до 0,2 кГц. Статистическая обработка результатов 32 экспериментов позволила оценить средние значения частот.

Данная информация может быть использована для построения гистограмм распределения частот и определения вероятности появления колебаний в определённых диапазонах. Такой анализ необходим для разработки эффективных методов вибродиагностики и предотвращения повреждений подшипниковых узлов в реальных условиях эксплуатации с помощью лазерных технологий. В дальнейшем предполагается применение лазерного комплекса, представленного на рисунке 5, для верификации полученных результатов.



Рис. 5. Схема лазерного комплекса: 1 – лазерный виброметр; 2 – multifunctional input/output module; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение

Fig. 5. Laser system diagram: 1 – laser vibrometer; 2 – multifunctional input/output module; 3 – personal computer; 4 – software

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Ключевой особенностью предлагаемого лазерного комплекса служит специализированный программный модуль, предназначенный для осуществления фрактального анализа технических параметров.

### **Заключение (Conclusions)**

В результате реализации исследования по созданию имитационной модели, можно получить инструмент, позволяющий оценивать возможности применения лазерных технологий для контроля технического состояния конкретных электротехнических комплексов; выбирать оптимальное лазерное оборудование и настраивать параметры контроля; разрабатывать и оптимизировать сценарии (алгоритмы) диагностики электрооборудования с применением лазерных технологий. Проведённый эксперимент позволяет сделать ряд выводов относительно влияния дефектов подшипников на частоту колебаний:

1. При наличии небольшого дефекта в форме скошенной поверхности глубиной 1 мм наблюдается значительное изменение частоты колебаний подшипника. Среднее значение составляет 106,16 Гц. Это свидетельствует о том, что даже небольшие дефекты наружной обоймы существенно влияют на динамику вращения подшипника.

2. Дефект внутреннего кольца аналогичной глубины также вызывает существенное повышение частот колебаний до среднего значения 133,84 Гц, что ещё больше подчёркивает влияние состояния внутренних элементов подшипника на стабильность вращательного движения.

3. Небольшое повреждение на одном из шариков глубиной всего 0,2 мм приводит к изменению частоты колебаний, однако значительно меньшему по сравнению с повреждениями колец. Средний показатель составил лишь 3,7908 Гц.

Наиболее значимое влияние на колебания оказывает состояние кольцевых элементов подшипника (наружного и внутреннего). Даже незначительные изменения геометрии внешнего и внутреннего кольца приводят к существенным изменениям характеристик вибрации системы. Хотя наличие небольших дефектов на телах качения также влияет на колебательные процессы, этот эффект намного менее выражен по сравнению с дефектами колец. В то же время дефект тела качения, вызывая лишь

локальное возмущение, оказывает менее выраженное влияние на общую жесткость подшипника. Более высокая чувствительность частоты первой моды к дефектам внутреннего кольца по сравнению с наружным может быть обусловлена тем, что внутреннее кольцо непосредственно связано с валом, который является основным элементом передачи вибраций в системе. Следовательно, дефекты внутреннего кольца сильнее отражаются на вибрационных характеристиках вала, что и проявляется в более значительном сдвиге частоты. Сдвиг частоты первой моды колебаний является индикатором наличия дефекта, а его величина коррелирует с серьезностью повреждения. Полученные результаты позволяют перейти к разработке алгоритмов для количественной оценки размеров и типа дефектов на основе анализа вибрационных характеристик. Предложенный метод может быть интегрирован в системы мониторинга технического состояния оборудования для своевременного выявления дефектов подшипников, что позволит предотвращать аварии и увеличивать срок службы механизмов.

Таким образом, исследование показывает, что создание имитационной модели синхронного двигателя и его элементов, для контроля состояния наружных и внутренних колец, тел качения подшипников синхронных двигателей является критически важным фактором при диагностике и оценке работоспособности подшипникового узла.

### Литература

1. Редников С. Н. и др. Диагностика электротехнических компонентов гидротехнического оборудования: эффективность комплексного подхода //Агроинженерия. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 71-77.
2. Скворцов О. Б., Сташенко В. И. ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ //ББК 22.9 М 39 Редакционная коллегия: д-р физ.-мат. наук, профессор ВЕ Громов, д-р. техн. наук, доцент ДВ Загуляев. – 2023. – Т. 13. – С. 91.
3. Губарев В. А. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ //ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ КАК ОТВЕТ НА ВЫЗОВЫ НОВОГО ВРЕМЕНИ. – 2021. – С. 23-26.
4. Басенко, В. Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта "Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности" / В. Р. Басенко, Т. И. Петров, А. Р. Ибрагимов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 46-54. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54. – EDN NHHZGX.
5. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта / А. Р. Сафин, В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN BJTZLX.
6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing //Engineering. – 2022. – Т. 11. – С. 126-137.
7. Пивень И. С. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ: АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ //Вестник науки. – 2025. – Т. 4. – №. 1 (82). – С. 1215-1223.
8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. – John Wiley & Sons, 2021.
9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers //Journal of Sound and Vibration. – 2021. – Т. 494. – С. 115883.
10. Jin X. et al. Robust vibration control for active suspension system of in-wheel-motor-

driven electric vehicle via  $\mu$ -synthesis methodology // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2022. – Т. 144. – №. 5. – С. 051007.

11. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

12. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9\_17. – EDN EIGGGZ.

13. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

14. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. – Cham : Springer, 2022. – С. 57.

### Авторы публикации

**Абдурашитов Самир Фуадович** - аспирант Казанского государственного энергетического университета.

**Басенко Василий Романович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

**Петров Тимур Игоревич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

**Ившин Игорь Владимирович** – д-р техн. наук, проректор по науке и коммерциализации Казанского государственного энергетического университета.

### References

1. Rednikov S. N. et al. Diagnostics of electrical components of hydraulic equipment: the effectiveness of an integrated approach // Agroengineering. - 2024. - Vol. 24. - No. 2. - Pp. 71-77.

2. Skvortsov O. B., Stashenko V. I. DYNAMIC MECHANICAL LOADS ON CONDUCTIVE ELEMENTS OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT ASSOCIATED WITH THE IMPACT OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS // BBK 22.9 M 39 Editorial board: Dr. of Phys. and Mathematics, Professor V. E. Gromov, Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor D. V. Zagulyaev. – 2023. – Vol. 13. – P. 91.

3. Gubarev V. A. MODERN METHODS OF VIBRATION CONTROL OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS // INNOVATIVE PATH OF DEVELOPMENT AS A RESPONSE TO THE CHALLENGES OF THE NEW TIME. – 2021. – P. 23-26.

4. Basenko, V. R. Creation of a computer model of a synchronous motor for the implementation of the project "Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for low-power electric transport" / V. R. Basenko, T. I. Petrov, A. R. Ibragimova // News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2024. - Vol. 26, No. 2. - P. 46-54. - DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54. - EDN NHHZGX.

5. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging stations

for electric transport / A. R. Safin, V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2023. - Vol. 25, No. 3. - P. 55-64. - DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. - EDN BJTZLX.

6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing // Engineering. - 2022. - Vol. 11. - Pp. 126-137.

7. Piven I. S. RELIABILITY ENSURING AND DEFECT DIAGNOSTICS OF HYDROPOWER EQUIPMENT: FAILURE ANALYSIS AND VIBRATION DIAGNOSTICS METHODS // Vestnik nauki. - 2025. - Vol. 4. - No. 1 (82). - P. 1215-1223.

8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. - John Wiley & Sons, 2021.

9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers // Journal of Sound and Vibration. - 2021. - Vol. 494. - P. 115883.

10. Jin X. et al. Robust vibration control for the active suspension system of an in-wheel-motor-driven electric vehicle via  $\mu$ -synthesis methodology // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. - 2022. - Vol. 144. - No. 5. - P. 051007.

11. Modeling the operation of a mobile charging station for electric vehicles to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Bulletin of Moscow State Technical University. Proceedings of Murmansk State Technical University. - 2022. - Vol. 25, No. 4. - P. 365-377. - DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. - EDN JILKEG.

12. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2022. - Vol. 190. - P. 157-167. - DOI 10.1007/978-3-030-86047-9\_17. - EDN EIGGGZ.

13. 3D Model of a Power Transformer for Studying its Technical Condition Based on Vibration Parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. - 2022. - Vol. 24, No. 3. - P. 130-143. - DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. - EDN TTLTLL.

14. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. - Cham: Springer, 2022. - P. 57

### **Authors of the publication**

**Samir F. Abdurashitov** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Vasily R. Basenko** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

**Igor V. Ivshin** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **12.11.2025 г.**

**Отредактировано** **13.01.2026 г.**

**Принято** **29.01.2026 г.**



## АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г., Клюкин И.И., Александров Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

zagretdinov.ar@kgeu.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ заключается в разработке нового подхода к обнаружению утечек трубопроводов, основанного на фрактальном анализе акустических сигналов. Предложенный подход позволяет повысить достоверность обнаружения утечек за счет упрощения интерпретации результатов измерений, исключения ошибок в принятии решения. ЦЕЛЬ. Исследовать изменения фрактальной структуры колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. МЕТОДЫ. Для анализа акустических сигналов применялись методы нормированного размаха (R/S-анализ) и детрендированного флуктуационного анализа (detrended fluctuation analysis, DFA). Проведены лабораторные и полевые эксперименты на трубах из разных материалов (полиэтилен, полипропилен, металлопластик, сталь). РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что для герметичных трубопроводов характерен высокий уровень показателя Херста акустических сигналов. Снижение этого уровня свидетельствует о возникновении утечки. С увеличением расстояния между виброакустическим датчиком и утечкой линейно возрастает показатель Херста регистрируемых сигналов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность контроля утечек трубопроводов по анализу показателя Херста акустических сигналов. При мониторинге участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки, рекомендуется устанавливать несколько датчиков. Сигнал с наименьшим значением показателя Херста будет регистрировать датчик, расположенный ближе всего к источнику утечки.

**Ключевые слова:** мониторинг утечек; акустический сигнал; показатель Херста; метод нормированного размаха; детрендированный флуктуационный анализ.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

**Для цитирования:** Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г., Клюкин И.И., Александров Р.Н. Акустический мониторинг утечек трубопроводов на основе фрактального анализа сигналов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 16-25. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-16-25.

## ACOUSTIC MONITORING OF PIPELINE LEAKS BASED ON FRACTAL ANALYSIS OF SIGNAL

Zagretdinov A.R., Ziganshin Sh.G., Klyukin I.I., Alexandrov R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

zagretdinov.ar@kgeu.ru

**Abstract:** The RELEVANCE of the present study is to develop a new approach to pipeline leak detection based on fractal analysis of acoustic signals. The proposed approach improves the reliability of leak detection by simplifying the interpretation of measurement results and eliminating errors in decision-making. OBJECT. To study changes in the fractal structure of pipeline vibrations at different distances from the leak site. METHODS. To analyze the acoustic signals, the methods of normalized range (R/S analysis) and detrended fluctuation analysis



(DFA) were used. Laboratory and field experiments were conducted on pipes made of different materials (polyethylene, polypropylene, metal-plastic, steel). **RESULTS.** It was found that sealed pipelines are characterized by a high level of the Hurst exponent of acoustic signals. A decrease in this level indicates a leak. With increasing distance between the vibroacoustic sensor and the leak, the Hurst exponent of the recorded signals increases linearly. **CONCLUSION.** Experimental studies confirm the feasibility of monitoring pipeline leaks by analyzing the Hurst exponent of acoustic signals. When monitoring a suspected leak section of a pipeline, it is recommended to install multiple sensors. The signal with the lowest Hurst exponent value will be recorded by the sensor located closest to the leak source.

**Keywords:** leak monitoring; acoustic signal; Hurst exponent; normalized range method; detrended fluctuation analysis.

**Acknowledgments:** This work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral dissertations and carry out research work.

**For citation:** Zagretdinov A.R., Ziganshin Sh.G., Klyukin I.I., Alexandrov R.N. Acoustic monitoring of pipeline leaks based on fractal analysis of signal. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 16-25. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-16-25.

### **Введение (Introduction)**

В разветвленных трубопроводных системах для раннего выявления утечек используются системы акустического мониторинга. Их принцип работы заключается в регистрации акустических волн с помощью акселерометров, размещенных на внешней стороне трубопровода. Индикатором появления утечки обычно служит изменение амплитуды информативных гармоник акустического сигнала [1,2]. Как правило, эти гармоники заранее не известны, а наличие множества спектральных составляющих усложняет анализ данных и приводит к ошибкам в принятии решения.

В современных исследованиях активно рассматривается применение искусственных нейронных сетей для акустического обнаружения утечек [3-5]. Однако такой подход имеет ряд ограничений: зависимость результатов от качества и объема обучающей выборки, сложность обучения и высокие требования к мощностям вычислительных устройств. В связи с этим задача разработки недорогого и простого метода контроля герметичности трубопроводов остается актуальной.

Теория фракталов, разработанная Бенуа Мандельбротом, является мощным инструментом для анализа, обработки и классификации данных, особенно когда речь идёт о сложных, нерегулярных и самоорганизующихся структурах. Фрактальный анализ широко используется в разных областях науки: экономике [6,7], медицине [8,9], метеорологии [10,11], физике [12,13] и др.

Акустические сигналы в трубопроводах, подобно многим природным процессам, обладают свойствами фрактального масштабирования. В статье предлагается использовать фрактальный анализ для выявления сложных закономерностей в акустических сигналах, которые могут быть связаны с утечками в трубопроводной системе.

Целью работы является исследование изменения фрактальной структуры колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. Для этого были проведены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях.

Значимость представленной работы заключается в формировании научных основ мониторинга герметичности трубопроводных сетей с применением фрактального анализа акустических сигналов. Предложенный подход позволяет повысить достоверность обнаружения утечек за счет упрощения интерпретации результатов измерений, исключения ошибок в принятии решения.

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

Фрактальный анализ временных рядов, как правило, проводится с вычислением показателя Херста  $H$ , который связан с фрактальной размерностью  $D$  следующим образом:

$$H = 2 - D. \quad (1)$$

Если  $H=0,5$  исследуемый процесс считается случайным (такое значение  $H$

соответствует броуновскому движению).  $H=0,5 \div 1$  означает персистентный процесс, который характеризуется долговременной памятью (когда последующие показатели сильно зависят от прошедших). При значениях  $H=0 \div 0,5$  процесс считается антиперсистентным, это указывает на то, что система отличается частыми, но небольшими изменениями.

В настоящей работе для оценки показателя Херста акустических сигналов применялись методы нормированного размаха (Rescaled range (R/S) analysis) и детрендированного флуктуационного анализа (detrended fluctuation analysis, DFA).

R/S-анализ разработан Г.Э. Херстом для решения задач, связанных с накоплением водных ресурсов и получил дальнейшее развитие в работах Б. Мандельброта. Идея метода состоит в том, что существует степенная зависимость вида [14]:

$$R/S \sim c \cdot \delta^H, \quad (2)$$

где  $R$  – размах вариации (под вариацией показателя понимается накопленное отклонение его от среднего значения),  $S$  – стандартное отклонение показателя,  $\delta$  – количество значений показателя в группе,  $c$  – некоторая константа.

Детрендированный флуктуационный анализ предложен Ч.-К. Пенгом и др. в статье [15], посвященной изучению организации нуклеотидов ДНК. В основе метода лежит предположение, что для самоподобных процессов имеется следующая степенная зависимость:

$$F(\delta) \sim \delta^H, \quad (3)$$

где  $F(\delta)$  – флуктуационная функция.

Блок-схемы алгоритмов R/S-анализа и DFA представлены на рисунке 1.

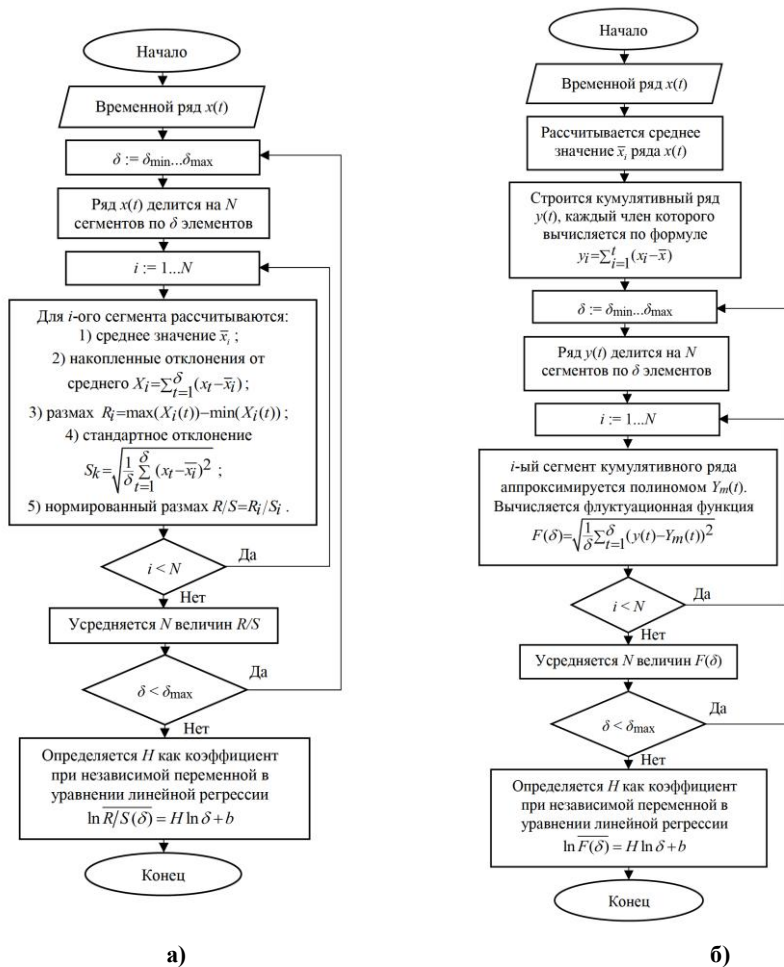


Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов: а) R/S-анализа; Fig. 1. Block diagrams of algorithms: а) R/S analysis; б) DFA

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

Степень аппроксимирующего полинома  $Y_m(t)$  определяет порядок метода DFA, например, метод DFA-1 – предполагает вычитание линейного тренда, DFA-2 – квадратичного тренда и т. д. Для анализа акустических сигналов в работе применялся

метод DFA-1. Более подробно влияние порядка аппроксимирующего полинома на результаты расчета показателя Херста акустических сигналов утечек обсуждается в статье [16].

### **Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

#### **Лабораторные исследования**

На лабораторном стенде, представляющем собой замкнутый гидравлический контур (рис. 2), были экспериментально изучены фрактальные характеристики колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. Исследования проводились на полиэтиленовой и металлопластиковой трубах с наружным диаметром 32 мм.

В ходе экспериментов моделировался дефект стенки трубы в виде круглого отверстия диаметром 5 мм. В качестве модели дефекта использовались стальной диск, представленный на рисунке 3.

Диск устанавливался на ответвлении и зажимался шаровым краном, при этом отвод воды осуществлялся через резиновый шлаг (рис. 4). В случае закрытого крана состояние трубопровода считалось бездефектным, в случае открытого – дефектным.

Колебания трубопровода регистрировались датчиком вибрационного ускорения AP-2038P-1000 (коэффициент преобразования – 1000 мВ/г, собственная частота – 35 кГц) на разном удалении от места установки диска. Сигналы записывались в память компьютера с частотой дискретизации 50 кГц.



Рис. 2. Экспериментальный стенд с полиэтиленовым трубопроводом  
*Fig. 2. Experimental stand with a polyethylene pipeline*

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



Рис. 3. Диск с отверстием диаметром 5 мм

*Fig. 3. Disk with a hole of 5 mm diameter*

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



Рис. 4. Место установки диска

*Fig. 4. Disk installation location*

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

С использованием методов R/S анализа и DFA-1 был рассчитан показатель Херста акустических сигналов. Анализируются сигналы длиной 20 тысяч отсчетов, нормированный размах  $R/S(\delta)$  и флуктуационная функция  $F(\delta)$  рассчитывались на участках сигнала длиной  $\delta=16 \div 1024$  отсчетов. Указанный диапазон охватывает характерные масштабы, на которых обычно наблюдается устойчивое степенное (скейлинговое) поведение [16-18].

На рисунках 5 и 6 представлены результаты анализа показателя Херста

акустических сигналов, полученных в ходе лабораторных экспериментов. Из рисунков видно, что для герметичных трубопроводов характерна высокая персистентность акустических сигналов ( $H \geq 1$ ). Снижение уровня персистентности сигналов (их показателя Херста) свидетельствует о возникновении утечки. При этом, чем ближе расположен датчик к утечке, тем ниже значение  $H$ . С увеличением дистанции «датчик-утечка» показатель Херста возрастает по линейному закону.

Значения  $H$  сигналов герметичного трубопровода, рассчитанные методом DFA-1, значительно превышают уровень детерминированного процесса (значительно больше единицы). Это указывает на то, что в сигналах присутствуют нестационарные изменения локального среднего [19].

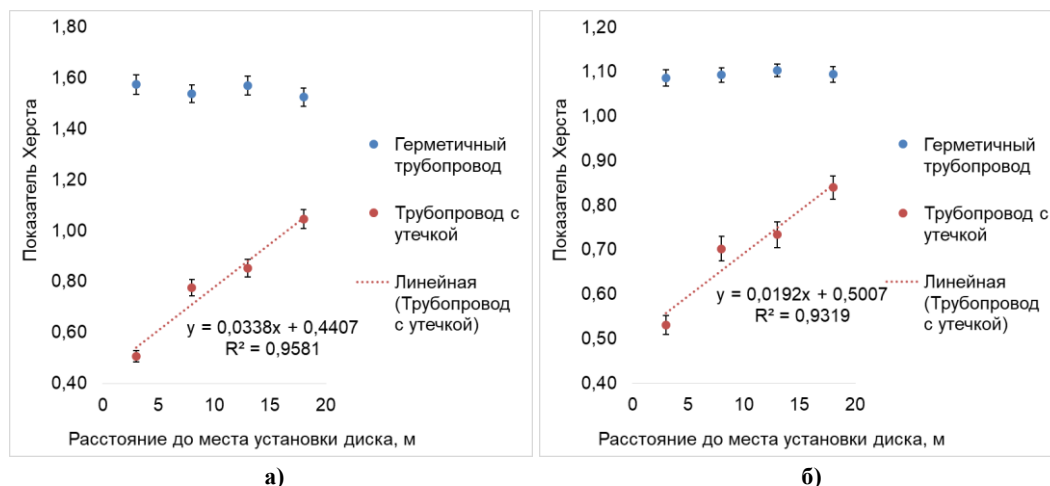


Рис. 5. Результаты анализа колебаний полиэтиленового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

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

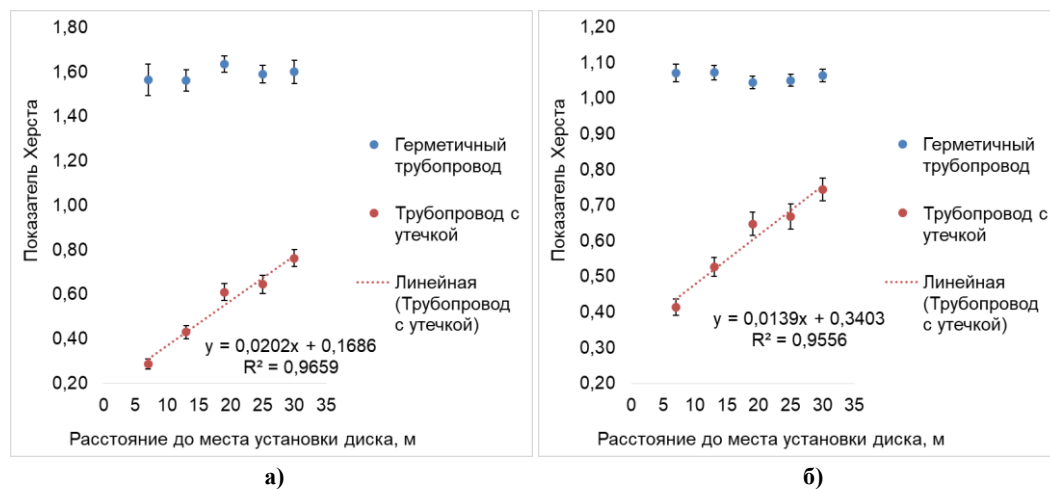


Рис. 6. Результаты анализа колебаний металлопластикового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

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

#### Полевые исследования

По описанной выше методике проведены исследования на полипропиленовом (условный диаметр  $Dy=50$  мм) и стальном ( $Dy=100$  мм) трубопроводах системы водоснабжения общественного здания. Эксперименты проводились в дневное время. Для имитации дефекта трубопровода использовался стальной диск со сквозным отверстием диаметром 5 мм. Диск устанавливался на запорном кране и зажимался резьбовым фитингом, слив воды осуществлялся через резиновый шлаг. Фотографии трубопроводов и места установки модели дефекта представлены на рисунках 7-9.





Рис. 7. Фотография места установки диска на стальном трубопроводе

Fig. 7. Photograph of the installation location of the disk on a steel pipeline

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



Рис. 8. Фотография полипропиленового трубопровода

Fig. 8. Photograph of a polypropylene pipeline

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



Рис. 9. Фотография места установки диска на полипропиленовом трубопроводе

Fig. 9. Photograph of the installation location of the disk on a polypropylene pipeline

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

На рисунках 10 и 11 представлены результаты анализа показателя Херста акустических сигналов, полученных в ходе полевых экспериментов. Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные на основании лабораторных исследований. При удалении датчика от утечки увеличивается показатель Херста. Это связано с затуханием высокочастотных составляющих сигнала. В полипропиленовом трубопроводе этот эффект затухания выражен сильнее, чем в стальном. Например, при расстоянии от датчика до места утечки 30 метров для полипропиленового трубопровода  $H=1,13$ , для стального –  $H=0,21$  (см рис. 10 а и 11 а). Результаты согласуются с опытом применения акустических корреляционных течеискателей. Как правило, частотный спектр утечки в пластиковом трубопроводе сосредоточен в диапазоне 10-20 Гц, а 90 метров – это практически предельное расстояние между датчиками накладного типа при обнаружении утечек корреляционным методом на пластиковых трубопроводах [20]. В статье [18] нами ранее было установлено, что в полосе частот 0 до 2 кГц находятся спектральные составляющие, вносящие основной вклад во фрактальную структуру акустических сигналов утечки. Акустический сигнал утечки с частотой до 2 кГц может

распространяться по стальному трубопроводу на значительно большие расстояния (до 600 м), чем по пластиковому.

Следует отметить, что расстояние, на которое распространяется сигнал утечки, зависит не только от материала трубопровода, но и от его диаметра, давления воды, размера дефекта.

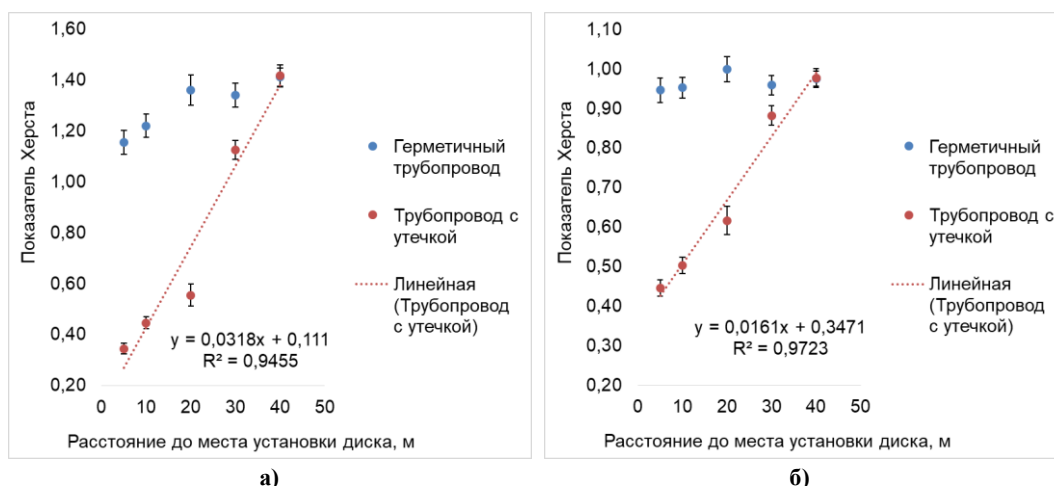


Рис. 10. Результаты анализа колебаний полипропиленового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

Fig. 10. Results of vibration analysis of polypropylene pipeline using different methods: a) DFA-1; b) R/S-analysis

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

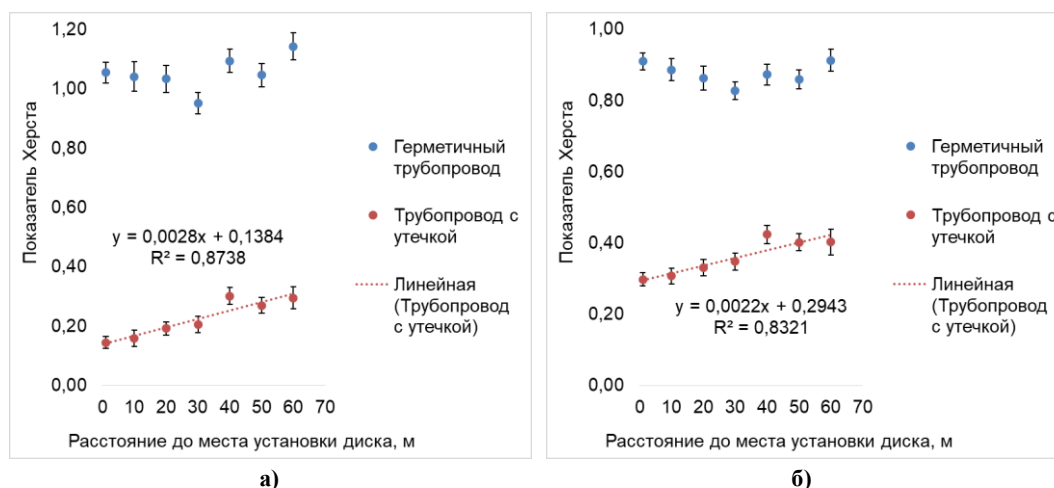


Рис. 11. Результаты анализа колебаний стального трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

Fig. 11. Results of the vibration analysis of a steel pipeline using different methods: a) DFA-1; b) R/S analysis

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

### Закключение (Conclusions)

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность контроля утечек трубопроводов по анализу показателя Херста акустических сигналов.

Установлено, что появление утечки приводит снижению показателя Херста. Это связано с возникновением в месте дефекта турбулентных пульсаций воды. Звук утечки распространяется по стальному трубопроводу на значительно большее расстояние, чем по пластиковому.

С увеличением расстояния между датчиком и утечкой линейно возрастает показатель Херста. При мониторинге участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки, рекомендуется устанавливать несколько датчиков. Сигнал с наименьшим значением показателя Херста будет регистрировать датчик, расположенный ближе всего к источнику утечки.

### Литература

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и

диагностика: справочник. – М.: Машиностроение. – 2005. – 656 с.

2. Маслов А.А. Мониторинг скрытых утечек в трубопроводах и незаконных врезок в сети // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2021. – №3. – С. 30-34.

3. Liu Y., Ma X., Li Y., Tie Y., Zhang Y., Gao J. Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks // Sensors. – 2019. – №19. – 5086. – DOI: 10.3390/s19235086.

4. Wang W., Sun H., Guo J., Lao L., Wu S., Zhang J. Experimental study on water pipeline leak using in-pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction // Measurement. – 2021. – №186. – 110094. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110094.

5. Guo G., Yu X., Liu S., Ma Z., Wu Y., Xu X., Wang X., Smith K., Wu X. Leakage detection in water distribution systems based on time–frequency convolutional neural network // Journal of water resources planning and management. – 2021. – №147. – 04020101. – DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001317.

6. Jiang Z.Q., Xie, W.J., Zhou, W.X., Sornette, D. Multifractal analysis of financial markets: a review // Reports on progress in physics. – 2019. – Т. 82. – №12. – 125901. – DOI: 10.1088/1361-6633/ab42fb.

7. Zhang W., Huang Z. Nonlinear dynamics of RMB exchange rate volatility: a multifractal perspective within the G-expectation framework // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №11. – 746. – DOI: 10.3390/fractalfract9110746.

8. Boztaş Demir G., Doğrugören R., Topsakal K.G., Duran G.S., Görgülü S. Assessment of mandibular trabecular bone structure in hypodivergent growth patterns using fractal analysis // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №8. – 517. – DOI: 10.3390/fractalfract9080517.

9. Datta D., Sathish S. Application of fractals to detect breast cancer //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1377. – №1. – 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/1377/1/012030.

10. Zhong H., Guo Y. Long-term persistence in observed temperature and precipitation series //Fractal and Fractional. – 2025. – Т. 9. – №6. – 385. – DOI: 10.3390/fractalfract9060385

11. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Фрактальный анализ метеорологических рядов с помощью метода минимального покрытия // Географический вестник. – 2019. – №2(49). – С. 67-79. – DOI 10.17072/2079-7877-2019-2-67-79.

12. Кубарев А.Ю., Закирова А.Б., Кубарев Ю.Г. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 3-4. – С. 108-115.

13. Лотфуллин Р. Ш., Кубарев А.Ю., Кубарев Ю.Г. Релаксационные свойства полидисперсных сегнетоэлектриков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 11-12. – С. 115-123.

14. Гарафутдинов Р.В. Моделирование и прогнозирование на финансовых рынках с применением фрактального анализа: монография. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – 95 с.

15. Peng C.-K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides // Physical review e. – 1994. – №49. – С. 1685-1689.

16. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of gate valve leaks through the analysis fractal characteristics of acoustic signal // Fractal and fractional. – 2024. – Т. 8. – №5. – 280. – DOI: 10.3390/fractalfract8050280.

17. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. – 2024. – Т. 8. – №4. – 213. – DOI: 10.3390/fractalfract8040213.

18. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Monitoring pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №3. – 178. – DOI 10.3390/fractalfract9030178.

19. Bashan A., Bartsch R., Kantelhardt J.W., Havlin S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis // Physica A: statistical mechanics and its applications. – 2008. – Т. 387. – №21. – С. 5080-5090. – DOI 10.1016/j.physa.2008.04.023.

20. Кошкин С.Ю. Особенности использования корреляционных теческателей для обнаружения утечек в пластиковых трубопроводах // Megatech. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №1. – С. 30-35.

#### Авторы публикации

**Загреддинов Айрат Рифкатович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная



теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. [zagretdinov.ar@kgeu.ru](mailto:zagretdinov.ar@kgeu.ru).

**Зиганшин Шамиль Гаязович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. [ziganshin.sg@kgeu.ru](mailto:ziganshin.sg@kgeu.ru).

**Клюкин Илья Игоревич** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. [klyukin.ii@kgeu.ru](mailto:klyukin.ii@kgeu.ru).

**Александров Роман Николаевич** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. [aleksandrov.rn@kgeu.ru](mailto:aleksandrov.rn@kgeu.ru).

## References

1. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Non-destructive testing and diagnostics: a handbook. - Moscow: Mashinostroyeniye. – 2005. – 656 p.
2. Maslov A.A. Monitoring hidden leaks in pipelines and illegal connections to networks // Best available technologies for water supply and sanitation. – 2021. – No. 3. – P. 30-34.
3. Liu Y., Ma X., Li Y., Tie Y., Zhang Y., Gao J. Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks // Sensors. – 2019. – No. 19. – 5086. – DOI: 10.3390/s19235086.
4. Wang W., Sun H., Guo J., Lao L., Wu S., Zhang J. Experimental study on water pipeline leak using in-pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction // Measurement. – 2021. – No. 186. – 110094. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110094.
5. Guo G., Yu X., Liu S., Ma Z., Wu Y., Xu X., Wang X., Smith K., Wu X. Leakage detection in water distribution systems based on time–frequency convolutional neural network // Journal of water resources planning and management. – 2021. – No. 147. – 04020101. – DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001317.
6. Jiang Z.Q., Xie, W.J., Zhou, W.X., Sornette, D. Multifractal analysis of financial markets: a review // Reports on progress in physics. – 2019. – Vol. 82. – No. 12. – 125901. – DOI: 10.1088/1361-6633/ab42fb.
7. Zhang W., Huang Z. Nonlinear dynamics of RMB exchange rate volatility: a multifractal perspective within the G-expectation framework // Fractal and fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 11. – 746. – DOI: 10.3390/fractalfract9110746.
8. Boztaş Demir G., Doğrugören R., Topsakal K.G., Duran G.S., Görgülü S. Assessment of mandibular trabecular bone structure in hypodivergent growth patterns using fractal analysis // Fractal and fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 8. – 517. – DOI: 10.3390/fractalfract9080517.
9. Datta D., Sathish S. Application of fractals to detect breast cancer // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1377. – No. 1. – 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/1377/1/012030.
10. Zhong H., Guo Y. Long-term persistence in observed temperature and precipitation series // Fractal and Fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 6. – 385. – DOI: 10.3390/fractalfract9060385.
11. Aptukov V.N., Mitin V.Yu. Fractal analysis of meteorological series based on the minimal covering method // Geographical Bulletin. – 2019. – No. 2 (49). – P. 67-79. – DOI: 10.17072/2079-7877-2019-2-67-79.
12. Kubarev A.Yu., Zakirova A.B., Kubarev Yu.G. Research methods of the properties of defective electrical equipment // Power engineering: research, equipment, technology. – 2018. – Vol. 20, No. 3-4. – P. 108-115.
13. Lotfullin R.Sh., Kubarev A.Yu., Kubarev Yu.G. Distributed generation plants multi-agent controlling system // Power engineering: research, equipment, technology. – 2016. – No. 11-12. – P. 115-123.
12. Garafutdinov R.V. Modeling and forecasting in financial markets using fractal analysis: monograph. – Perm: Perm state national research university, 2022. – 95 p.
13. Peng C.-K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides // Physical review e. – 1994. – No. 49. – P. 1685-1689.
14. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of gate valve leaks through the analysis of fractal characteristics of acoustic signal // Fractal and fractional. – 2024. – Vol. 8. – No. 5. – 280. – DOI: 10.3390/fractalfract8050280.
15. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. –

2024. – Vol. 8. – No. 4. – 213. – DOI: 10.3390/fractalfract8040213.

16. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Monitoring pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 3. – 178. – DOI 10.3390/fractalfract9030178.

17. Bashan A., Bartsch R., Kantelhardt J.W., Havlin S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis // Physica A: statistical mechanics and its applications. – 2008. – Vol. 387. – No. 21. – P. 5080-5090. – DOI 10.1016/j.physa.2008.04.023.

18. Koshkin S.Yu. Features of using correlation leak detectors to detect leaks in plastic pipelines // Megatech. New technologies in industrial diagnostics and safety. – 2011. – No. 1. – P. 30-35.

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

**Ayrat R. Zagretdinov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: zagretdinov.ar@kgeu.ru.

**Shamil G. Ziganshin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: ziganshin.sg@kgeu.ru.

**Ilya I. Klyukin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: klyukin.ii@kgeu.ru.

**Roman N. Alexandrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: aleksandrov.rn@kgeu.ru.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** 23.01.2026 г.

**Отредактировано** 10.03.2026 г.

**Принято** 17.03.2026 г.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК (621.315.1)

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЗАЗЕМЛЕННЫМ ГРОЗОЗАЩИТНЫМ ТРОСОМ ПУТЁМ РЕШЕНИЯ КВАДРАТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Куликов <sup>1</sup>А.Л., Федосов <sup>2</sup>Д.С., Чернеев <sup>1</sup>П.П.

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия  
paulchereeen@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Методы определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) высокого напряжения основаны на допущении резистивности сопротивления повреждения, что является некорректным по отношению к линиям, оснащенным заземленным грозозащитным тросом. При решении задачи ОМП на линиях с заземленным грозозащитным тросом следует учитывать особенности, связанные с возникновением реактивной составляющей переходного сопротивления повреждения при коротких замыканиях на землю. *ЦЕЛЬ.* Повышение точности ОМП, обеспечение устойчивости одностороннего ОМП к реактивной составляющей сопротивления повреждения. *МЕТОДЫ.* Предлагаемый алгоритм ОМП, основанный на решении системы квадратных уравнений, был исследован путем имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В проведенных модельных экспериментах предлагаемый алгоритм показывает значительное повышение точности по сравнению с существующими методами ОМП. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанный метод одностороннего ОМП по ПАР обеспечивает устойчивость к реактивной составляющей повреждения, а ошибки расчета расстояния до места повреждения не превысили 1% от длины ВЛ. Реализация метода возможна путем модернизации программного обеспечения устройств ОМП и терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА).

**Ключевые слова:** *определение места повреждения; воздушная линия электропередачи; грозозащитный трос.*

**Для цитирования:** Куликов А.Л., Федосов Д.С., Чернеев П.П. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи с заземленным грозозащитным тросом путём решения квадратных уравнений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 26-36. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36.

## FAULT-LOCATION ON HIGH-VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES WITH A GROUNDED GROUND WIRE BY SOLVING QUADRATIC EQUATION

Kulikov<sup>1</sup> A.L., Fedosov<sup>2</sup> D.S., Cherneev<sup>1</sup> P.P.

<sup>1</sup>R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University,  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia  
paulchereeen@yandex.ru

**Abstract:** *OBJECT.* High-voltage overhead power lines (HVOPL) are the most vulnerable objects in the path of electrical energy system. Damage to HVOPL is the most common cause of

disruptions in normal operation. For relay protection and automation (RPA) devices, one of the important functions is fault location (FL). Accurate fault location enables the restoration of normal operation in the shortest possible time and with minimal costs. The greatest influence on the accuracy of FL methods is exerted by random factors characterized by damage parameters. Existing one-end impedance-based fault location methods based are implemented under the assumption of resistivity of the resistance at the fault site. It is not applicable for ground faults, which are the most common type of damage on overhead transmission lines. **METHODS.** The article proposes a fault location (FL) algorithm based on solving Kirchhoff's voltage law equation for the closed loop using quadratic equations. **RESULTS.** The proposed FL algorithm was tested on the simulation models of overhead transmission lines of the Nizhny Novgorod region. In all conducted tests, the algorithm demonstrated an error of no more than 1%. **CONCLUSIONS.** The proposed one-end impedance-based fault location algorithm ensures robustness against the reactive component of the fault resistance. The high accuracy of the proposed method is confirmed by test results on simulation models. The algorithm is versatile and can be applied to both power lines with a grounded ground wire and lines without a grounded ground wire, regardless of the type of fault.

**Keywords:** fault-location; high-voltage overhead power lines; grounded ground wire.

**For citation:** Kulikov A.L., Fedosov D.S., Cherneev P.P. Fault-location on high-voltage overhead power lines with a grounded ground wire by solving quadratic equation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 26-36. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36.

### **Введение (Introduction)**

Линии электропередачи (ЛЭП) являются одними из ключевых объектов в электроэнергетических системах. Постоянный рост потребляемой электрической энергии приводит к расширению электроэнергетических систем, и, как следствие, увеличению количества ЛЭП. В то же время рынок электроэнергии требует более надежного и качественного электроснабжения, что особенно актуально при глобализации интеллектуальных и компьютерных технологий.

Высокие требования к качеству и надежности электроснабжения определяют со стороны потребителя дополнительный запрос об удержании темпов роста стоимости электрической энергии. Таким образом, для поставщика, в условиях ограниченных ресурсов и необходимости снижения затрат на передачу электроэнергии, также необходимо стремиться к обеспечению надёжности электроснабжения потребителей.

ЛЭП являются наиболее уязвимыми объектами на пути передачи электрической энергии от поставщика к потребителю. Повреждения на ЛЭП являются наиболее распространенной причиной нарушения нормального режима работы электрических сетей. Для устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), контролирующих ЛЭП, одной из важных функций является определение их места повреждения (ОМП). Точное ОМП позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными затратами восстановить нормальный режим работы электроэнергетической системы.

Наиболее распространенными причинами повреждений на воздушных ЛЭП (ВЛ) являются: грозовые перекрытия; механические повреждения линейной арматуры; загрязнение, износ и устаревание изоляции; падения деревьев на провода; перекрытие ЛЭП строительными машинами и механизмами и другие.

Неустойчивый характер повреждений, непредсказуемость причин и мест коротких замыканий (КЗ) осложняет задачу ОМП на ВЛ. В основе устройств ОМП лежат различные принципы и алгоритмы. Применение топографических методов затруднительно в связи с затратами на обход трассы ВЛ линейной бригадой; применение волновых методов затруднительно ввиду высокой стоимости устройств ОМП; применение односторонних методов по параметрам аварийного режима (ПАР) требует повышения их точности, а применение двухсторонних методов по ПАР связано с более высокими капитальными затратами.

Учитывая особенности различных методов ОМП, одним из наиболее перспективных направлений является усовершенствование односторонних методов ОМП по ПАР. Двухсторонние методы демонстрируют более высокую точность по сравнению с односторонними, но затраты на два устройства ОМП и организацию канала связи, а также потенциальные нарушения в работе, связанные с задержками в передаче информации с

противоположного конца линии или выводом в ремонт одного из двух устройств, ограничивают их применение.

Наибольшее влияние на точность методов ОМП по ПАР оказывают случайные факторы, характеризующиеся параметрами повреждения, сети и ВЛ. К таким факторам относятся: переходное сопротивление в месте повреждения, параметры системы удаленного конца (расхождение фаз ЭДС питающих систем, сопротивление систем), неоднородность линий (взаимоиндукция параллельных линий, наличие ответвлений) и другие.

Существующие методы одностороннего ОМП по ПАР реализованы с допущением о резистивности переходного сопротивления в месте повреждения. Такой подход справедлив при междуфазных КЗ без земли. Однако, указанное допущение не соблюдается на ЛЭП с заземленным грозозащитным тросом (ГТ) для однофазных и двухфазных КЗ на землю, которые являются наиболее распространенным видом повреждений.

Большая часть ВЛ высокого напряжения оборудованы ГТ с встроенным в него оптическим кабелем связи. Для таких линий регламентировано заземление ГТ на каждой опоре. Наличие заземленного грозозащитного троса на ВЛ при КЗ на землю приводит к возникновению дополнительной реактивной составляющей переходного сопротивления в месте повреждения. Это связано с активно-индуктивным сопротивлением троса, индуктивная составляющая которого определяется его удельными параметрами и геометрическим расположением относительно земли и фазных проводов. Например, при однофазных КЗ на землю ток нулевой последовательности может протекать по цепи от источника питания по земле, заземляющему устройству опоры, телу опоры и ГТ, в случае его заземления на опоре, далее к месту повреждения. Реактивная составляющая сопротивления повреждения может быть достаточно большой, и, в случае ее пренебрежения, точность метода ОМП значительно снижается.

В работе [1] отмечено снижение точности ОМП до 10% и более при применении существующих методов на ВЛ с заземленным ГТ. В работе [2] указано на снижение точности односторонних методов ОМП при однофазных КЗ на ВЛ с заземленным ГТ, в начале ЛЭП характерна погрешность в 5-7%, в середине ЛЭП – 15-20%, в конце ЛЭП – 50-60%.

Цель исследования – разработка алгоритма ОМП на ВЛ, обеспечивающего устойчивость расчета расстояния до места КЗ к реактивной составляющей сопротивления повреждения.

Научная значимость исследования заключается в усовершенствовании односторонних методов ОМП по ПАР при их применении на ВЛ с заземленным ГТ.

Практическая значимость включает разработку точного алгоритма ОМП для ВЛ с заземленным ГТ, а также формирование расчетных соотношений для реализации в составе программного обеспечения терминалов ОМП и РЗА.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Специфика одностороннего ОМП по ПАР заключается в использовании значений расчетных параметров токов и напряжений, определенных только со стороны ВЛ в месте установки устройства ОМП.

Большинство односторонних методов ОМП по ПАР основано на использовании одной из трёх величин (функций): реактивного сопротивления до места повреждения, распределения реактивной мощности вдоль линии, итерационный расчет расстояния до места повреждения по ПАР. Методы, в основе которых используются первые две величины, наиболее широко применимы в устройствах ОМП отечественных производителей.

Для формирования соотношений для расчёта расстояния до места повреждения, как правило, применяется схема замещения поврежденной линии согласно рисунку 1. Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура с передающей стороны (стороны S на рисунке 1)

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + Z_f \cdot I_f, \quad (1)$$

где  $V_{sf}$ ,  $I_{sf}$  – напряжение и ток в месте замера;  $m$  – коэффициент, характеризующий расстояние до места повреждения (лежит в интервале от 0 до 1);  $Z_{L1}$  – сопротивление линии до места повреждения;  $I_f$  – ток в месте повреждения;  $Z_f$  – переходное сопротивление в месте повреждения.

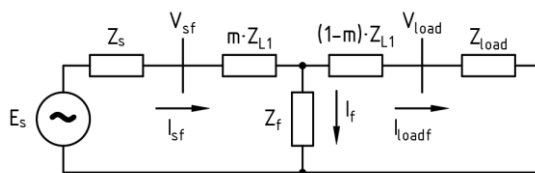


Рис. 1. Схема замещения поврежденной линии S – передающая сторона, load – нагрузка, f – повреждение

Fig. 1. Equivalent circuit of an overhead line S – sending end, load – load, f – fault

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

Уравнение (1) не может быть решено, поскольку количество неизвестных ( $m$ ,  $I_f$ ,  $\text{Re}(Z_f)$ ,  $\text{Im}(Z_f)$ ) равно четырем. Дальнейшие способы исключения неизвестных из уравнения (1) и методы его решения определяют различные алгоритмы ОМП ЛЭП по ПАР. Практически во всех существующих методах принимают, что отсутствует реактивная составляющая переходного сопротивления ( $\text{Im}(Z_f)=0$ ) в месте повреждения, что существенно упрощает решение уравнения (1).

При решении задачи ОМП ВЛ по ПАР широко применяется имитационное моделирование. Например, в работе [3] предлагается использование цифровых трансформаторов тока и напряжения, оснащенных блоком имитационного моделирования повреждений на линиях. Модель содержит в себе значения физических факторов, оказывающих влияние на точность ОМП, которые задаются по методу Монте-Карло. Расстояние до места повреждения определяется с помощью интервальной оценки.

В работе [4] предложен метод интервального определения места повреждения, основанный на многомерном подходе. Используя модель линии, сопоставляются наблюдаемые токи и напряжения в линии с токами и напряжениям в предполагаемом месте повреждения. Наблюдаемые ПАР преобразуются в комплексы токов и напряжений в потенциальных местах повреждений, затем получают комплексы основного и дополнительного замера. Место повреждения фиксируется при условии попадания отображений обоих замеров в соответствующим им области.

Метод ОМП ВЛ [5] основан на имитационном моделировании с последующим сопоставлением параметров реальных и моделируемых объектов. После проведения моделирования вычисляют ошибки между наблюдаемыми и моделируемыми токами и напряжениями. Место повреждения определяется минимальным значением ошибки между моделируемыми и реальными аварийными параметрами.

В статье [6] предложен метод ОМП, основанный на проведении моделирования и последующем сопоставлении моделируемых и аварийных параметров ВЛ путём расчета расстояния Махаланобиса. При моделировании создают базу данных о повреждениях и соответствующих ошибках методов ОМП. В случае повреждения на ЛЭП, линию разбивают на участки установленной длины, формируют корреляционную матрицу ошибок и вычисляют расстояние Махаланобиса для каждого участка. Наименьшее расстояние будет соответствовать отрезку линии, в пределах которого лежит искомое место повреждения.

К достоинствам методов ОМП, основанных на имитационном моделировании, можно отнести более высокую точность и многокритериальный подход, который позволяет учесть множественные взаимосвязи параметров линии, сети и повреждения. К недостаткам можно отнести необходимость проведения большого количества итераций моделирования для составления корректных баз данных о параметрах защищаемого объекта при различных повреждениях, а также вычислительная сложность.

Развитие современных компьютерных технологий позволяет применять интеллектуальные методы для решения задачи ОМП.

В работе [7] испытана модель искусственной нейронной сети для ОМП на ВЛ большой длины. Модель основана на анализе данных о повреждениях в некотором количестве характерных точек с помощью искусственной нейронной сети.

В [8] рассмотрено применение для ОМП ВЛ алгоритма байесовской регуляризации в искусственной нейронной сети с целью обеспечения требуемой точности. Байесовская регуляризация позволяет учесть неопределённости в результате обучения нейронной сети.

В работе [9] описан метод ОМП на основе графовых нейронных сетей. Графовая нейронная сеть позволяет определять состояние узлов энергосистемы путём создания многомерных векторов-признаков и объединять отношения смежности между узлами.



В статье [10] представлен обзор применения подходов глубокого обучения для решения задачи ОМП и диагностики ВЛ. Рассмотрены исследования при применении сверточных нейронных сетей (CNNs), рекуррентных сетей (LSTM/GRU), механизмов генеративных моделей в задаче ОМП и диагностике линий.

В статье [11] предлагается интеграция принципов доказательства идентичности (Proof of Identity, PoID) в методы локализации места повреждения. Модели идентичности связывают с повреждением посредством создания уникальных функций, характеризующих повреждение путём синтеза электрических, пространственных и временных характеристик.

Однако, применение методов искусственного интеллекта на предприятиях электрических сетей требует квалифицированного персонала, а также больших временных и вычислительных затрат. Важно, что реализация таких методов затруднительна в терминалах релейной защиты и других устройствах, включающих функцию ОМП ВЛ.

Поэтому актуальной является задача совершенствования более простых расчетных способов ОМП ВЛ, обеспечивающих требуемую точность и эффективную их реализацию в терминалах защиты и автоматики в виде компонентов специального программного обеспечения. Одно из решений такой задачи основывается на модификации расчетных соотношений для предполагаемого места повреждения ВЛ и характеризуется использованием квадратных уравнений.

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

Предлагаемый алгоритм представляет собой модернизацию метода [12]. При этом осуществляется приведение равенства (1) к форме квадратного уравнения, а также введение в расчеты величин сопротивления источника и нагрузки, исходя из замеров токов и напряжения в моменты до и после повреждения (4).

При реализации предлагаемого метода переходное сопротивление в месте повреждения принимается полным, включая активную и реактивную составляющую. Затем, выделяя действительную и мнимую части, исключим неизвестные составляющих переходного сопротивления и получим квадратное уравнение относительно расстояния до места повреждения.

В уравнении (1) заменим активное переходное сопротивление на полное переходное сопротивление в месте повреждения.

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + (R_f + jX_f) \cdot I_f, \quad (2)$$

где  $R_f = \text{Re}(Z_f)$ ,  $X_f = \text{Im}(Z_f)$ .

Уравнение (2) содержит четыре неизвестных переменных: ток в месте повреждения, активную и реактивную составляющие переходного сопротивления и коэффициент, характеризующий расстояние до места повреждения.

Ток в месте замыкания может быть выражен через токи нулевой последовательности, чисто аварийный ток и ток обратной последовательности [13], таким образом одна неизвестная будет исключена.

Ток в месте замыкания выразим через ток нулевой последовательности. Коэффициент токораспределения нулевой последовательности имеет вид:

$$d_0 = \frac{Z_{load0} + (1-m) \cdot Z_{L0}}{Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0}}, \quad (3)$$

где  $Z_{load0}$  – сопротивление нулевой последовательности нагрузки;  $Z_{L0}$  – сопротивление нулевой последовательности линии,  $Z_{S0}$  – сопротивление нулевой последовательности источника.

Расчет сопротивления нагрузки ( $Z_{load}$ ) и сопротивления источника ( $Z_s$ ) выполняется с использованием известных параметров линии, а также значений тока и напряжения до ( $I_{ps}, V_{ps}$ ) и после ( $I_{sf}, V_{sf}$ ) повреждения:

$$Z_{load} = \frac{V_{ps}}{I_{ps}} - Z_{L1}, \quad Z_s = -\frac{V_{sf} - V_{ps}}{I_{sf} - I_{ps}}. \quad (4)$$

Учитывая выражение (3) уравнение (2) принимает вид

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + Z_f \cdot I_0 \cdot \frac{Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0}}{Z_{load0} + (1-m) \cdot Z_{L0}}. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) к виду квадратного уравнения относительно переменной  $m$ .

$$m^2 - m \cdot \left( \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1 \right) + \frac{V_{sf} \cdot Z_{load0}}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}} + \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} - Z_f \cdot I_0 \cdot \frac{(Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0})}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}} = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) введем следующие коэффициенты:

$$k_4 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1, k_5 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} \cdot \left( \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1 \right), k_6 = I_0 \cdot \frac{(Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0})}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом выполним преобразования, используя коэффициент токораспределения прямой последовательности. Тогда расчетные коэффициенты примут следующий вид:

$$k_1 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1, k_2 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} \cdot \left( \frac{Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1 \right), k_6 = \frac{\Delta I_s}{I_{sf} \cdot Z_{L1}} \cdot \left( \frac{Z_{S1} + Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1 \right). \quad (8)$$

где  $\Delta I_s$  – чисто аварийный ток, определяется как разница между током аварийного режима и током нормального режима работы.

Тогда целесообразно составить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} m^2 - m \cdot k_1 + k_2 - k_3 \cdot Z_f = 0, \\ m^2 - m \cdot k_4 + k_5 - k_6 \cdot Z_f = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В таком виде система неразрешима, поскольку имеет три неизвестных при двух уравнениях. Выделим в каждом уравнении действительную и мнимую часть для получения системы из четырёх уравнений:

$$\begin{cases} m^2 - m \cdot \text{Re}(k_1) + \text{Re}(k_2) - (\text{Re}(k_3) \cdot R_f - \text{Im}(k_3) \cdot X_f) = 0, \\ -m \cdot \text{Im}(k_1) + \text{Im}(k_2) - (\text{Re}(k_3) \cdot X_f + \text{Im}(k_3) \cdot R_f) = 0, \\ m^2 - m \cdot \text{Re}(k_4) + \text{Re}(k_5) - (\text{Re}(k_6) \cdot R_f - \text{Im}(k_6) \cdot X_f) = 0, \\ -m \cdot \text{Im}(k_4) + \text{Im}(k_5) - (\text{Re}(k_6) \cdot X_f + \text{Im}(k_6) \cdot R_f) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Выразим переменную  $X_f$  из второго и четвертого равенств системы. Подставим в первое и третье равенство системы, таким образом получим систему с двумя уравнениями. Данные уравнения приводим к виду квадратных посредством ввода коэффициентов

$$a_1 \cdot m^2 + b_1 \cdot m + c_1 + d_1 \cdot R_f = 0, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \text{Re}(k_3), \quad b_1 = -(\text{Re}(k_1) \cdot \text{Re}(k_3) + \text{Im}(k_1) \cdot \text{Im}(k_3)), \\ c_1 &= \text{Im}(k_2) \cdot \text{Im}(k_3) + \text{Re}(k_2) \cdot \text{Re}(k_3), \quad d_1 = -((\text{Re}(k_3))^2 + (\text{Im}(k_3))^2). \end{aligned} \quad (12)$$

и

$$a_2 \cdot m^2 + b_2 \cdot m + c_2 + d_2 \cdot R_f = 0, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= \text{Re}(k_6), \quad b_2 = -(\text{Re}(k_4) \cdot \text{Re}(k_6) + \text{Im}(k_4) \cdot \text{Im}(k_6)), \\ c_2 &= \text{Im}(k_5) \cdot \text{Im}(k_6) + \text{Re}(k_5) \cdot \text{Re}(k_6), \quad d_2 = -((\text{Re}(k_6))^2 + (\text{Im}(k_6))^2). \end{aligned} \quad (14)$$

Для решения системы из двух уравнений исключаем переменную  $R_f$  путем вычитания одного уравнения из другого

$$a \cdot m^2 + b \cdot m + c = 0, \quad (15)$$

где

$$a = d_2 \cdot a_1 - d_1 \cdot a_2, \quad b = d_2 \cdot b_1 - d_1 \cdot b_2, \quad c = d_2 \cdot c_1 - d_1 \cdot c_2. \quad (16)$$

Находим корни уравнения (15). Из полученных корней выбираем только один корень уравнения, лежащий на отрезке от 0 до 1, а расстояние до места повреждения определяем по формуле:

$$L_k = m \cdot L, \quad (17)$$

где  $L$  – длина ЛЭП.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма ОМП и определены основные операции:

1. Определение и ввод исходных параметров сети и линии: длина; полные продольные сопротивления прямой и нулевой последовательности.
2. Регистрация аварийной осциллограммы. Запись параметров аварийного режима.
3. Расчет сопротивления нагрузки и сопротивления питающей системы.
4. Реализация алгоритма ОМП:
  - Расчет коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  по формулам из уравнений (7) и (8).
  - Расчет коэффициентов по формулам (12), (14) и (16).
  - Решение квадратного уравнения (15).
  - Выбор корня, исходя из условия:  $0 < m < 1$ .
  - Расчет расстояния до места повреждения по формуле (17).
5. Вывод полученного расстояния до места повреждения.

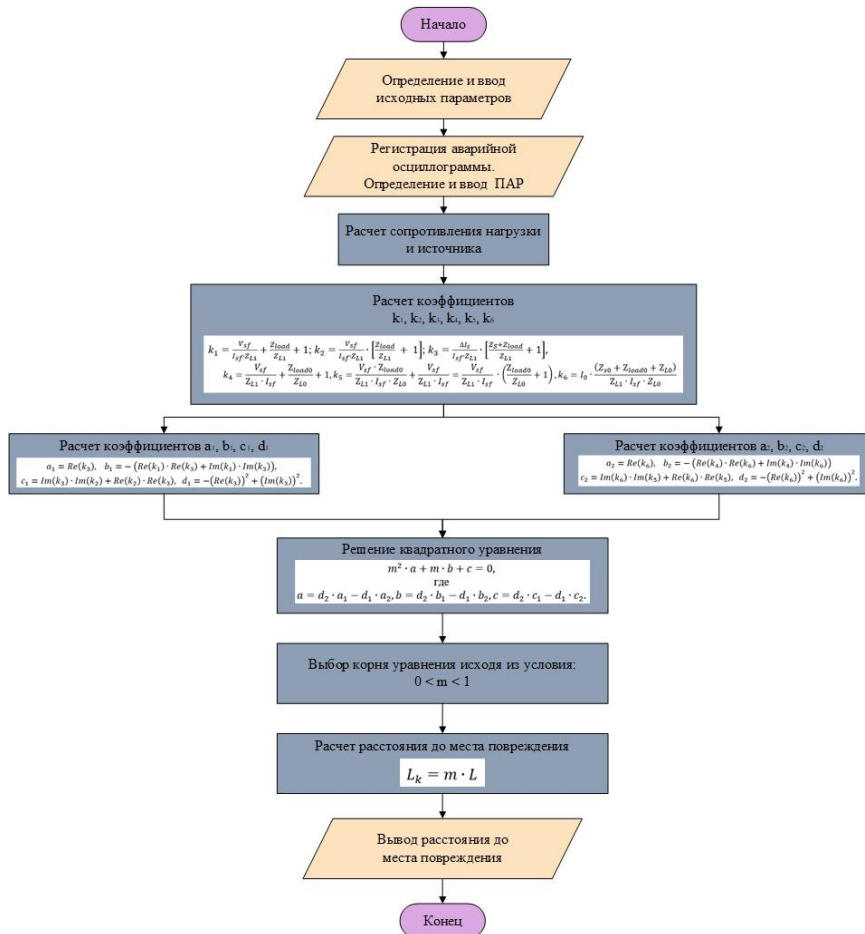


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Fig. 2. Flowchart of the algorithm

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

### Результаты (Results)

Для оценки эффективности предлагаемого метода разработана модель одноцепной тупиковой ВЛ с ГТ в программной комплексе MATLAB/Simulink. Имитационная модель линии с заземленным ГТ приведена на рисунке 3.

Линия представлена четырехпроводной, учитывая три фазных провода и грозотрос. В начале и конце линии грозотрос заземлен наглухо, на промежуточных участках грозотрос заземлен через искровой промежуток.

Для испытаний на модели разработан скрипт-файл, выполняющий расчеты ОМП различными методами.

В качестве примера рассмотрим ряд однофазных КЗ, выполненных на модели линии со следующими параметрами: длина ЛЭП – 100 км. Напряжение линии – 110 кВ. Марка провода – АС 150/24. Марка грозозащитного троса – С70. В месте КЗ искровой промежуток пробит. Активная составляющая сопротивления повреждения изменялась в диапазоне от 10 Ом до 14 Ом, реактивная составляющая изменялась в диапазоне от 1 Ом до 4 Ом, в зависимости от места повреждения.

Результаты расчета расстояния до места повреждения по различным алгоритмам сведены в таблицу 1.

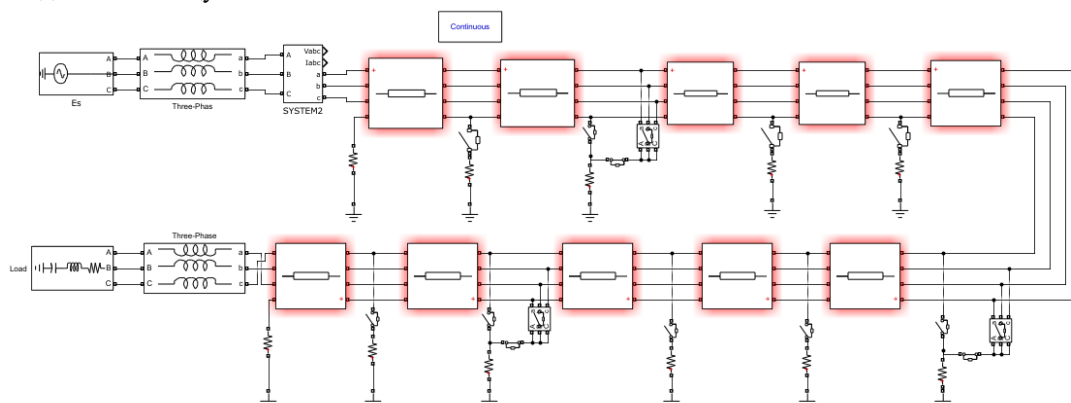


Рис. 3. Имитационная модель ВЛ

Fig. 3. The simulation model

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

Результаты расчета расстояния до места повреждения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты ОМП моделируемой ВЛ  
WMD results of the simulated overhead line

| Расстояние до места повреждения, км | Относительная погрешность метода ОМП, % |                        |                        |                     |                    |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
|                                     | L-метр [14]                             | Метод Wiszniewski [15] | Метод Аржанникова [13] | Метод Висящева [14] | Предлагаемый метод |
| 10                                  | 2,97                                    | 0,93                   | 1,28                   | 3,85                | 0,01               |
| 20                                  | 3,74                                    | 1,57                   | 1,78                   | 4,72                | 0,01               |
| 30                                  | 4,76                                    | 2,45                   | 2,48                   | 5,85                | 0,01               |
| 40                                  | 6,15                                    | 3,69                   | 3,51                   | 7,35                | 0,01               |
| 50                                  | 8,07                                    | 5,49                   | 5,05                   | 9,35                | 0,01               |
| 60                                  | 10,78                                   | 8,16                   | 7,46                   | 12,07               | 0,03               |
| 70                                  | 14,65                                   | 12,16                  | 11,34                  | 15,81               | 0,06               |
| 80                                  | 20,17                                   | 18,18                  | 17,67                  | 20,94               | 0,13               |
| 90                                  | 27,74                                   | 26,77                  | 27,44                  | 27,83               | 0,22               |

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

Согласно таблице 1, предложенный алгоритм демонстрирует значительное повышение точности ОМП ВЛ. Максимальная абсолютная ошибка составила 220 м (или 0,22 % от длины ВЛ), что характеризует высокую точность метода. Существующие методы одностороннего ОМП имеют тенденцию к увеличению погрешности при удалении места повреждения от места установки устройства ОМП. Напротив, разработанный метод ОМП ВЛ на основе квадратных уравнений обеспечивает высокую точность расчетов на всем протяжении линии. Во всех проведенных имитационных экспериментах алгоритму была свойственна погрешность ОМП не более 1% от длины ВЛ. Высокая точность предлагаемого метода продемонстрирована в условиях имитационного моделирования, где не учитываются погрешности измерений. В реальных условиях погрешность будет выше за счет ошибок, вносимых измерительными устройствами.

#### Обсуждение (Discussion)

Результаты имитационных экспериментов подтверждают большие ошибки существующих методов ОМП ВЛ по ПАР в сравнении с разработанным алгоритмом. В случае повреждений, расположенных ближе к противоположному концу ВЛ от места установки устройства ОМП, для существующих методов ОМП характерно значительное увеличение ошибок, достигающих до половины длины ВЛ. Предложенный алгоритм ОМП сохраняет высокие показатели точности при повреждениях по всей длине линии.

При разработке новых алгоритмов ОМП по ПАР следует придерживаться следующих принципов:

- алгоритм должен быть устойчив к влиянию случайных факторов, определяющих точность ОМП;

- зона обхода должна быть достаточно большой, чтобы фактическое место повреждения действительно располагалось внутри зоны обхода; в том же время зона обхода должна быть достаточно малой, чтобы минимизировать затраты на поиск и устранение повреждения;

- необходимо стремиться к наименьшим вычислительным затратам на реализацию алгоритма, при этом обеспечивая устойчивость и точность метода.

#### **Заключение (Conclusions)**

Актуальность задачи повышения точности алгоритмов ОМП на линиях электропередачи связана с отсутствием алгоритмов, обеспечивающих устойчивость к влиянию случайных факторов, в частности, к влиянию реактивной составляющей повреждения. Применение таких алгоритмов на ВЛ с заземленным грозотросом приводит к существенным погрешностям, и как следствие, к большим временным и экономическим затратам на устранение аварии.

Предлагаемый алгоритм одностороннего ОМП по ПАР обеспечивает устойчивость к реактивной составляющей сопротивления повреждения. Высокая точность предлагаемого метода подтверждается результатами испытаний.

Разработанный алгоритм является универсальным и может быть применим как на ВЛ с заземленным грозотросом, так и на линиях без заземленного грозотроса.

Реализация нового метода возможна путём модернизации программного обеспечения терминалов ОМП и РЗА без необходимости внесения изменений в аппаратную часть.

#### **Литература**

1. Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Федосов Д.С. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2 С. 78–89. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_78.

2. Чернеев П. П., Куликов А. Л. Особенности определения места повреждения линий электропередачи с заземленным грозозащитным тросом // Конференция «Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»; 22-24 апреля 2025 г., Чебоксары: изд-во ЧГУ, 2025. С. 13-16.

3. Шарыгин Д. С., Филатова Г. А., Яблоков А. А. Способ определения места повреждения и зоны обхода на воздушной линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2850379. 11.11.2025. Бюл. №32. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1\\_20251111?q=&from=search\\_simple&hash=-754904597](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1_20251111?q=&from=search_simple&hash=-754904597). Ссылка активна на 30 января 2026.

4. Лямец Ю. Я., Мартынов М. В., Воронов П. И. и др. Способ интервального определения места повреждения линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2639718. 22.12.2017. Бюл. №36. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1\\_20171222?q=&from=search\\_simple&hash=-297927110](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1_20171222?q=&from=search_simple&hash=-297927110). Ссылка активна на 30 января 2026.

5. Мартынов М. В. Способ интервального определения места повреждения линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2720949. 15.05.2020. Бюл. №14. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1\\_20200515?q=&from=search\\_simple&hash=488670835](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1_20200515?q=&from=search_simple&hash=488670835). Ссылка активна на 30 января 2026.

6. Чернеев П. П., Куликов А. Л., Федосов Д. С. Повышение точности определения места повреждения на воздушной линии электропередачи с заземленным грозозащитным тросом // Релейщик. 2025. №2(52). С. 8-13.

7. F. Alpsalaz, Z. Yalçinöz, A. Kaygusuz, et al. Fault Location Prediction in Power Transmission Lines Using an Artificial Neural Network Model // 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP). 2024. pp. 1-6.

8. A. A. K. Majhi, S. Mohanty. Fault Localization in DG-Integrated Radial Distribution Network Using ANN-Enhanced Impedance Method // IEEE 5th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). 2025. pp. 1-6.

9. Z. Guo, Z. Song, T. Xu et al. Research on power system topology identification and fault location based on graph neural network // IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE). 2025. pp. 1602-1607.

10. M. Kouraichi, M. Mansouri, M. Trabelsi. Deep Learning for Fault Diagnosis in Power Transmission Lines: Current Trends, Limitations, and Future Directions // IEEE Access. 2025. Vol. 13. pp. 192105-192142.

11. B. A. Wokoma, O. E. Ojuka, O. J. Effiong. An Investigation on Fault Localization in Power Transmission Lines using Anomaly Detection and Proof-of-Identity Model // IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2025. pp. 1-6.
12. Novosel D., Hart D., Yi Hu et al. System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads. Patent USA №5839093. 17.11.1998. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5839093A/en>. Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).
13. Аржанников Е. А., Лукоянов В. Ю., Мисриханов М. Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
14. Висящев А. Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2001. 146 с.
15. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer; 2010.

#### Авторы публикации

**Куликов Александр Леонидович** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского Государственного Технического Университета имени Р. Е. Алексеева. Email: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru).

**Федосов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрических станций, сетей и систем» Иркутского национального исследовательского технического университета. Email: [fedosov\\_ds@istu.edu](mailto:fedosov_ds@istu.edu).

**Чернеев Павел Павлович** – аспирант Нижегородского Государственного Технического Университета имени Р. Е. Алексеева. Email: [paulchereen@yandex.ru](mailto:paulchereen@yandex.ru).

#### References

1. Visyashchev A.N., Plenkov E.R., Fedosov D.S. Evaluation of value and type of fault impedance on high voltage overhead transmission lines // *Smart Electrical Engineering*. 2023; 2:78–89. (In Russ). doi: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_78.
2. Cherneev P. P., Kulikov A. L. Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi s zazemlennym grozozashchitnym trosom. In: Konferentsiya “*Sovremennye tendentsii razvitiya tsifrovyykh sistem releinoi zashchity i avtomatiki*”; 22-24 Apr 2025; *Cheboksary, Russia*. 2025. pp. 13-16 (In Russ).
3. Sharygin D. S., Filatova G. A., Yablokov A. A. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya i zony obkhoda na vozduшной linii elektroperedachi*. Patent RUS №2850379. 11.11.2025. Byul. №32. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1\\_20251111?q=&from=search\\_simple&hash=-754904597](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1_20251111?q=&from=search_simple&hash=-754904597). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).
4. Lyamets Yu. Ya., Martynov M. V., Voronov P. I. et al. *Sposob interval'nogo opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi*. Patent RUS №2639718. 22.12.2017. Byul. №36. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1\\_20171222?q=&from=search\\_simple&hash=-297927110](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1_20171222?q=&from=search_simple&hash=-297927110). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).
5. Martynov M. V. *Sposob interval'nogo opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi*. Patent RUS №2720949. 15.05.2020. Byul. №14. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1\\_20200515?q=&from=search\\_simple&hash=488670835](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1_20200515?q=&from=search_simple&hash=488670835). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).
6. Cherneev P. P., Kulikov A. L., Fedosov D. S. Povyshenie tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na vozduшной linii elektroperedachi s zazemlennym grozozashchitnym trosom. *Releishchik*. 2025; 2(52):8-13. (In Russ).
7. F. Alpsalaz, Z. Yalçınöz, A. Kaygusuz, et al. Fault Location Prediction in Power Transmission Lines Using an Artificial Neural Network Model // 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Malatya, Turkiye, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IDAP64064.2024.10710637.
8. A. A. K. Majhi, S. Mohanty. Fault Localization in DG-Integrated Radial Distribution Network Using ANN-Enhanced Impedance Method // *IEEE 5th International Conference on*

*Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Jaipur, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEFET65155.2025.11255285.

9. Z. Guo; Z. Song; T. Xu et al. Research on power system topology identification and fault location based on graph neural network // *IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE)*, Jinzhou, China, 2025, pp. 1602-1607, doi: 10.1109/ICSECE65727.2025.11256901.

10. M. Kouraichi, M. Mansouri, M. Trabelsi. Deep Learning for Fault Diagnosis in Power Transmission Lines: Current Trends, Limitations, and Future Directions // *IEEE Access*. 2025; 13:192105-192142. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3628908.

11. B. A. Wokoma, O. E. Ojuka, O. J. Effiong. An Investigation on Fault Localization in Power Transmission Lines using Anomaly Detection and Proof-of-Identity Model // *IEEE PES/IAS PowerAfrica*. 2025. pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerAfrica65840.2025.11289185.

12. Novosel D., Hart D., Yi Hu et al. *System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads*. Patent USA №5839093. 17.11.1998. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5839093A/en>. Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

13. Arzhannikov E. A., Lukoyanov V. Yu., Misrikhanov M. Sh. *Opređenje mesta korotkogo замыкания na vysokovol'tnykh liniyakh elektroperedachi*. Moscow: Energoatomizdat; 2003. (In Russ).

14. Visyashchev A. N. *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi*. Irkutsk: INRTU; 2001. (In Russ).

15. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London: Springer; 2010.

#### Authors of the publication

**Aleksandr L. Kulikov** - professor of the chair "Electric power engineering, power supply and power electronics" R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University Nizhny Novgorod, Russia. Email: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru).

**Denis S. Fedosov** - head of the department "Electrical Stations, Grids and Systems" Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: [fedosov\\_ds@istu.edu](mailto:fedosov_ds@istu.edu).

**Pavel P. Cherneev** - postgraduate student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: [paulchereen@yandex.ru](mailto:paulchereen@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 19.02.2026 г.

**Отредактировано** 07.04.2026 г.

**Принято** 14.04.2026 г.





## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Петрова <sup>1</sup>Р.М., Грачева <sup>2</sup>Е.И.

<sup>1,2</sup> Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>1</sup> [1998renata@mail.ru](mailto:1998renata@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

<sup>2</sup> [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке компьютерной модели оценки и прогнозирования параметров надежности схем систем электроснабжения объектов с трансформаторными подстанциями напряжением 10/0,4 кВ. МЕТОДЫ. При проведении исследований используются методы теории надежности и теории вероятностей. Проведено моделирование параметров схем электроснабжения в среде Matlab / Simulink для исследования основных показателей надежности (таких, как параметр потока отказов схемы ( $\omega_{\text{схемы}}$ ), время наработки на отказ ( $T_{\text{нар.отк}}$ ), вероятность безотказной работы ( $P$ ) и вероятность отказа ( $Q$ ). Проведено 12 вычислительных экспериментов с изменением исходных параметров для схем различной конфигурации. РЕЗУЛЬТАТЫ. Представлены результаты вычислительных экспериментов с помощью разработанной модели в среде Matlab/Simulink для оценки параметров надежности схем электроснабжения –  $\omega_{\text{схемы}}$ ,  $T_{\text{нар.отк}}$ ,  $P$  и  $Q$  при изменении исходных данных. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В работе представлены результаты моделирования в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем электроснабжения. Применение разработанной модели при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения объектов позволяет оценивать параметры надежности схем и управлять надежностью электроснабжения потребителей при эффективной работе электрооборудования.

**Ключевые слова:** схема электроснабжения; резервирование; надежность; моделирование; трансформатор; кабельная линия.

**Для цитирования:** Петрова Р.М., Грачева Е.И. Моделирование параметров надежности схем электроснабжения объектов в среде Matlab/Simulink // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 37-48. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-37-48.

## MODELING OF RELIABILITY PARAMETERS OF ELECTRICAL POWER SUPPLY CIRCUITS OF FACILITIES IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

Petrova <sup>1</sup>R.M., Gracheva <sup>2</sup>E.I.

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> [1998renata@mail.ru](mailto:1998renata@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

<sup>2</sup> [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Abstract:** The RELEVANCE of this study is to develop a computer model for assessing and predicting the reliability parameters of power supply system circuits for facilities with 10/0.4 kV transformer substations. METHODS: Reliability theory and probability theory methods were used in the research. The parameters of power supply circuits were modeled in Matlab/Simulink to study key reliability indicators (such as the circuit failure rate parameter ( $\omega_{\text{circuit}}$ ), mean time between failures (MTBF), probability of failure-free operation ( $P$ ), and probability of failure ( $Q$ ). Twelve computational experiments were conducted with varying initial parameters for circuits of various configurations. RESULTS. The results of computational experiments using the developed model in Matlab/Simulink are presented. They were used to estimate the reliability parameters of power supply circuits –  $\omega_{\text{circuit}}$ , TBF,  $P$ , and  $Q$  – with varying initial data. CONCLUSION. The paper presents the results of modeling in Matlab/Simulink. The obtained results can be recommended for use in the design of power supply systems. Application

of the developed model in the design and operation of power supply systems at facilities allows for the assessment of circuit reliability parameters and the management of the reliability of power supply to consumers while ensuring the efficient operation of electrical equipment.

**Keywords:** power supply diagram, redundancy, reliability, modeling, transformer, cable line.

**For citation:** Petrova R.M., Gracheva E.I. Modeling of reliability parameters of electrical power supply circuits of facilities in the Matlab/Simulink environment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 37-48. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-37-48.

### **Введение (Introduction)**

Современные системы электроснабжения промышленных предприятий, объектов городской и агропромышленной инфраструктуры являются составными частями сложных электротехнических комплексов. Их бесперебойная и качественная работа является основным фактором экономической и технологической безопасности. Поэтому точная оценка показателей надежности таких систем является важным условием как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации.

Классические методы оценки надежности, основанные на анализе структурных схем, составлении систем дифференциальных уравнений Маркова или методе статистических испытаний (Монте-Карло), обладают рядом существенных ограничений. Аналитические методы при всей своей строгости становятся чрезвычайно громоздкими для сложных разветвленных схем с восстановлением, требуя значительных упрощающих допущений. Прямая реализация метода Монте-Карло при помощи универсальных языков программирования, в свою очередь, часто лишена наглядности и требует больших вычислительных ресурсов для достижения приемлемой точности, особенно для анализа редких событий, а именно, отказов электрооборудования.

Особую сложность представляет задача исследования чувствительности показателей надежности к изменению технических параметров элементов системы. К таким параметрам относятся: интенсивность отказов оборудования схемы ( $\lambda$ ), время наработки на отказ ( $T_{\text{нар.отк}}$ ), вероятности безотказной работы и появления отказа ( $P$  и  $Q$ ), длительность технического обслуживания и плановых ремонтов, уровень нагрузки на оборудование, параметры резервирования. Традиционные методы требуют проведения множества трудоемких расчетов при огромном количестве различных значений входных данных, что является трудоемким процессом.

Развитие инженерного моделирования открывает новые возможности для решения указанных задач. *Matlab / Simulink* является одним из инструментов для решения научных и инженерных задач, который позволяет использовать технический вычислительный потенциал для построения алгоритмов расчета параметров сложных взаимосвязанных систем. При этом преимуществами для расчета параметров надежности являются:

- блочно-иерархический принцип построения моделей,
- генератор случайных чисел для имитации отказов,
- встроенные библиотеки для анализа данных и визуализации результатов,
- возможность создания интерактивных интерфейсов для исследования влияния параметров.

**Целью настоящего исследования** является разработка методики и создание модели в среде *Matlab/Simulink* для комплексной оценки параметров надежности схем электроснабжения и анализа их изменения при вариациях технико-эксплуатационных характеристик элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) Провести анализ литературных источников результатов исследований в данной области;
- 2) Провести анализ типовых схем электроснабжения с использованием различных видов резервирования;
- 3) Разработать алгоритм выполнения расчетов для исследуемых систем электроснабжения;
- 4) Разработать в программной среде *Matlab / Simulink* алгоритмы расчета следующих показателей надежности: параметров потоков отказов схемы  $\omega_{\text{схемы}}$ , а также  $T_{\text{нар.отк}}$ ,  $P$  и  $Q$ ;
- 5) Провести вычислительные эксперименты на примере типовых схем для оценки достоверности разработанной модели.

**Научная новизна работы** заключается в применении приложения *Simulink* для моделирования параметров надежности схем электроснабжения с различными видами резервирования, что позволяет наглядно представить характеристики схемы, выбрать оптимальное число трансформаторов и их номинальную мощность, коэффициент загрузки трансформатора, общую площадь исследуемого объекта.

**Практическая значимость** состоит в разработке универсальной модели расчета параметров надежности схем электроснабжения, позволяющей инженерам-проектировщикам и исследователям проводить быстрый анализ и оптимизацию схемных и режимных параметров проектируемых и эксплуатируемых систем электроснабжения при вариации исходных данных.

В представленном обзоре проведен анализ некоторых исследований российских и зарубежных ученых, посвященных оценке параметров надежности систем электроснабжения, а также моделированию в программной среде *Matlab / Simulink*.

Как известно, надежность электроснабжения потребителей зависит от надежности всех элементов системы электроснабжения, в том числе устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Виноградов А.В., Лансберг А.А. и др. [1] определили численные значения следующих показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики: потока отказов и частоту излишних срабатываний.

Герасимовым Д.О. и Суловым К.В. в [2] предложен подход, объединяющий методы моделирования надежности мультиэнергетических систем, который апробирован на имитационной модели энергетического объекта.

Ибрагим М., Пантелеев В. И. в [3] разработали модели систем управления для повышения стабилизации частоты сети переменного тока в программной среде *Matlab*.

Моденов М.Ю., Чуканов А.Н., Цой Е.В. в [4] разработали математическую модель летательного аппарата, апробированную в программном комплексе *Matlab* с помощью дополнения *Simulink* с учетом различных условий эксплуатации.

Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. в [5] исследовали параметры надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов (НКА), устанавливаемых в низковольтных электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий. Результаты исследования рекомендованы для построения модели для определения основных параметров надежности цеховой сети электроснабжения.

Петровой Р. М., Грачевой Е. И. в работе [6] выявлены законы изменения вероятностных характеристик надежности коммутационных аппаратов и кабельных линий низкого напряжения.

Петрова Р.М. и др. [7] и Петрова Р.М., Грачева Е.И. [8] провели оценку параметров надежности схем с трансформаторными подстанциями, определив преимущества рационального резервирования, где время наработки на отказ достигло 4,2 года для схемы с двойным резервированием.

В работе Романенко Н.Г., Головки Ю.А. и др. [9] смоделирована система управления насосом охлаждения главного дизеля в среде *Matlab / Simulink*.

Саттаровым Р.Р. и Гарафутдиновым Р.Р. в [10] предлагается алгоритм моделирования виртуального синхронного генератора для повышения динамической устойчивости энергосистемы. Предложен способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе *Matlab*. С помощью разработанной модели возможно управлять устойчивостью системы с обеспечением условий поддержания параметров электрической сети в допустимых пределах.

Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. и др. в [11] исследовали возможность повышения эффективности работы низковольтных коммутационных аппаратов с помощью тепловизионного обследования.

В исследовании N. Bhuvaneshwary, V. J. Reddy и др. [12] представлена модель обнаружения неисправностей электрической системы и мониторинга с помощью *Matlab / Simulink*. Модель эффективно идентифицирует различные неисправности электрической системы, такие как короткое замыкание (КЗ), неисправности линии и трехфазные замыкания.

В работе W. Guo, Y. He и X. Ling [13] рассматриваются вопросы проектирования и моделирования интеллектуальных систем транспортных средств с использованием *Matlab / Simulink*. В исследовании используется *Simulink* для системного моделирования и функции *Matlab* для реализации алгоритмов управления интеллектуальной системой, создания интегрированной основы для тестирования и проверки работоспособности системы.

Р. М. Petrova, Е. I. Gracheva и др. в [14] представили исследование и оценку параметров надежности и выбора рациональной топологии схем электроснабжения

объектов с трансформаторными подстанциями 10/0,4 кВ с помощью технических и экономических критериев. Авторы представили разработанную методику выбора способа резервирования схем электроснабжения с учетом затрат на оборудование схемы и параметров надежности электроустановок.

Y. Li, T. Chen и др. в [15] показывают систему моделирования надежности, предназначенную для эффективного управления неиспользованными ресурсами хранения энергии базовых электростанций.

В работе Q. Yu и др. [16] представлен усовершенствованный алгоритм расчета для улучшения производительности системы с механизмом мгновенного автоматического распознавания аварийных ситуаций в энергосети с помощью онлайн-управления, что повышает быстродействие системы и надежность электроснабжения в целом.

Работа Е.А. Рапова и А.Т. Nasibullin [17] посвящена разработке математических моделей основных релейных защитных устройств, интегрированных в схему узловой подстанции 220/110 кВ с использованием среды моделирования *Matlab / Simulink* и *Stateflow* (для описания логики работы защит). Применение математической модели повышает точность расчета параметров системы электропитания в различных режимах работы и позволяет использовать одну модель для решения совокупности задач. Основным преимуществом модели является блочная структура построения, что позволяет легко изменять заданные параметры и сборку конфигурации схемы.

Работа V. A. Paseka [18] посвящена сравнительному анализу методов расчета установившихся режимов и моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах с использованием программных комплексов *Matlab / Simulink* и *RUSTAB* и *MUSTANG*.

Таким образом, представленный анализ литературных источников отечественных и зарубежных авторов показывает развитие методов оценки и способов повышения надежности электрических систем, а также использование программной среды *Matlab / Simulink* для моделирования.

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

На рисунке 1 приведена схема части системы электроснабжения с двойным резервированием: на 10 и 0,4 кВ.

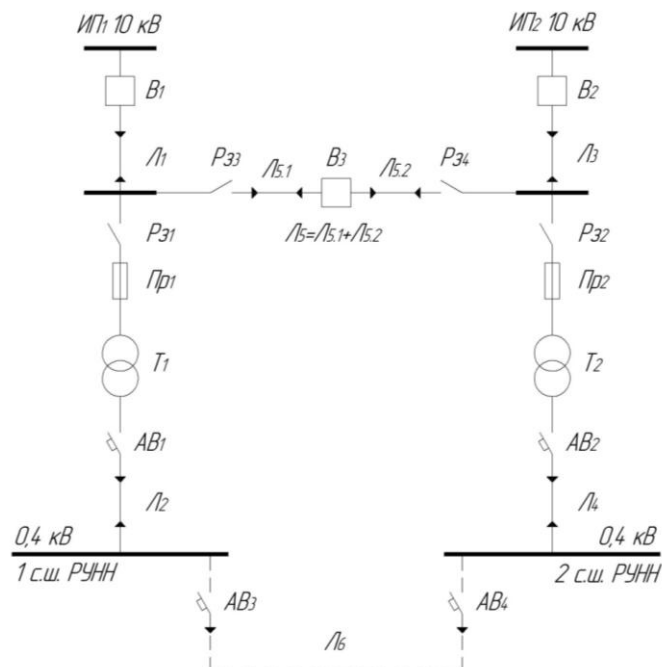


Рис. 1. Схема части системы электроснабжения с двойным резервированием  
Fig. 1. Diagram of a part of the power supply system with double redundancy

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

На рисунке 1 показан участок системы электроснабжения с двойным резервированием на среднем и низком напряжениях (СН и НН соответственно). Данная схема (рис. 1) по своей структуре является петлевой [7]. В петлевой схеме электропитание

подаются по кабельным линиям (КЛ), образующим замкнутый контур [8]. Данная топология обеспечивает наличие резервных путей передачи электроэнергии между источниками питания (ИП<sub>1</sub> и ИП<sub>2</sub>) и потребителями, что способствует повышению надежности и устойчивости системы при аварийных ситуациях, повреждениях или отключениях отдельных участков сети. Использование петлевых схем позволяет реализовать режимы автоматического переключения и резервирования [8].

### Обсуждение (Discussions)

На рис. 2 представлено графическое описание блок-схемы алгоритма расчетов для петлевой схемы электроснабжения.

Блок-схема расчетов (рис. 2) включает: Блок 1 (Начало) → Блок 2 (Ввод исходных данных) → Блок 3 (Расчеты по формулам (1)-(8) → Блок 4 (Условный переход для петлевой схемы электроснабжения) → Блок 5 (Расчет по формулам (9)-(10) → Блок 6 (Расчет по формулам (11)-(15) → Блок 7 (Вывод данных по формулам (12)-(15) → Блок 8 (Конец).

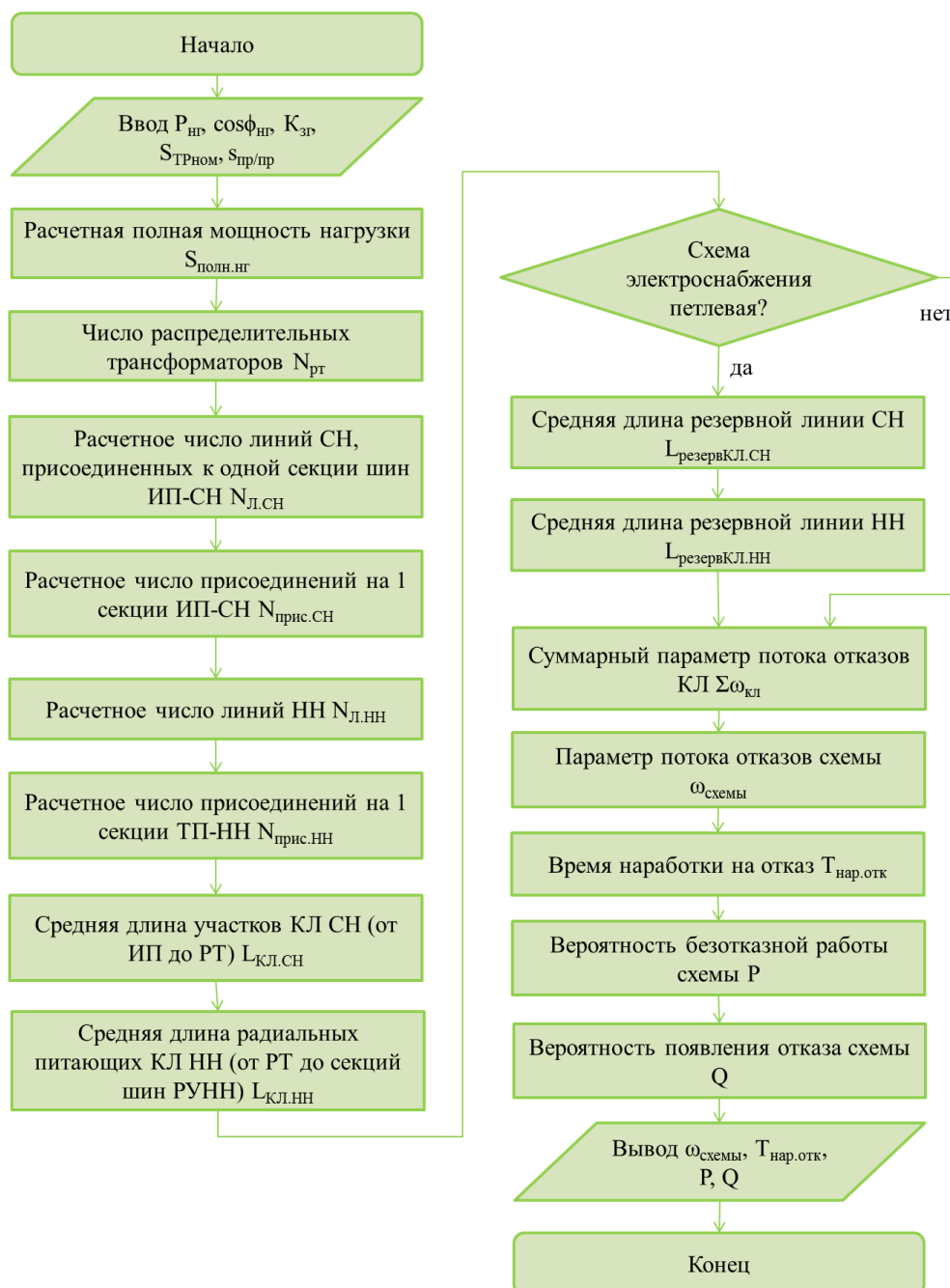


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчетов

Fig. 2. Block diagram of the calculation algorithm

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

Для выполнения расчетов требуется ввод следующих исходных данных:

- 1)  $P_{нг}$  – активная мощность нагрузки, МВт;
- 2)  $\cos\phi_{нг}$  – коэффициент мощности;

- 3)  $K_{зг}$  – коэффициент загрузки трансформатора;  
 4)  $S_{ТРном}$  – единичная номинальная мощность трансформатора, МВА;  
 5)  $S_{пр/пр}$  – общая площадь производственного объекта, км<sup>2</sup>.  
 Далее расчет проводится по формулам (1)-(15).  
 Расчетная полная мощность нагрузки, МВА, равная

$$S_{полн.нг} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг}} \quad (1)$$

Число распределительных трансформаторов (далее РТ)  $N_{РТ}$

$$N_{РТ} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг} \cdot K_{зг} \cdot S_{ТРном}} = \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТРном}} \quad (2)$$

Расчетное число линий СН, присоединенных к одной секции шин источника питания ИП-СН

$$N_{Л.СН} = \frac{N_{РТ}}{n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}} = \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТРном} \cdot n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}}, \quad (3)$$

где  $n_{сш}$  – число секций шин ИП-СН;

$N_{РТ.прис}$  – число РТ, присоединенных к линии СН, принимаем  $N_{РТ} = 1 \dots 5$ .

Расчетное число присоединений на 1 секции ИП-СН

$$N_{прис.СН} = N_{ост} + N_{Л.СН} = N_{ост} + \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТРном} \cdot n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}}, \quad (4)$$

где  $N_{ост}$  – остальные присоединения (трансформаторов, комплектных конденсаторных установок (ККУ) и прочего), принимаем  $N_{ост} = 1 \dots 3$ .

Расчетное число линий НН

$$N_{Л.НН} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг} \times S_{ср.нг}}, \quad (5)$$

где  $S_{ср.нг}$  – средняя мощность нагрузки по всем линиям НН.

Расчетное число присоединений на 1 секции РТ-НН

$$N_{прис.НН} = N_{ост} + N_{Л.НН} = N_{ост} + \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг} \cdot S_{ср.нг}} \quad (6)$$

Далее рассчитываются средние длины КЛ СН и НН, а также средние длины резервных линий СН и НН (при петлевой схеме электроснабжения).

Средняя длина участков КЛ СН (от ИП до РТ), км рассчитывается как

$$L_{КЛ.СН} = \gamma_{ип} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{N_{РТ}}}, \quad (7)$$

где  $\gamma_{ип}$  – коэффициент, учитывающий расположение ИП и РТ, принимаем  $\gamma_{ип} = 1$ .

Средняя длина радиальных питающих КЛ НН (от РТ до секций шин РУНН), км

$$L_{КЛ.НН} = \gamma_{рт} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{N_{РТ}}}, \quad (8)$$

где  $\gamma_{рт}$  – коэффициент, учитывающий расположение РТ до секций шин РУНН, принимаем  $\gamma_{рт} = 1$ .

Средняя длина резервной КЛ СН, км

$$L_{резерв.КЛ.СН} = \gamma_{ип} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{1 + N_{РТ}}} \quad (9)$$

Средняя длина резервной КЛ НН, км

$$L_{резерв.КЛ.НН} = \gamma_{рт} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{1 + N_{РТ}}} \quad (10)$$

Суммарный параметр потока отказов КЛ,  $\Sigma \omega_{кл}$ , откл/год

$$\begin{aligned} \Sigma \omega_{кл} &= \omega_{кл.СН} + \omega_{кл.НН} = \\ &= \sum \omega_{прис.СН} \cdot (L_{КЛ.СН} + L_{резерв.КЛ.СН}) + \\ &+ \sum \omega_{прис.НН} \cdot (L_{КЛ.НН} + L_{резерв.КЛ.НН}) \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Sigma\omega_{\text{прис.СН}}$  и  $\Sigma\omega_{\text{прис.НН}}$  – суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ СН и НН соответственно, откл/год.

Значение параметра потока отказов схемы  $\omega_{\text{схемы}}(t)$ , откл/год

$$\omega_{\text{схемы}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (12)$$

определяется вероятностью появления отказа схемы  $Q(t, \Delta t)$  в интервале времени  $t, \Delta t$ .

Время наработки на отказ схемы  $T_{\text{нар.отк}}$ , год

$$T_{\text{нар.отк}} = \frac{1}{\omega_{\text{схемы}}} \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P = e^{-\omega_{\text{схемы}}} \quad (14)$$

Вероятность появления отказа схемы

$$Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega_{\text{схемы}}} \quad (15)$$

По рисунку 2 производится вывод следующих параметров:  $\omega_{\text{схемы}}$ ,  $T_{\text{нар.отк}}$ ,  $P$  и  $Q$ .

Для автоматизации представленного алгоритма расчетов (рис. 2) проведем моделирование параметров надежности в среде Matlab/Simulink.

На рисунке 3 представлена модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения, разработанная в Matlab/Simulink, для  $\omega_{\text{схемы}}$ ,  $T_{\text{нар.отк}}$ ,  $P$  и  $Q$ . Для задания исходных данных для моделирования и оценки параметров надежности использовались блоки программы *Matlab* из библиотеки *Simulink*:

- 1) для задания диапазонов исходных данных (*Constant*);
- 2) для проведения вычислительных операций по выражениям (1)-(15):
  - блоки постоянных значений (*Constant*);
  - блоки сумма (*Sum*), умножение (*Product*), деление (*Divide*), корень (*Sqrt*);
  - блоки основных математических функций (*Math Function*);
  - функция округления (*ceil(X)*) – округляет каждый элемент массива  $X$  до ближайшего целого числа, большего или равного этому элементу, то есть в сторону положительной бесконечности до целого большего числа;
- 3) для вывода параметров (*Display*).

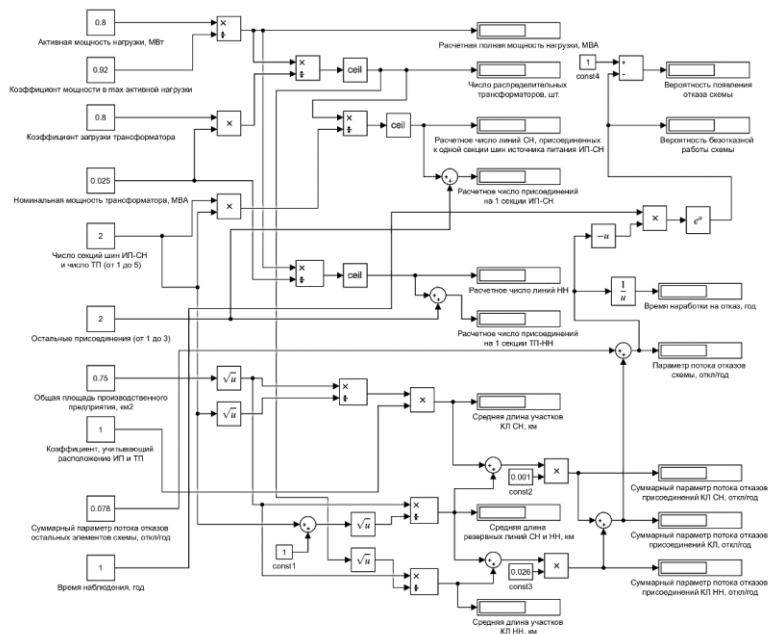


Рис. 3. Модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink

Fig. 3. Model of the algorithm for calculating the reliability parameters of a power supply circuit in the Matlab/Simulink environment

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

В таблице 1 приведены граничные условия исходных данных для подстановки в алгоритм расчета параметров надежности схемы в модель *Simulink*.



Таблица 1  
Table 1Граничные условия исходных данных для моделирования параметров надежности  
Boundary conditions of the initial data for modeling reliability parameters

| № | Параметр                                                                  | Минимальное значение | Максимальное значение |
|---|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | Активная мощность нагрузки $P_{нг}$ , МВт                                 | 0,8                  | 1,6                   |
| 2 | Коэффициент мощности в тах активной нагрузки $\cos\varphi_{нг}$           | 0,75                 | 0,95                  |
| 3 | Коэффициент загрузки трансформатора $k_{зг}$                              | 0,1                  | 1,2                   |
| 4 | Номинальная мощность трансформатора $S_{трном}$ , МВА                     | 0,025                | 2,5                   |
| 5 | Число секций шин ИП-СН и число трансформаторных подстанций (ТП)           | 1                    | 5                     |
| 6 | Остальные присоединения                                                   | 1                    | 3                     |
| 7 | Общая площадь производственного предприятия $S_{пр/пр}$ , км <sup>2</sup> | 0,25                 | 2                     |
| 8 | Суммарный параметр потока отказов остальных элементов схемы, откл/год     | 0,039                | 0,195                 |
| 9 | Время наблюдения $t$ , год                                                | 1                    | 7                     |

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

Данные таблицы 1 показывают, что разработанная модель позволяет изменять исходные параметры схемы с рассматриваемыми диапазонами, например,  $S_{трном}$  изменяется от 0,025 до 2,5 МВА,  $P_{нг}$  увеличивается в 2 раза с учетом роста мощности нагрузки (с 0,8 до 1,6 МВт),  $S_{пр/пр}$  увеличивается в 8 раз – с 0,25 до 2 км<sup>2</sup>, что позволяет использовать модель для расчетов объектов различной мощности нагрузки и площади объекта.

**Результаты (Results)**

Проведем расчет параметров надежности схемы при следующих исходных данных:

- 1)  $P_{нг} = 1,2$  МВт;
- 2)  $\cos\varphi_{нг} = 0,92$ ;
- 3)  $k_{зг} = 0,8$ ;
- 4)  $S_{трном} = 1,6$  МВА;
- 5) Число секций шин ИП-СН и число ТП = 2;
- 6) Остальные присоединения (трансформаторов, ККУ и прочего) = 2;
- 7)  $S_{пр/пр} = 0,75$  км<sup>2</sup>;
- 8) Коэффициент, учитывающий расположение ИП и ТП = 1;
- 9) Суммарный параметр потока отказов остальных элементов схемы = 0,078 откл/год (т.к. число ТП = 2);
- 10) Время наблюдения  $t = 3$  года.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

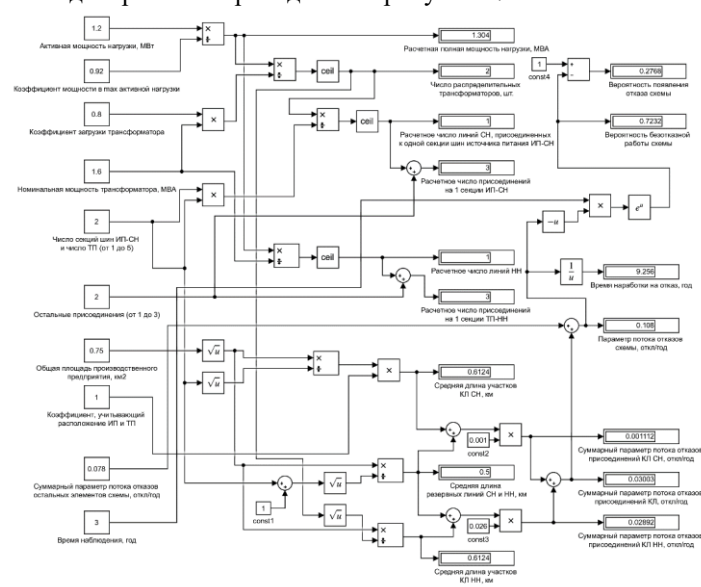


Рис. 4. Результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink

Fig. 4. Results of modeling the reliability parameters of the power supply circuit in the Matlab/Simulink environment

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

Результаты расчетов при моделировании:

- 1) Расчетная полная мощность нагрузки 1,304 МВА;
- 2) Число распределительных трансформаторов 2 шт;
- 3) Расчетное число линий СН, присоединенных к одной секции шин ИП-СН – 1;
- 4) Расчетное число присоединений на 1 секции ИП-СН – 3;
- 5) Расчетное число линий НН – 1;
- 6) Расчетное число присоединений на 1 секции ТП-НН – 3;
- 7) Средняя длина участков КЛ СН 0,6124 км;
- 8) Средняя длина резервных линий СН и НН 0,5 км;
- 9) Средняя длина участков КЛ НН 0,6124 км;
- 10) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ СН 0,001112 откл/год;
- 11) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ НН 0,02892 откл/год;
- 12) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ 0,03003 откл/год;
- 13) Параметр потока отказов схемы 0,106 откл/год;
- 14) Время наработки на отказ 9,256 года;
- 15) Вероятность безотказной работы схемы = 0,7232;
- 16) Вероятность появления отказа = 0,2768.

Проведем 12 вычислительных экспериментов, изменяя исходные параметры схемы:  $P_{нг}$  от 0,8 до 1,6 МВт,  $k_{зг}$  от 0,65 до 1,0,  $S_{трном}$  от 0,025 до 2,5 МВА, чисто ТП от 2 до 5,  $S_{пр/пр}$  от 0,75 до 2,0 км<sup>2</sup> с шагом 0,25 км<sup>2</sup>, время наблюдение от 1 до 5 лет. В таблице 2 представлены результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в *Matlab/Simulink* при изменении исходных данных.

Таблица 2

Table 2

Результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения при изменении  
исходных данных

*The results of modeling the reliability parameters of the power supply scheme when the initial data changes*

| № п/п | Исходные данные   |          |                      |             |                                  |           | Результаты моделирования |               |        |         |
|-------|-------------------|----------|----------------------|-------------|----------------------------------|-----------|--------------------------|---------------|--------|---------|
|       | $P_{нг}$ ,<br>МВт | $k_{зг}$ | $S_{трном}$ ,<br>МВА | Число<br>ТП | $S_{пр/пр}$ ,<br>км <sup>2</sup> | t,<br>год | $\omega_{схемы}$         | $T_{нар.отк}$ | P      | Q       |
| 1     | 0,8               | 0,65     | 0,025                | 2           | 0,75                             | 1         | 0,09518                  | 10,51         | 0,9092 | 0,09079 |
| 2     | 0,9               | 0,7      | 0,04                 | 2           | 0,75                             | 2         | 0,09592                  | 10,43         | 0,8254 | 0,1746  |
| 3     | 1,0               | 0,75     | 0,063                | 2           | 1,0                              | 3         | 0,0996                   | 10,04         | 0,7417 | 0,2583  |
| 4     | 1,05              | 0,8      | 0,1                  | 3           | 1,0                              | 3         | 0,09879                  | 10,12         | 0,7435 | 0,2565  |
| 5     | 1,1               | 0,85     | 0,16                 | 3           | 1,25                             | 3         | 0,1034                   | 9,669         | 0,7332 | 0,2668  |
| 6     | 1,2               | 0,85     | 0,25                 | 3           | 1,25                             | 3         | 0,1047                   | 9,549         | 0,7304 | 0,2696  |
| 7     | 1,3               | 0,85     | 0,4                  | 4           | 1,5                              | 4         | 0,1076                   | 9,29          | 0,6501 | 0,3499  |
| 8     | 1,4               | 0,9      | 0,63                 | 4           | 1,5                              | 2         | 0,1118                   | 8,946         | 0,7997 | 0,2003  |
| 9     | 1,45              | 0,9      | 1,0                  | 4           | 1,75                             | 2         | 0,119                    | 8,406         | 0,7883 | 0,2117  |
| 10    | 1,5               | 0,95     | 1,25                 | 5           | 1,75                             | 3         | 0,1175                   | 8,511         | 0,7029 | 0,2971  |
| 11    | 1,55              | 0,95     | 1,6                  | 5           | 2,0                              | 4         | 0,1202                   | 8,318         | 0,6182 | 0,3818  |
| 12    | 1,6               | 1,0      | 2,5                  | 5           | 2,0                              | 5         | 0,131                    | 7,634         | 0,5195 | 0,4805  |

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

Результаты моделирования показывают, что

- 1) Разработанная модель позволяет изменять 10 исходных параметров схемы с заданным диапазоном и в результате моделирования получить 12 вспомогательных и 4 основных показателя надежности:  $\omega_{схемы}$ ,  $T_{нар.отк}$ , P и Q;
- 2) Возможно задание совокупности сочетаний вариантов исходных данных, изменение которых позволяет уменьшать значение  $\omega_{схемы}$  и увеличивать  $T_{нар.отк}$ .

#### **Заключение (Conclusions)**

Проведенное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения эффективности оценки и управления надежностью схем электроснабжения объектов. В работе представлено моделирование параметров надежности схем электроснабжения в среде *Matlab/Simulink*.

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

- 1) Разработана программа для моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в среде *Matlab/Simulink*;
- 2) Проведены 12 вычислительных экспериментов на примере типовых схем электроснабжения с изменением исходных параметров;

3) Подтверждена практическая значимость исследования: разработанная модель позволяет оценивать параметры надежности схем различной конфигурации, оптимизировать сроки планово-предупредительных ремонтов (ППР) и обосновывать выбор резервирования на этапе проектирования и ввода в эксплуатацию СЭС.

В дальнейшем модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink рекомендуется использовать для:

1) Расширения библиотеки моделей для учета процессов износа и старения оборудования;

2) Интеграции модели надежности с моделями качества электроэнергии для комплексной оценки рисков;

3) Разработки оптимизационных алгоритмов для автоматического выбора рациональной конфигурации схемы с технико-экономическими составляющими по критерию «надежность-стоимость».

Результаты проведенных исследований могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем электроснабжения. Внедрение разработанной модели в практику проектных и эксплуатационных работ позволит повысить эффективность эксплуатации электрических систем и управлять надежностью электроснабжения потребителей.

#### Литература

1. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Волчков Ю.Д., Виноградова А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. №2. С. 58-70.

2. Герасимов Д.О., Суслов К.В. СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. №4 (48). С. 11-19.

3. Ибрагим М., Пантелеев В. И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. №2. С. 212-227.

4. Моденов М.Ю., Чуканов А.Н., Цой Е.В. Математическое моделирование идеального контура управления летательным аппаратом нестандартного типа в среде MATLAB // Чебышевский сборник. 2025. №1 (97). С. 218-228.

5. Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

6. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

7. Петрова Р. М. и др. Оценка параметров надежности схем внутризаводского электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 521–533. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

8. Петрова Р.М., Грачева Е.И. Оценка параметров надежности схем электроснабжения с трансформаторными подстанциями при выполнении технико-экономических расчетов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 2 (66). С. 3-18.

9. Романенко Н.Г., Головки Ю.А., Головки С.В., Ненастьяев Е.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЛАВНОГО ДИЗЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. №2. С. 23-32.

10. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. №2. С. 55-67.

11. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

12. N. Bhuvaneswary, V. J. Reddy, C. V. Kumar Reddy, J. R. Reddy, Y. Jagadeeshwar Reddy and M. U. Reddy, "Power Fault Analysis and Monitoring System using Simulink," 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM), Kanyakumari, India, 2025, pp. 564-569, doi: 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988264.
13. W. Guo, Y. He and X. Ling, "Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle Systems Using Simulink and MATLAB Programming for Advanced Automotive Application," 2025 11th International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI), Kyoto, Japan, 2025, pp. 627-631, doi: 10.1109/ICCAI66501.2025.00100.
14. S. Valtchev, R. M. Petrova, E. I. Gracheva, D. Gospodinova, T. Sinyukova and R. Miceli, "Electrical Supply Reliability of Circuits with Transformer Substations in Technical and Economic Decisions," 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Bochum, Germany, 2025, pp. 623-628, doi: 10.1109/GPECOM65896.2025.11061870.
15. Y. Li, T. Chen, Y. She, W. Liao, C. Liu and M. Xie, "Energy Storage Regulation Strategy for 5G Base Stations Considering Power Supply Reliability," 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Hangzhou, China, 2023, pp. 1573-1578, doi: 10.1109/EI259745.2023.10513061.
16. Q. Yu et al., "Research on Online Pictures Recognition of Fault Scenario for Power Supply Reliability Management Based on Improved AI Algorithm," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 190-194, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809893.
17. E. A. Panova and A. T. Nasibullin, "Development of Mathematical Models of Microprocessor-based Relay Protection Devices for 220/110 kV Nodal Distribution Substation in Matlab/Simulink," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234337.
18. V. A. Paseka, "Reliability Analysis of Transient Process and Steady State Calculations in MATLAB/Simulink," 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 835-837, doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468208.

#### Авторы публикации

**Петрова Рената Маратовна** – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. Email: 1998renata@mail.ru.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. Email: grachieva.i@bk.ru.

#### References

1. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. DETERMINATION OF MODERN RELIABILITY INDICATORS OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICES // Izvestiya vuzov. Energy problems. 2023. № 2. Pp. 58-70.
2. Gerasimov D.O., Suslov K.V. SYSTEMS OF SIMULATION MODELING OF MULTI-ENERGY FACILITIES // KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2020. № 4 (48). Pp. 11-19.
3. Ibrahim M., Pantelev V. I. MODELING OF AN ELECTRICAL COMPLEX OF A DC POWER TRANSMISSION LINE IN THE MATLAB SOFTWARE ENVIRONMENT // Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology. 2023. № 2. Pp. 212-227.
4. Modenov M. Yu., Chukanov A. N., Tsoi E. V. Mathematical modeling of an ideal control loop for a non-standard type aircraft in the MATLAB environment // Chebyshevsky collection. 2025. № 1 (97). Pp. 218-228.
5. Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of inhouse power supply taking into account the main influencing factors. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (3):38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.
6. Petrova R. M., Gracheva E. I. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). Pp. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.
7. Petrova R. M. et al. Assessment of reliability parameters of in-house power supply schemes with two-transformer substations. Bulletin of the Moscow State Technical University. 2024. Vol. 27, No. 4. pp. 521-533. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

8. Petrova R.M., Gracheva E.I. Assessment of reliability parameters of power supply schemes with transformer substations during technical and economic calculations. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2025. Vol. 17. № 2 (66). Pp. 3-18.
9. Romanenko N.G., Golovko Yu.A., Golovko S.V., Nenast'ev E.A. MODELING OF THE CONTROL SYSTEM OF THE MAIN DIESEL COOLING PUMP IN THE MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Control, Computer Engineering and Informatics. 2023. № 2. Pp. 23-32.
10. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. APPLICATION OF A VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR IN POWER SYSTEMS AND ITS MODELING IN THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE // News of universities. Problems of energy supply. 2024. № 2. Pp. 55-67.
11. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.
12. N. Bhuvaneshwari, V. J. Reddy, C. V. Kumar Reddy, J. R. Reddy, Y. Jagadeeshwar Reddy and M. U. Reddy, "Power Fault Analysis and Monitoring System using Simulink," 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM), Kanyakumari, India, 2025, pp. 564-569, doi: 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988264.
13. W. Guo, Y. He and X. Ling, "Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle Systems Using Simulink and MATLAB Programming for Advanced Automotive Application," 2025 11th International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI), Kyoto, Japan, 2025, pp. 627-631, doi: 10.1109/ICCAI66501.2025.00100.
14. S. Valtchev, R. M. Petrova, E. I. Gracheva, D. Gospodinova, T. Sinyukova and R. Miceli, "Electrical Supply Reliability of Circuits with Transformer Substations in Technical and Economic Decisions," 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Bochum, Germany, 2025, pp. 623-628, doi: 10.1109/GPECOM65896.2025.11061870.
15. Y. Li, T. Chen, Y. She, W. Liao, C. Liu and M. Xie, "Energy Storage Regulation Strategy for 5G Base Stations Considering Power Supply Reliability," 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Hangzhou, China, 2023, pp. 1573-1578, doi: 10.1109/EI259745.2023.10513061.
16. Q. Yu et al., "Research on Online Pictures Recognition of Fault Scenario for Power Supply Reliability Management Based on Improved AI Algorithm," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 190-194, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809893.
17. E. A. Panova and A. T. Nasibullin, "Development of Mathematical Models of Microprocessor-based Relay Protection Devices for 220/110 kV Nodal Distribution Substation in Matlab/Simulink," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234337.
18. V. A. Paseka, "Reliability Analysis of Transient Process and Steady State Calculations in MATLAB/Simulink," 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 835-837, doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468208.

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

**Renata M. Petrova** –Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru.

**Elena I. Gracheva** – Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 20.10.2025 г.

**Отредактировано** 14.11.2025 г.

**Принято** 26.12.2025 г.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МОДУЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Букреев А.В.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия  
vim@aleksey-bukreev.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена методологическим разрывом между агротехническими требованиями к самоходным модульным платформам (тяговое усилие, рабочая скорость, масса) и параметрами, необходимыми для проектирования тяговых электродвигателей методом конечных элементов (внешняя скоростная характеристика (ВСХ), CPSR). Существующие методики не учитывают специфику индивидуального электропривода и современные возможности варьирования массы. ЦЕЛЬ. Разработать алгоритмизированную методику тягового расчета, обеспечивающую преобразование исходных агротехнических параметров в обоснованную внешнюю скоростную характеристику тягового электродвигателя для гибридных сельскохозяйственных модульных платформ с последовательной трансмиссией. МЕТОДЫ. Методика базируется на уравнениях тягового баланса, теории трактора и анализе эмпирических зависимостей. Ключевой особенностью является введение и системный учет коэффициента диапазона эксплуатационных масс и коэффициента возможной перегрузки, что позволяет перейти от дискретного задания масс к непрерывному диапазону. Расчет включает определение требуемой мощности, КПД (с учетом классов энергоэффективности), передаточных чисел редуктора и построение искомой внешней скоростной характеристики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получено семейство внешних скоростных характеристик тяговых электродвигателей, демонстрирующее влияние варьируемых параметров на требуемый диапазон регулирования мощности (CPSR). Установлено, что увеличение расчетной рабочей скорости с 4 до 8 км/ч при фиксированном коэффициенте диапазона эксплуатационных масс, равному 1,66, позволяет снизить требуемый CPSR с 11,1 до 5,5. На основе уравнений тягового баланса выведен безразмерный комплекс CPSR, обобщающий влияние скоростного фактора, сцепления, баллаستировки и перегрузки. Обоснована стратегия унификации тяговых двигателей внутри модельного ряда, при которой один типоразмер тяговых электродвигателей покрывает требования всей серии за счет программного смещения базовой точки на ВСХ без пересчета электромагнитной системы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика устраняет методологический разрыв между механическим и электромагнитным моделированием, выступая связующим звеном в сквозном цифровом цикле проектирования. Она позволяет формировать корректное техническое задание на проектирование электрических машин, оптимизировать конструкцию тяговых электродвигателей под реальные условия эксплуатации с переменной массой и динамическими нагрузками, а также сокращает время итераций между смежными дисциплинами.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель; электрическая машина; сельскохозяйственный трактор; самоходная модульная платформа; мобильное энергетическое средство МЭС; индивидуальный привод колёс; электромеханическая трансмиссия; электрическая трансмиссия.

**Для цитирования:** Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Букреев А.В. Совершенствование методики тягового расчета при проектировании электропривода гибридных сельскохозяйственных модульных платформ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-49-62.

## IMPROVEMENT OF THE TRACTION CALCULATION METHODOLOGY FOR THE ELECTRIC DRIVE DESIGN OF HYBRID AGRICULTURAL MODULAR PLATFORMS

Solovyov R.Y.U., Solovyov R.R., Bukreev A.V.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

soll.rom@yandex.ru

**Abstract:** *RELEVANCE* of this study stems from the methodological gap between the agrotechnical requirements for self-propelled modular platforms (drawbar pull, operating speed, mass) and the parameters necessary for designing traction electric motors using the finite element method (external speed characteristic (ESC), CPSR). Existing methods do not account for the specifics of individual electric drives and the modern possibilities of mass variation. *THE PURPOSE.* To develop an algorithmic traction calculation methodology that transforms the initial agrotechnical parameters into a well-founded external speed characteristic of a traction electric motor for hybrid agricultural modular platforms with series transmission. *METHODS.* The methodology is based on traction balance equations, classical tractor theory, and analysis of empirical dependencies. A key feature is the introduction and systematic consideration of the operational mass range coefficient and the overload capability coefficient, enabling a transition from discrete mass settings to a continuous range. The calculation includes determining the required power, efficiency (taking into account energy efficiency classes), reduction gear ratios, and constructing the desired external speed characteristic. *RESULTS.* A family of external speed characteristics of traction electric motors was obtained, demonstrating the influence of varying parameters on the required Constant Power Speed Ratio (CPSR). It was found that increasing the design operating speed from 4 to 8 km/h with a fixed operational mass range coefficient of 1.66 reduces the required CPSR from 11.1 to 5.5. Based on the traction balance equations, a dimensionless complex for CPSR was derived, generalizing the influence of the speed factor, adhesion factor, ballasting factor, and overload factor. A strategy for unifying traction motors within a model series is substantiated: a single motor size covers the requirements of the entire series by software shifting of the base point on the ESC without recalculating the electromagnetic system. *CONCLUSIONS.* The developed methodology bridges the methodological gap between mechanical and electromagnetic modeling, acting as a crucial link in a closed-loop digital design cycle. It enables the formulation of accurate technical specifications for designing electric machines, optimizes the traction motor design for real operating conditions with variable mass and dynamic loads, and significantly reduces iteration time between interrelated engineering disciplines.

**Keywords:** traction electric motor; electric machine; agricultural tractor; self-propelled modular platform; mobile power unit (MPU); electromechanical transmission; electric transmission.

**For citation:** Solovyov R.Y.U., Solovyov R.R., Bukreev A.V. Improvement of the traction calculation methodology for the electric drive design of hybrid agricultural modular platforms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-49-62.

### **Введение (Introduction)**

Мировые тренды в области сельскохозяйственного машиностроения ориентированы на создание высокоавтоматизированных и автономных тракторов. Наиболее перспективной архитектурой признаны самоходные модульные платформы (СМП) с гибридными силовыми установками и индивидуальным электроприводом колес. Примеры таких платформ уже существуют за рубежом (универсальная EOX Tractors 175, специализированные VitiBot Bakus, Naïo Technologies TED, EXXACT Robotics TRAXX, адаптивная Sitia Trektor) и в России (Т-240, «Интермашхолдинг»). Однако реализация данного подхода требует решения комплексной междисциплинарной задачи, объединяющей методы классического тракторостроения, силовой электроники и проектирования электрических машин.

Ключевая проблема, возникающая на стыке этих областей, заключается в

методологическом разрыве между исходными данными и конечным результатом проектирования. Инженеры, разрабатывающие СМП, оперируют традиционными агротехническими параметрами: требуемым тяговым усилием на крюке, рабочими скоростями, диапазоном эксплуатационных масс и типом двигателя. Однако эти параметры не могут быть напрямую использованы для проектирования тяговых электродвигателей (ТЭД) с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для последних критически важна целевая внешняя скоростная характеристика (ВСХ) с четко определенными зонами постоянства момента и мощности, а также значением отношения максимальной частоты вращения к частоте вращения при выходе на постоянную мощность (CPSR).

Отсутствие формализованной процедуры преобразования агротехнических требований в параметры ВСХ ТЭД приводит к проектным неопределенностям: либо к неоправданному завышению характеристик и удорожанию электропривода, либо к его неспособности эффективно работать в реальных условиях, в частности, с переменным балластом и при низкочастотных ( $\sim 1$  Гц) динамических нагрузках от почвообрабатывающих орудий. Классические методики тягового расчета, разработанные для тракторов с механическими трансмиссиями, не учитывают специфику электропривода и современные возможности варьирования массы.

Для преодоления указанного разрыва в данной работе предлагается комплексная алгоритмизированная методика, которая выполняет роль связующего звена. Она на строгой расчетной основе трансформирует входные агротехнические данные в требования к ВСХ ТЭД, пригодные для последующего моделирования в САЕ-пакетах (Motor-CAD, Altair Flux и др.), обеспечивая тем самым сквозной цифровой цикл проектирования СМП. Особенностью подхода является системный учет коэффициента диапазона эксплуатационных масс ( $k_{d,масс}$ ) и коэффициента возможной перегрузки ( $v_c$ ), что позволяет более точно обосновать требования к CPSR.

Цель исследования заключается в разработке методики тягового расчета, обеспечивающей формирование обоснованной внешней скоростной характеристики тягового электродвигателя на основе заданных агротехнических параметров самоходной модульной платформы с последовательной гибридной трансмиссией.

Научная значимость исследования состоит в установлении аналитических зависимостей между агротехническими параметрами СМП (диапазон балластирования, рабочая скорость, тяговое усилие) и ключевыми характеристиками ТЭД (CPSR, момент, мощность), а также в обосновании принципа унификации тяговых двигателей внутри модельного ряда за счет программного смещения базовой точки характеристики.

Практическая значимость исследования заключается в создании инструмента, позволяющего инженерам формировать корректное техническое задание на проектирование электрических машин, сокращая время итераций между механическим и электромагнитным моделированием, и оптимизировать конструкцию ТЭД под реальные условия эксплуатации, включая работу с переменной массой и динамическими нагрузками.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

В соответствии с современными концепциями развития агроинженерных систем, перспективные высокотехнологичные тракторы сельскохозяйственного назначения целесообразно разрабатывать на базе СМП, оснащенных гибридными силовыми установками последовательного типа [1, 2]. В работе [3] также обосновывается перспективность данного направления. Отмечается, что СМП с гибридной силовой установкой должны комплектоваться мотор-колесами [4]. Указанный подход согласуется с глобальным трендом, направленным на создание высокоавтоматизированных и полностью автономных мобильных энергетических средств, что подтверждается исследованиями [5, 6]. Вопросы обеспечения автономности также рассматриваются в публикации [7].

Как показывают фундаментальные исследования в области топологий гибридных транспортных средств, последовательная схема предоставляет наибольшую гибкость в управлении моментом на каждом колесе, что критически важно для сельскохозяйственных операций [8].

Проектирование автономных СМП в современных условиях представляет собой комплексную междисциплинарную задачу, интегрирующую классическое тракторостроение, силовую электронику и проектирование электрических машин [9]. Методологический разрыв, исторически сложившийся между указанными дисциплинами, порождает существенные трудности. Инженеры, осуществляющие



проектирование СМП, руководствуются традиционными методиками и формулируют требования в терминах тягового усилия на крюке, рабочих скоростей движения и диапазона эксплуатационных масс. Однако данные параметры не могут быть непосредственно использованы в качестве входных данных при проектировании ТЭД с применением МКЭ. Для последних определяющее значение имеет целевая ВСХ, представляющая собой зависимость крутящего момента от частоты вращения  $M(n)$  с четко выраженными зонами постоянства момента и постоянства мощности.

В мировом научном сообществе вопросам формирования диапазона регулирования мощности (Constant Power Speed Ratio, CPSR) и его влияния на конструкцию ротора (например, для машин с внутренними постоянными магнитами) уделяется первостепенное внимание. В частности, в работе [10, 11] показано, что высокие значения CPSR требуют специфической электромагнитной геометрии, что напрямую связывает агротехнические требования с конструкцией ТЭД.

В настоящее время отсутствует формализованная процедура трансформации агротехнических требований в параметры ВСХ ТЭД, что обуславливает риск неоптимального завышения характеристик разрабатываемого двигателя либо его несоответствия реальным эксплуатационным условиям, включая функционирование СМП с переменной баллаستировкой. Особую сложность представляет учет низкочастотных (порядка 1 Гц) колебаний нагрузки, генерируемых почвообрабатывающими орудиями<sup>1</sup>, которые требуют обеспечения запаса по моменту ( $v_c$ ), а не только кратковременной перегрузочной способности.

Современные зарубежные исследования, например, моделирование пахотных агрегатов [12], подтверждают, что именно динамика взаимодействия рабочего органа с почвой формирует наиболее жесткие требования к перегрузочной способности тягового электропривода.

Изложенное обуславливает необходимость тягового расчета как ключевого этапа разработки СМП. В настоящей работе расчет выполнен для платформы с равновеликими колесами по схеме 4K46, оснащенной последовательной гибридной электромеханической бездиапазонной трансмиссией с индивидуальным приводом колес; на его основе получена ВСХ электродвигателя.

Классические методики, изложенные в трудах Е.Д. Львова и Г.М. Кутькова, были разработаны в период, когда сельскохозяйственные тракторы (СМП) не обладали современной гибкостью в части балластировки и широким диапазоном соотношения массы к мощности. Кроме того, в классических работах не рассматривались СМП с электроприводом колёс. Вопросы перераспределения мощности в трансмиссиях многоосных машин, являющиеся ключевыми для индивидуального привода колес, детально рассмотрены в работе [13], где предложен синергетический подход к управлению тягово-скоростными свойствами.

На современном этапе вопросы проектирования СМП с электромеханическими трансмиссиями получили развитие в исследованиях [14, 15], где рассматривается сочетание электродвигателя с механической трансмиссией. Исследование [16] также вносит вклад в разработку данного направления.

В работе Д.С. Солдатенко<sup>2</sup> продемонстрирована взаимосвязь между механическими и электрическими характеристиками привода, обеспечивающая достижение требуемых технико-экономических показателей. В данной работе акцент сделан на электрических параметрах, но на практике при проектировании ТЭД методом конечных элементов первостепенное значение имеют корректно заданные механические характеристики; задача анализа МКЭ ТЭД заключается в подтверждении данных характеристик. Одним из основных результатов тягового расчета является механическая ВСХ ТЭД, которая служит одним из ключевых входных технических требований для моделирования в программных комплексах, реализующих МКЭ. Таким образом, ВСХ выполняет функцию связующего элемента между механическим моделированием СМП и электромагнитным моделированием ТЭД.

Развитию методов численного моделирования электрических машин и повышению их энергоэффективности посвящены работы [17, 18]. Так, в [17] методом конечных элементов исследовалось влияние компенсирующих устройств на

<sup>1</sup>Анилович В. Я., Водолажченко Ю. Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: Справочное пособие. Машиностроение. М., 1966. 520 с.

<sup>2</sup>Солдатенко Д. С. Расчет электромеханических параметров тягового электропривода тракторов // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Т. 8. С. 129-131.

электромагнитный момент погружного электродвигателя, что демонстрирует возможности численного моделирования при проектировании электрических машин. В [18] представлена оптимизация векторного управления асинхронным двигателем с комбинированной обмоткой, позволяющая снизить потери мощности, что актуально для повышения КПД тяговых электроприводов.

Вопросы обеспечения качества электроэнергии и надёжности электроприводов рассмотрены в работе [19], где методом компьютерного моделирования исследовано применение динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) для системы многодвигательного привода ленточного конвейера. Показано, что ДКИН позволяет эффективно компенсировать провалы и несимметрию напряжения, предотвращая перегрузки и потерю устойчивости привода. Для практической реализации и тестирования систем управления частотно-регулируемыми электроприводами актуальными являются стендовые испытания. В работе [20] представлен разработанный стенд для исследования работоспособности преобразователей частоты после капитального ремонта, что соответствует задачам обеспечения надёжности электротехнических комплексов в условиях реальной эксплуатации.

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

Тяговый расчет представляет собой один из этапов общей методики, включающей следующие последовательные стадии:

1. Тяговый расчет – на основе исходных агротехнических и энергетических параметров (приведены ниже) формируется целевая (эталонная) внешняя скоростная характеристика ТЭД.

2. МКЭ-проектирование – осуществляется варьирование геометрических и электромагнитных параметров тягового электродвигателя с целью получения реализуемой механической характеристики и иных параметров ТЭД, удовлетворяющих заданным требованиям.

3. Верификация – проводится сравнительный анализ внешней скоростной характеристики, полученной в результате МКЭ-моделирования, с эталонной ВСХ. При их совпадении в пределах установленного допуска подтверждается соответствие тягово-динамических свойств самоходной модульной платформы расчетным условиям эксплуатации.

4. Технико-экономическая оценка – выполняется анализ соответствия разработанного двигателя стоимостным, агротехническим и энергетическим требованиям. В случае выявления несоответствия производится итерационный пересмотр исходных требований к СМП либо корректировка структуры модельного ряда платформ.

При проведении тягового расчета приняты следующие допущения: движение СМП рассматривается как установившееся на горизонтальной поверхности; ввиду низкоскоростного режима движения при выполнении полевых работ сопротивление воздуха и инерционные силы не учитываются; коэффициент использования веса трактора  $\varphi_{кр}$  принимается неизменным при изменении массы СМП за счет установки балласта; детальный расчет параметров буферного накопителя энергии, равно как и накопителя при отсутствии двигателя внутреннего сгорания, не приводится, поскольку является предметом отдельного исследования.

Исходными данными для тягового расчета служат такие параметры как: назначение СМП; тип движителя [21]; коэффициент учитывающий долю веса, приходящуюся на ведущие колеса  $\lambda_k$ ; номинальное тяговое усилие  $P_{кр\ n.макс}$ , Н (для случая максимальной допустимой массы СМП); тяговый класс или классы; допустимое буксование движителей  $\delta_n$ ; максимальная транспортная скорость  $V_{макс.д}$ ; коэффициент использования веса трактора  $\varphi_{кр.н}$ ; коэффициент сопротивления качению  $f_k$ ; КПД механической части трансмиссии  $\eta_{мех}$  и генератора  $\eta_{ген}$ ; передаточные числа ступеней редуктора  $u_{ред}$ , максимальная частота вращения вала ТЭД  $n_{эл.макс}$ , об/мин; число ведущих колёс и общее число колёс  $n_k$ ; статический радиус колеса  $r_k$ , м, а так же эмпирические зависимости буксования от коэффициента использования веса трактора  $\varphi_{кр}$ .

Дополнительно в методику предлагается ввести следующие параметры: класс энергоэффективности электродвигателя (в настоящее время выделяют пять классов от IE1 до IE5) [22]; коэффициент диапазона эксплуатационных масс; коэффициент возможной перегрузки; а также максимальную скорость при номинальном тяговом усилии (в рассматриваемом случае - при максимально допустимой массе СМП). Введение указанных коэффициентов позволяет скорректировать диапазон значений, традиционно используемых в классических методиках.

Расчет эксплуатационного максимального веса и максимально допустимый массы СМП выполняется по формуле (1):

$$G_{\text{тр.макс}} = \frac{P_{\text{кр н.макс}}}{\varphi_{\text{кр н}} \cdot \lambda_{\text{к}}} [\text{Н}], \quad m_{\text{тр.макс}} = \frac{G_{\text{тр.макс}}}{g} [\text{кг}], \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda_{\text{к}}$  – коэффициент учитывающий долю веса, приходящуюся на ведущие колёса. Не учитывается так как все колёса СМП ведущие, равен 1.

Вопрос корректировки тягового расчёта для тракторов тягово-энергетической концепции (СМП) был детально рассмотрен в работе [23]. Согласно предложенной ими методике, эксплуатационный вес СМП определяется дискретно для двух крайних вариантов: базовой машины без балласта и полностью забалластированного агрегата. Вопросы балластировки так же изучались в работах [24, 25]. В развитие данного подхода, предлагается переход от дискретного задания двух масс к использованию единого коэффициента диапазона эксплуатационных масс  $k_{\text{д.масс}}$ . Вместо двух независимых входных параметров вводится зависимость согласно формуле (2):

$$m_{\text{тр.мин}} = \frac{m_{\text{тр.макс}}}{k_{\text{д.масс}}} [\text{кг}]. \quad (2)$$

Расчёт мощности, требуемой на ТЭД, выполняется по формуле (3):

$$N_{\text{н.э.эд}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (3)$$

где  $P_f = f_{\text{к}} G_{\text{тр.макс}}$  – сила сопротивления качению, Н; максимальная скорость при номинальном тяговом усилии  $v_{\text{тр}}$ , в м/с;

На основе полученной требуемой мощности ТЭД, определяется КПД ТЭД IE5 класса энергоэффективности для номинальных оборотов по ГОСТ IECIS 60034-30-2-2021 по формуле (4):

$$\eta_{\text{эд}} = \frac{A \cdot \left( \log \left( \frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right)^3 + B \cdot \left( \log \left( \frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right)^2 + C \cdot \left( \log \left( \frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right) + D}{100}, \quad (4)$$

где А, В, С, Д – указаны в ГОСТ IECIS 60034-30-2-2021.

Для разных классов энергоэффективности и диапазонов номинальных частот данные значения корректируются.

По формуле (5), определяется КПД ТЭД, с учётом дополнительных потерь, вызванных гармониками напряжения и тока:

$$\eta_{\text{эд.пр}} = \frac{1}{1 + (1 + 0,15) \cdot \left( \frac{1}{\eta_{\text{эд}}} - 1 \right)}. \quad (5)$$

КПД трансмиссии рассчитывается по формуле (6):

$$\eta_{\text{тр}} = \eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (6)$$

Номинальная мощность ДВС, генератора, и колёс рассчитывается по формулам (7)-(9):

$$N_{\text{н.э.двс}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (7)$$

$$N_{\text{н.э.ген}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (8)$$

$$N_{\text{н.э.к}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{(1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}]. \quad (9)$$

Номинальная скорость и номинальное тяговое усилие при эксплуатации трактора при минимальной массе определяется по формулам (10) и (11):

$$v_{\text{тр.мин}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot (1 - \delta_{\text{н}}) \cdot 3.6}{m_{\text{тр.мин}} \cdot \left(1 + \frac{f_{\text{к}}}{\phi_{\text{кр н}}}\right) \cdot \phi_{\text{кр н}} \cdot g} [\text{км/ч}], \quad (10)$$

$$P_{\text{кр н.мин}} = \phi_{\text{кр н}} \cdot m_{\text{тр.мин}} \cdot g [\text{Н}]. \quad (11)$$

Расчёт значений энергонасыщенности для максимально допустимой (забалластированной) массы и для минимальной (сухой) массы выполняется по формулам (12) и (13):

$$\mathcal{E}_{\text{тр.макс}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}}}{m_{\text{тр.макс}} \cdot g} [\text{Вт/Н}], \quad (12)$$

$$\mathcal{E}_{\text{тр.мин}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}}}{m_{\text{тр.мин}} \cdot g} [\text{Вт/Н}]. \quad (13)$$

Определение требуемого передаточного числа редуктора производится исходя из условия обеспечения транспортной скорости при максимально допустимой частоте вращения вала ТЭД. В конструкции трансмиссии используется двухрядная планетарная схема с заторможенным водилом одной из ступеней. Передаточное число для такой кинематической схемы определяется по формуле (14)<sup>3</sup>:

$$u_{\text{тр}} = -(1 - (u_{\text{ряд1}} + 1) \cdot (u_{\text{ряд2}} + 1)). \quad (14)$$

Максимальная транспортная скорость трактора по кинематике, без буксования, при данном передаточном числе редуктора рассчитывается по формуле (15):

$$V_{\text{макс.д}} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n_{\text{эл.макс}} \cdot r_{\text{к}}}{30 \cdot u_{\text{тр}}} [\text{км/ч}]. \quad (15)$$

Передаточное число подбирается таким образом, чтобы обеспечивалась заданная максимальная скорость.

Построение внешней скоростной характеристики ТЭД для случая работы трактора с максимальной допустимой массой, при работе электродвигателя на номинальном режиме и при работе на кратковременной характеристике, равной  $2M_{\text{од.эд.ном}}$ , выполняется в следующем порядке.

Сила тяги на колёсах при номинальном тяговом усилии рассчитывается по формуле (16):

$$P_{\text{к.н}} = P_{\text{кр н.макс}} + P_f [\text{Н}]. \quad (16)$$

Поправка для учёта коэффициента возможной перегрузки определяется по формуле (17):

$$\Delta_{\text{к}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} \cdot v_{\text{с}}) + P_f}{P_{\text{кр н.макс}} + P_f}. \quad (17)$$

Требуемый номинальный момент электродвигателя рассчитывается по формуле (18):

$$M_{\text{н.эд.ном}} = \frac{P_{\text{кр н.макс}} \cdot \Delta_{\text{к}} \cdot r_{\text{к}}}{\eta_{\text{мех}} \cdot u_{\text{тр}} \cdot n_{\text{к}}} [\text{Нм}]. \quad (18)$$

Номинальная частота вращения электродвигателя определяется по формуле (19):

$$n_{\text{н.эл.двиг}} = \frac{N_{\text{н.э.эд}} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{н.эд.ном}} \cdot n_{\text{к}}} [\text{об/мин}]. \quad (19)$$

Формируется столбец значений частот вращения вала электродвигателя по формулам (19) и (20):

$$n_{\text{эл.двиг}, i, 0} = n_{\text{эл.мин}} + \Delta \cdot i [\text{об/мин}], \quad (20)$$

$$\Delta = \frac{(n_{\text{эл.макс}} - n_{\text{эл.мин}})}{a_{\text{к}}}. \quad (21)$$

где  $n_{\text{эл.мин}}$  – минимальные обороты вала электродвигателя, об/мин;

<sup>3</sup>Кудрявцев В. Н., Кирдяшев Ю. Н., Гинзбург Е.Г. и др. Планетарные передачи. Машиностроение. Л. 1977. 535 с.

$a_k, i$  – значения для шага расчёта, из них формируются таблицы и графики.

В сформированный столбец добавляется значение  $n_{н.эл.двиг}$ , после чего проводится сортировка значений в столбце от наименьшего к большему.

На основе полученного столбца с частотой вращения вала электродвигателя и номинальной мощности электродвигателя находится требуемый суммарный крутящий момент на всех колёсах. Расчёт выполняется с ограничением крутящего момента, необходимого для реализации заданного тягового усилия по формуле (22):

$$M_{эд.ном,i,0} = \frac{N_{н.эд} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{эл.двиг,i,0}}. \quad (22)$$

С условием если  $M_{эд.ном,i,0} > \frac{P_{кр.н.макс} \cdot \Delta_k \cdot r_k}{\eta_{мех} \cdot u_{тр}}$ , то  $M_{эд.ном,i,0} = \frac{P_{кр.н.макс} \cdot \Delta_k \cdot r_k}{\eta_{мех} \cdot u_{тр}}$  [Нм].

В результате получены значения общего номинального крутящего момента.

Значения номинального крутящего момента для одного электродвигателя, с учётом количества ведущих колёс, определяются по формуле (23):

$$M_{од.эд.ном,i,0} = \frac{M_{эд.ном,i,0}}{n_k} \text{ [Нм]}. \quad (23)$$

На основе столбцов с крутящим моментом и частотой вращения находится общая требуемая мощность по формуле (24):

$$N_{эд.ном,i,0} = M_{эд.ном,i,0} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{эл.двиг,i,0}}{60 \cdot 10^3} \text{ [кВт]}. \quad (24)$$

Мощность на одном электродвигателе рассчитывается с учётом количества ведущих колёс по формуле (25):

$$N_{од.эд.ном,i,0} = \frac{N_{эд.ном,i,0}}{n_k} \text{ [кВт]}. \quad (25)$$

Дальнейший расчёт ведётся в соответствии с методикой, изложенной в начале раздела.

### Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В ходе работы алгоритма, для примера была построена требуемая идеальная внешняя скоростная характеристика ТЭД (рисунок 1).

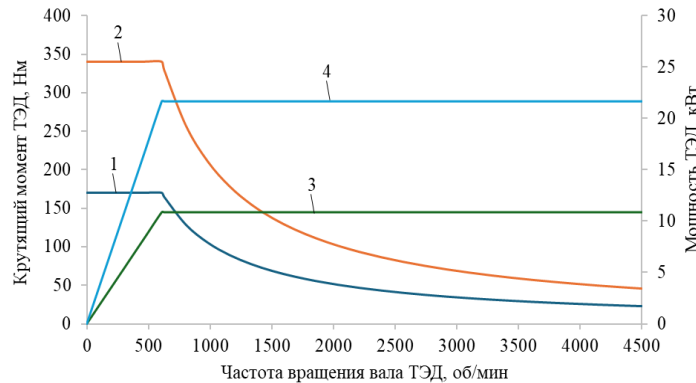


Рис. 1. Полученная идеальная внешняя скоростная характеристика ТЭД (зависимость мощности и крутящего момента от частоты вращения вала) 1 – Номинальный крутящий момент ТЭД, Нм; 2 – Кратковременный крутящий момент ТЭД, Нм; 3 – Номинальная мощность ТЭД, кВт; 4 – Кратковременная мощность ТЭД, кВт

Fig. 1. The obtained ideal external speed characteristic of the traction electric motor (dependence of power and torque on the shaft rotation speed) 1 – Nominal TEM torque, Nm; 2 – Peak TEM torque, Nm; 3 – Nominal TEM power, kW; 4 – Peak TEM power, kW

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

Выбор коэффициента диапазона эксплуатационных масс, коэффициента возможной перегрузки и расчетной максимальной скорости при номинальном тяговом усилии, а также максимальной скорости СМП, оказывает определяющее влияние на ключевой параметр тягового электродвигателя отношение максимальной частоты вращения

двигателя к частоте вращения, при которой крутящий момент перестает быть постоянным в заданном режиме работы (базовая точка работы) - CPSR.

Семейство полученных кривых (рисунок 2) показывает, как варьирование этих параметров изменяет требования к CPSR и определяет необходимый запас крутящего момента для обеспечения стабильной тяги. Основные параметры одинаковые для всех расчётов:  $\varphi_{кр.н} = 0,42$ ;  $f_k = 0,08$ ;  $r_k = 0,666$  м;  $V_{макс.д} = 40$  км/ч.

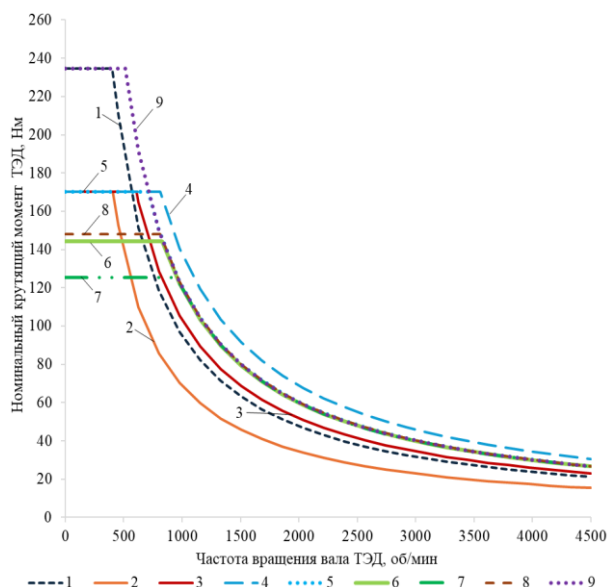


Рис. 2. Результаты расчёта тяговых характеристик ТЭД при различных комбинациях коэффициентов и скоростей для номинального режима работы

- 1 –  $P_{кр.н} = 25$  кН,  $V_{тр} = 4$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 2,28$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 44,29$  кВт,  $CPSR = 11,1$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,744$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,697$ ,  $m_{мин} = 2662$  кг,  $m_{макс} = 6070$  кг;
- 2 –  $P_{кр.н} = 18,1$  кН,  $V_{тр} = 4$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 1,66$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 32,3$  кВт,  $CPSR = 11,1$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,749$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,243$ ,  $m_{мин} = 2651$  кг,  $m_{макс} = 4400$  кг;
- 3 –  $P_{кр.н} = 18,1$  кН,  $V_{тр} = 6$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 1,66$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 48$  кВт,  $CPSR = 7,4$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,114$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,85$ ,  $m_{мин} = 2651$  кг,  $m_{макс} = 4400$  кг;
- 4 –  $P_{кр.н} = 18,1$  кН,  $V_{тр} = 8$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 1,66$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 63,8$  кВт,  $CPSR = 5,581$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,478$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,454$ ,  $m_{мин} = 2651$  кг,  $m_{макс} = 4400$  кг;
- 5 –  $P_{кр.н} = 18,1$  кН,  $V_{тр} = 7$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 1,66$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 55,9$  кВт,  $CPSR = 6,3$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,296$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,152$ ,  $m_{мин} = 2651$  кг,  $m_{макс} = 4400$  кг;
- 6 –  $P_{кр.н} = 15,4$  кН,  $V_{тр} = 8,2$  км/ч,  $v_c = 1,35$ ,  $k_{д.масс} = 1,4$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 55,5$  кВт,  $CPSR = 5,445$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,519$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,127$ ,  $m_{мин} = 2662$  кг,  $m_{макс} = 3727$  кг;
- 7 –  $P_{кр.н} = 15,4$  кН,  $V_{тр} = 8,2$  км/ч,  $v_c = 1,1$ ,  $k_{д.масс} = 1,4$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 55,5$  кВт,  $CPSR = 4,72$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,519$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,127$ ,  $m_{мин} = 2662$  кг,  $m_{макс} = 3727$  кг;
- 8 –  $P_{кр.н} = 18,1$  кН,  $V_{тр} = 7$  км/ч,  $v_c = 1,1$ ,  $k_{д.масс} = 1,66$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 55,9$  кВт,  $CPSR = 5,52$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,296$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,152$ ,  $m_{мин} = 2651$  кг,  $m_{макс} = 4400$  кг;
- 9 –  $P_{кр.н} = 25$  кН,  $V_{тр} = 5,06$  км/ч,  $v_c = 1,3$ ,  $k_{д.масс} = 2,28$ ,  $N_{н.э.ДВС} = 55,8$  кВт,  $CPSR = 8,824$ ,  $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,937$ ,  $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,137$ ,  $m_{мин} = 2662$  кг,  $m_{макс} = 6070$  кг

Fig 2. Results of calculating the traction characteristics of a traction electric motor for various combinations of coefficients and speeds for the nominal operating mode

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

Анализ семейства полученных характеристик подтверждает, что требования к диапазону регулирования ТЭД находятся в прямой зависимости от агротехнических параметров СМП. Установлено, что увеличение расчетной скорости  $v_{тр}$ , например, при коэффициенте балластирования  $K_{диап.масс} = 1,66$  позволяет снизить требуемый CPSR с 11,1 до 5,5. Это доказывает, что варьирование эксплуатационных параметров СМП в рамках предложенного алгоритма позволяет оптимизировать требования к электроприводу, исключая избыточность его характеристик. Полученные кривые являются законченным техническим заданием для этапа МКЭ-проектирования.

Обобщая результаты параметрического анализа, можно представить требуемый диапазон регулирования в виде безразмерного комплекса, выведенного из

уравнений тягового баланса (3), (18) и (19). С учетом условия постоянства мощности на валу, CPSR выражается как:

$$CPSR = \frac{V_{\text{трансп}}}{v_{\text{тр}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{д.масс}}} \cdot \frac{1}{v_c} \cdot \frac{P_{\text{кр.н}} + P_f}{P_f} \cdot \eta, \quad (26)$$

где  $P_f$  — сила сопротивления качению;

$\eta$  — общий КПД трансмиссии.

Введя безразмерные факторы:

- скоростной фактор  $\Pi_v = \frac{V_{\text{трансп}}}{v_{\text{тр}}}$ ;
- фактор балластировки  $\Pi_m = k_{\text{д.масс}}$ ;
- фактор перегрузки  $\Pi_{ov} = v_c$ ;
- фактор сцепления  $\Pi_f = \frac{P_{\text{кр.н}} + P_f}{P_f} = 1 + \frac{1}{f_k \cdot \varphi_{\text{кр}}}$ ;

получаем компактную аналитическую зависимость:

$$CPSR = \frac{\Pi_v \cdot \Pi_f \cdot \eta}{\Pi_m \cdot \Pi_{ov}}. \quad (27)$$

Данное выражение позволяет перейти от численного перебора вариантов к прямой оценке влияния каждого фактора на конструктивные требования к электродвигателю. Оно наглядно демонстрирует, что CPSR прямо пропорционален запасу по скорости и сцеплению и обратно пропорционален диапазону масс и коэффициенту перегрузки, что полностью согласуется с данными рисунка 2.

Установлено критическое влияние коэффициентов на положение базовой точки ВСХ и, как следствие, на диапазон регулирования мощности (CPSR). Это позволило предложить стратегию унификации ТЭД внутри серии: проектирование электрической машины ведется по критерию максимального крутящего момента для наиболее мощной модели. При этом показано, что один и тот же типоразмер ТЭД способен перекрыть требования всей серии: для энергонасыщенных моделей он работает в режиме с относительно низким CPSR (за счет высокой частоты вращения точки перехода), в то время как для менее мощных моделей ТЭД обеспечивает высокий CPSR, реализуя требования по тяге при ограничении со стороны мощности ДВС. Адаптация привода под конкретную модель осуществляется исключительно путем смещения базовой точки на ВСХ, что не требует пересчета электромагнитной системы в программах МКЭ.

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

Разработана алгоритмизированная методика тягового расчета, которая устраняет методологический разрыв между агротехническими требованиями к самоходной модульной платформе и параметрами внешней скоростной характеристики, необходимыми для проектирования тягового электродвигателя методом конечных элементов.

Разработанная методика базируется на допущениях об установившемся движении на горизонтальной поверхности без учёта сопротивления воздуха и инерционных сил, неизменности коэффициента использования веса  $\varphi_{\text{кр}}$  при балластировании и отсутствии расчёта накопителей энергии, ориентирована на СМП с равновеликими колёсами по схеме 4К46 и индивидуальным приводом, а получаемые тяговые характеристики являются идеализированными.

Установлены аналитические зависимости между агротехническими параметрами (диапазон балластировки, рабочая скорость, тяговое усилие) и требуемым диапазоном регулирования мощности (CPSR) тягового электродвигателя, обобщенные в виде безразмерного комплекса. Увеличение расчетной рабочей скорости с 4 до 8 км/ч при фиксированном коэффициенте диапазона эксплуатационных масс, равном 1,66, снижает требуемый CPSR с 11,1 до 5,5.

Обоснована стратегия унификации тяговых электродвигателей внутри модельного ряда, при которой один типоразмер электрической машины способен обеспечить требования всей серии за счет программного смещения базовой точки на внешней скоростной характеристике без пересчета электромагнитной системы.

Введение в методику коэффициента диапазона эксплуатационных масс и коэффициента возможной перегрузки позволяет перейти от дискретного задания двух масс (без балласта и с балластом) к непрерывному диапазону, что повышает точность

обоснования требований к электроприводу.

Полученная в результате расчета внешняя скоростная характеристика является завершённым техническим заданием для этапа проектирования тягового электродвигателя методом конечных элементов в специализированных САЕ-пакетах.

Направления дальнейших исследований предполагают учет параметров накопителей энергии, экспериментальную верификацию методики, обоснование коэффициентов и структуры модельного ряда СМП на основе анализа существующих тракторов, введение безразмерных комплексов для оценки параметров привода, а также построение тяговых характеристик с учетом удельного расхода топлива и КПД трансмиссии в различных режимах.

### Литература

1. Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами / А. Ю. Измайлов, А. В. Букреев, Р. Ю. Соловьев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 4-12. – DOI 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. – EDN XYJQJR.
2. Актуальность разработки высокотехнологичных тракторов тяговых классов 0,6-2 / Р. Ю. Соловьев, С. В. Черанев, С. Б. Карякин [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 11(269). – С. 14-17. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-11-14-17. – EDN ZZDKSY.
3. Даненков, И. Д. Выбор типа электродвигателя для применения в качестве тягового на тракторной технике / И. Д. Даненков, Р. Р. Соловьев // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств : Сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-технической конференции, Саратов, 11 апреля 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2024. – С. 191-198. – EDN GOYBNX.
4. Evaluation of energy-economic parameters of tractor with electrically driven power unit / A. V. Bizhaev, N. S. Devyanin, V. L. Chumakov [et al.] // E3S Web of Conferences : II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023), Tashkent, 13–15 сентября 2023 года. Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202344303004. – EDN BMLATV
5. Развитие рынка высокоавтоматизированной сельскохозяйственной техники. Барьеры и пути их решения / Р. Ю. Соловьев, С. В. Черанев, А. В. Коломейченко [и др.] // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 27-34. – EDN QJVQCY.
6. Повышение эксплуатационной надежности транспортных средств сельскохозяйственного назначения с электромеханической трансмиссией / А. П. Споров // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 1. – С. 118-126. – DOI 10.28983/asj.y2026i1pp118-126. – EDN GLCSZM.
7. Перспективы развития тракторостроения в России / О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, Н. Н. Пуляев, М. М. Прокофьев // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 5(311). – С. 2-7. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-2-7. – EDN UKRERY.
8. Liu X. et al. A robust design of the model-free-adaptive-control-based energy management for plug-in hybrid electric vehicle // Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – P. 7467.
9. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве / А. Ю. Измайлов, А. С. Дорохов, И. А. Старостин, А. В. Ещин // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 4-10. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. – EDN FWIYAM.
10. Kotal S. et al. Performance analysis of Electric Vehicles in terms of Constant Power Speed Range (CPSR) // American Journal of Advanced Computing (AJAC). – 2024. – Т. 2. – №. 4. – P. 12.
11. Geng L. et al. An Axial Split Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Wide Constant Power Speed Range and High Efficiency Range // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2024. – Т. 72. – №. 4. – Pp. 4019-4029.
12. Mocera F., Somà A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 12. – P. 3055.
13. Li Z. et al. Combined acceleration slip regulation for multi-wheel distributed electric drive vehicles considering torque loss factor // Control Engineering Practice. – 2024. – Т. 146. – P. 105893.
14. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для



трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Е. Н. Ильченко // *Агроинженерия*. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 63-70. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. – EDN LKJWSF.

15. Методика расчета емкости аккумуляторной батареи мобильного транспортного средства с электроприводом на основе Т16М / Л. Ю. Юферев, А. П. Споров // *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 3. – С. 131-139. – DOI 10.28983/asj.y2024i3pp131-139. – EDN QTCEEO.

16. Экспериментальные исследования МЭС тягового класса 0,6 с автономным электроприводом / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2025. – Т. 20, № 4(80). – С. 85-92. – DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-85-92. – EDN GGOEXN

17. Методика определения параметров схемы замещения электромеханического модуля с повышенным электромагнитным моментом / А. Г. Городнов, В. Ю. Корнилов, Е. Ю. Федоров // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 185-197. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197. – EDN ХКВСWQ.

18. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля / А. Н. Цветков, Н. Ш. Доан, Д. А. Ярославский // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 144-157. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157. – EDN USMMDW.

19. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера / Д. В. Дзюин, Г. А. Скопин, А. Н. Комков, В. В. Дмитриева // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 49-62. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62. – EDN IREOEO.

20. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты / Р. Р. Гибадуллин, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 164-175. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175. – EDN WZGQOI.

21. Тяговый расчет модульного энерготехнологического средства с учетом кинематического несоответствия привода ведущих осей / А. В. Лавров, В. А. Воронин, М. В. Сидоров, И. А. Пехальский // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 30-36. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36. – EDN UQKYSF.

22. Синхронный реактивный двигатель без магнитов класса энергоэффективности IE5 / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, В. М. Казакбаев // *Электротехника*. – 2019. – № 6. – С. 40-46. – EDN PBKMIID.

23. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции / Г. М. Кутьков, В. Н. Сидоров, М. В. Сидоров // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – 2016. – № 2(6). – С. 37-46. – EDN WPNCQL.

24. Renius K. T. *Fundamentals of Tractor Design*. Springer. Cham. 2020. 287 с. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32804-7>.

25. Балластирование как способ повышения эксплуатационных свойств трактора / Г. А. Иовлев, И. И. Голдина // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2022. – Т. 69, № 1(46). – С. 44-54. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-44-54. – EDN ZVTFSG.

#### Авторы публикации

**Соловьев Рудольф Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по научно-технологическому развитию, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID\**: <https://orcid.org/0000-0001-7913-9408>. *Email*: rudsol@mail.ru.

**Соловьев Роман Рудольфович** – младший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID\**: <https://orcid.org/0009-0005-9934-2514>. *Email*: soll.rom@yandex.ru.

**Букреев Алексей Валерьевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID\**: <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>. *Email*: vim@aleksey-bukreev.ru.

## References

1. Electronic control system for a series hybrid tractor with in-wheel motors / A. Yu. Izmaylov, A. V. Bukreev, R. Yu. Solovyev [et al.] // *Agricultural Machinery and Technologies*. – 2025. – Vol. 19, No. 4. – P. 4-12. – DOI 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. – EDN XYJQJR.
2. Relevance of the Development of High-Tech Tractors of Traction Classes 0.6–2 / R. Yu. Solovyev, S. V. Cheranov, S. B. Karjakin [et al.] // *Techniques and Equipment for the Village*. – 2019. – No. 11(269). – P. 14-17. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-11-14-17. – EDN ZZDKSY.
3. Choosing the type of electric motor for use as a traction motor on tractor equipment / I. D. Danenkov, R. R. Solovyev // *Current Issues in the Organization of Road Transport, Traffic Safety and Operation of Vehicles: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the XIX International Scientific and Technical Conference*. – Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2024. – P. 191-198. – EDN GOYBNX.
4. Evaluation of Energy-Economic Parameters of Tractor with Electrically Driven Power Unit / A. V. Bizhaev, N. S. Devyanin, V. L. Chumakov [et al.] // *E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023)*. – Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202344303004. – EDN BMLATV.
5. Development of market of highly automated agricultural machinery. Barriers and their solutions / R. Yu. Solovyev, S. V. Cheranov, A. V. Kolomeychenko [et al.] // *Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects*. – 2021. – No. 2(30). – P. 27-34. – EDN QJVQCY.
6. Improving the operational reliability of agricultural vehicles with electromechanical transmission / A. P. Sporov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2026. – No. 1. – P. 118-126. – DOI 10.28983/asj.y2026i1pp118-126. – EDN GLCSZM.
7. Prospects for the development of tractor construction in Russia / O. N. Didmanidze, E. P. Parlyuk, N. N. Pulyaev, M. M. Prokofyev // *Techniques and Equipment for the Village*. – 2023. – No. 5(311). – P. 2-7. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-2-7. – EDN UKRERY.
8. Liu X. et al. A robust design of the model-free-adaptive-control-based energy management for plug-in hybrid electric vehicle // *Energies*. – 2022. – T. 15. – №. 20. – P. 7467.
9. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production / A. Yu. Izmaylov, A. S. Dorokhov, I. A. Starostin, A. V. Eshchin // *Agricultural Engineering*. – 2024. – Vol. 26, No. 1. – P. 4-10. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. – EDN FWIYAM.
10. Kotal S. et al. Performance analysis of Electric Vehicles in terms of Constant Power Speed Range (CPSR) // *American Journal of Advanced Computing (AJAC)*. – 2024. – T. 2. – №. 4. – P. 12.
11. Geng L. et al. An Axial Split Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Wide Constant Power Speed Range and High Efficiency Range // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2024. – T. 72. – №. 4. – Pp. 4019-4029.
12. Mocera F., Somà A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications // *Energies*. – 2020. – T. 13. – №. 12. – P. 3055.
13. Li Z. et al. Combined acceleration slip regulation for multi-wheel distributed electric drive vehicles considering torque loss factor // *Control Engineering Practice*. – 2024. – T. 146. – P. 105893.
14. Justification of the parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics / Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev, E. N. Ilchenko // *Agricultural Engineering*. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. 63-70. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. – EDN LKJWSF.
15. Methodology of calculation of battery capacity of mobile vehicle with electric drive on the basis of t16m / L. Yu. Yuferev, A. P. Sporov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2024. – No. 3. – P. 131-139. – DOI 10.28983/asj.y2024i3pp131-139. – EDN QTCEEO.
16. Experimental studies of mobile power vehicle of 0.6 traction class with an autonomous electric drive / Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev [et al.] // *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. – 2025. – Vol. 20, No. 4(80). – P. 85-92. – DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-85-92. – EDN GGOEXN.
17. Method for determining the parameters of a substitution scheme for an electromechanical module with an increased electromagnetic moment / A. G. Gorodnov, V. Yu. Kornilov, E. Yu. Fedorov // *News of higher educational institutions. Problems of energy*. – 2022. – Vol. 24, No. 3. – P. 185-197. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197. – EDN XKBCWQ.
18. Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using the analytical control system / A. N. Tsvetkov, N. Sh. Doan, D. A. Yaroslavsky // *News of higher*

educational institutions. Problems of energy. –2022. –Vol. 24, No. 3. –P. 144-157. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157. – EDN USMMDW.

19. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor / D. V. Dzyuin, G. A. Skopin, A. N. Komkov, V. V. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Problems of energy. –2025. –Vol. 27, No. 2. –P. 49-62. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62. – EDN IREOEO.

20. A stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators / R. R. Gibadullin, M. F. Nizamiev, I. V. Ivshin [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. – 2022. –Vol. 24, No. 1. –P. 164-175. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175. – EDN WZGQOI.

21. Traction calculation for modular energotechnological unit given kinematic mismatch of driving axles / A. V. Lavrov, V. A. Voronin, M. V. Sidorov, I. A. Pekhalsky // Agricultural Machinery and Technologies. –2022. –Vol. 16, No. 2. –P. 30-36. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36. – EDN UQKYSF.

22. Energy efficiency class ie5 magnet-free synchronous reluctance motor / V. A. Prakht, V. A. Dmitrievskii, V. M. Kazakbaev // Russian Electrical Engineering. –2019. –No. 6. –P. 40-46. – EDN PBKMID.

23. Calculation of engine power and weight of a towing power concept tractor / G. M. Kutkov, V. N. Sidorov, M. V. Sidorov // Electronic Journal: Science, Technology and Education. – 2016. –No. 2(6). –P. 37-46. – EDN WPNCQL.

24. Fundamentals of Tractor Design / K. T. Renius // Springer. –Cham, 2020. –287 p. – DOI 10.1007/978-3-030-32804-7.

25. Ballasting as the way of improving the operational properties of the tractor / G. A. Iovlev, I. I. Goldina // Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro–Industrial Complex. –2022. –Vol. 69, No. 1(46). –P. 44-54. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-44-54. – EDN ZVTFSG.

#### Authors of the publication

**Rudolf Yu. Solovyov** – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0001-7913-9408>. Email: rudsol@mail.ru.

**Roman R. Solovyov** –Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID\*: <https://orcid.org/0009-0005-9934-2514>. Email: soll.rom@yandex.ru.

**Aleksey V. Bukreev** –Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>. Email: vim@aleksey-bukreev.ru.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 17.02.2026 г.

**Отредактировано** 01.04.2026 г.

**Принято** 14.04.2026 г.



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВЕНТИЛЯТОРОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С АНАЛИТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКОЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Масков<sup>1</sup> Л.Р., Сафин<sup>2</sup> А.Р.

<sup>1</sup>ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
maskov.linar@mail.ru, Sarkazan@bk.ru

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа с дискретным управлением электроприводами вентиляторов широко применяются на газотранспортных предприятиях, однако существующие схемы дискретного управления характеризуются повышенным энергопотреблением и недостаточной точностью регулирования. Отсутствие аналитически обоснованных критериев оценки теплотехнического состояния секций АВО дополнительно снижают эффективность управления при ухудшении теплообменных характеристик оборудования. **ЦЕЛЬ.** Разработка аналитически обоснованной методики оптимального дискретного управления электроприводами вентиляторов АВО газа, обеспечивающей снижение энергопотребления при сохранении требуемой эффективности охлаждения и стабильности температурного режима. **МЕТОДЫ.** Использованы аналитические методы теплотехнического анализа, регрессионное моделирование паспортных характеристик и методы оптимизации режимов многоступенчатых систем охлаждения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получен интегральный показатель тепловой эффективности многоступенчатых систем охлаждения и предложен критерий оценки теплотехнического состояния АВО газа, предназначенный для использования в системах управления электроприводами вентиляторов. Разработан принцип послойного включения вентиляторов и сформулирован объединённый критерий оптимизации, позволяющий совместно учитывать энергосбережение и стабильность температурного режима. Обоснована возможность снижения энергопотребления без ухудшения теплотехнических характеристик. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложенный подход позволяет повысить энергетическую эффективность и адаптивность дискретных систем управления электроприводами вентиляторов АВО газа и обеспечивает возможность внедрения в существующие установки охлаждения газа без модернизации аппаратной части.

**Ключевые слова:** коэффициент регенерации; интегральный показатель эффективности теплообменного аппарата; регрессионная модель тепловой эффективности; интегральный диагностический критерий; принцип послойного управления вентиляторами; двухцелевая оптимизация; объединённый критерий оптимизации.

**Для цитирования:** Масков Л.Р., Сафин А.Р. Интеллектуальная система управления электроприводами вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа с аналитической диагностикой теплотехнического состояния // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 63-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-63-85.

## OPTIMIZATION OF DISCRETE CONTROL OF ELECTRIC ACTUATORS OF VENTILATORS OF GAS AIR COOLING APPLIANCES WITH ANALYTICAL DIAGNOSTICS OF THERMAL CONDITION

Maskov<sup>1</sup> L.R., Safin<sup>2</sup> A.R.

<sup>1</sup>Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russia.

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
Maskov.linar@mail.ru, Sarkazan@bk.ru

**Abstract:** RELEVANCE. Gas air-cooling units (ACU) with discrete control of fan electric drives are widely used in gas transportation facilities, but existing discrete control schemes are characterized by increased energy consumption and insufficient regulation accuracy. The lack of analytically substantiated criteria for assessing the thermal condition of ACU sections further reduces the efficiency of control when the heat exchange characteristics of the equipment deteriorate. PURPOSE. Development of an analytically substantiated methodology for optimal discrete control of gas ACU fan electric drives, which ensures reduced energy consumption while maintaining the required cooling efficiency and temperature stability. METHODS. Analytical methods of thermal engineering analysis, regression modeling of passport characteristics, and methods of optimizing the modes of multi-stage cooling systems were used. RESULTS. An integral indicator of the thermal efficiency of multi-stage cooling systems has been obtained, and a criterion for assessing the thermal technical state of gas cooling towers has been proposed for use in fan drive control systems. A layer-by-layer fan activation principle has been developed, and a combined optimization criterion has been formulated that allows for the simultaneous consideration of energy savings and temperature stability. The possibility of reducing energy consumption without compromising thermal technical characteristics has been substantiated. CONCLUSION. The proposed approach allows to increase the energy efficiency and adaptability of discrete control systems for electric drives of gas ACU fans and provides the possibility of implementation in existing gas cooling systems without hardware upgrades.

**Keywords:** regeneration coefficient; integral indicator of heat exchanger efficiency; regression model of thermal efficiency; integral diagnostic criterion; layer-by-layer fan control principle; dual-objective optimization; general optimization criterion.

**For citation:** Maskov L.R., Safin A.R. Optimization of discrete control of electric actuators of ventilators of gas air cooling appliances with analytical diagnostics of thermal condition. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 63-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-63-85.

### **Введение (Introduction)**

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа являются важнейшими элементами технологического цикла в газотранспортных системах. Их основное назначение заключается в обеспечении требуемых температурных параметров газа после компримирования и перед подачей в магистральный трубопровод. От эффективности работы АВО напрямую зависят энергетические затраты предприятия, надёжность функционирования оборудования и стабильность режимов транспортировки газа. В большинстве действующих газотранспортных объектов ПАО «Газпром» АВО эксплуатируются в течение десятков лет и оснащены вентиляторами с нерегулируемыми электроприводами. Управление их работой, как правило, осуществляется дискретным способом с помощью ступенчатого включения и отключения отдельных вентиляторов, число которых определяется оператором индивидуально в зависимости от температуры охлаждаемого газа и окружающей среды. Дискретный способ управления получил широкое распространение благодаря простоте реализации, высокой надёжности и невысокой стоимости оборудования, но имеет ряд известных недостатков [1-2]: 1) неточность поддержания температуры; 2) низкая энергетическая эффективность. Кроме того, частые пуски электродвигателей с длительными пусковыми токами вызывают повышенные электромеханические нагрузки, сокращая ресурс электрооборудования, и негативно влияют на питающую сеть [3].

Анализ литературы [4-11] показывает, что современное развитие систем управления АВО связано с интеграцией интеллектуальных алгоритмов и адаптивных моделей, обеспечивающих оптимальное распределение нагрузки между вентиляторами и повышение общей энергетической эффективности установок охлаждения газа. Вместе с тем анализ существующих исследований показывает наличие ряда нерешённых вопросов. В большинстве работ, посвящённых управлению АВО газа, основное внимание уделяется либо частотно-регулируемым электроприводам, либо эмпирическим и вычислительным методам оптимизации, что ограничивает возможность их применения на действующих объектах с нерегулируемыми электроприводами. Недостаточно разработаны аналитические модели, позволяющие установить взаимосвязь между последовательным включением вентиляторов и распределением тепловой нагрузки в многоступенчатых схемах охлаждения. Отсутствуют интегральные показатели, которые могли бы

одновременно использоваться для диагностики теплотехнического состояния секций и для синтеза алгоритмов дискретного управления электроприводами в условиях неполной измеримости параметров. Указанные пробелы затрудняют построение энергоэффективных и адаптивных систем управления электроприводами вентиляторов АВО газа и определяют необходимость разработки аналитически обоснованного подхода, восполняющего данные ограничения. Несмотря на развитие частотно-регулируемого электропривода, дискретное управление остаётся наиболее распространённым методом в эксплуатации АВО, особенно на объектах, где модернизация оборудования экономически нецелесообразна. Поэтому повышение эффективности и адаптивности именно дискретных систем управления представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Решение этой задачи требует разработки алгоритмов, обеспечивающих оптимальный выбор числа включённых вентиляторов и последовательности их переключений по критерию минимума расхода электроэнергии при обеспечении заданной температуры газа на выходе, учитывающих нелинейные зависимости теплообмена и инерционность тепловых процессов в АВО газа.

Разработка алгоритмов оптимального дискретного управления электроприводами вентиляторов АВО газа позволит обеспечить:

- 1) возможность внедрения в существующие системы управления без модернизации силового оборудования;
- 2) повышение надёжности электроприводов за счёт сокращения числа пусков и равномерного распределения температурного профиля по длине АВО;
- 3) снижение энергопотребления электроприводов вентиляторов без ухудшения тепловых характеристик АВО газа.

Целью настоящей работы является оптимизация режима работы электроприводов вентиляторов АВО газа с учётом неравномерного распределения тепловой нагрузки в многоступенчатых системах охлаждения по критериям минимума потребления электроэнергии и отклонения фактической эффективности от заданного режима с учётом фактического теплотехнического состояния секций, определяемого диагностическим показателем.

Научная значимость работы заключается в развитии теоретических основ анализа и оптимизации электротехнических систем с групповыми асинхронными электроприводами вентиляторов АВО газа. В работе впервые получено аналитическое выражение интегрального показателя эффективности многоступенчатой системы охлаждения, используемого в качестве управляющего параметра электротехнической системы управления электроприводами. Предложены интегральный критерий теплотехнического состояния и секционный диагностический показатель, обеспечивающие формирование диагностической информации для систем управления электроприводами в условиях неполной измеримости параметров. Разработанные аналитические модели и критерии формируют математическую основу синтеза алгоритмов дискретного управления электротехническими комплексами АВО газа, направленных на повышение энергетической эффективности и надёжности электроприводов.

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

##### *Вывод общего коэффициента регенерации при двухступенчатом охлаждении*

Важнейшим показателем эффективности теплообмена между теплоносителем и охлаждающим воздухом в АВО газа является коэффициент регенерации (КР) [12]. КР показывает, насколько эффективно АВО охлаждает теплоноситель, то есть какую долю максимально возможного охлаждения оно реально обеспечивает и представляет собой отношение разности температур на входе и выходе из АВО к его тепловому напору:

$$\eta = \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}}{t_{\text{вх}} - t_{\text{oc}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{вх}}$  – температура на входе АВО;  $t_{\text{вых}}$  – температура на выходе АВО;  $t_{\text{oc}}$  – температура окружающей среды (воздух).

При последовательном соединении АВО совокупная эффективность всей системы формируется из локальных КР, которые показывают насколько эффективно работает каждая отдельная часть (секция) теплообменного аппарата, обдуваемая своим вентилятором. Рассмотрим схему двухступенчатого охлаждения при последовательном соединении АВО типа 2АВГ-75 (рис.1).

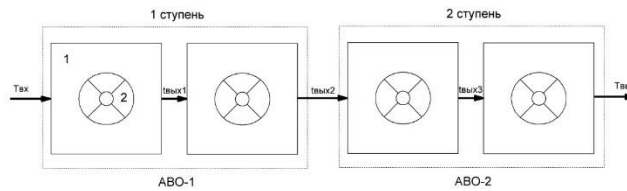


Рис.1. Схематическое изображение двухступенчатой схемы охлаждения: 1 – теплообменная секция; 2 – вентилятор

Fig. 1. Schematic representation of a two-stage cooling system: 1 – heat exchange section; 2 – fan

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

Локальные КР в теплообменных секциях в соответствии с (1) определяются как:

$$\eta_1 = \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых1}}}{t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}}; \eta_2 = \frac{t_{\text{вых1}} - t_{\text{вых2}}}{t_{\text{вых1}} - t_{\text{ос}}}; \eta_3 = \frac{t_{\text{вых2}} - t_{\text{вых3}}}{t_{\text{вых2}} - t_{\text{ос}}}; \eta_4 = \frac{t_{\text{вых3}} - t_{\text{вых}}}{t_{\text{вых3}} - t_{\text{ос}}} . \quad (2)$$

Из выражений (2) следует, что выходные температуры газа из каждой секции охлаждения одновременно являются входными температурами для последующих секций. Это приводит к взаимозависимости уравнений теплообмена в каждой секции, что значительно осложняет прямое аналитическое определение промежуточных температур между вентиляторами. Ввиду нелинейного характера изменения температурного напора и различий в локальных условиях теплообмена (расход, эффективность теплоотдачи), расчёт каждой промежуточной температуры требует итерационного решения системы уравнений теплового баланса. Такой подход затруднителен при анализе многоступенчатых схем охлаждения газа. Для упрощения анализа целесообразно использовать интегральный подход, при котором эффективность всей системы будет описываться единым выражением, что позволит учитывать совокупный эффект работы всех ступеней без необходимости поэтапного определения промежуточных температур. Интегральный подход даст возможность оценить тепловую эффективность системы в целом и провести энергетическую оптимизацию без усложнения расчётной схемы.

При дальнейшем теоретическом анализе и расчётах тепловой эффективности АВО принимаются следующие допущения, упрощающие математическое описание:

- 1) все теплообменники идентичны, то есть КР для каждой секции считаются одинаковыми;
- 2) температуры, массовые расходы и тепловые потоки считаются стационарными, то есть не изменяются во времени;
- 3) тепловые потери в окружающую среду отсутствуют, что позволяет рассматривать термодинамическую систему как замкнутую;
- 4) удельные теплоёмкости метана и воздуха принимаются постоянными величинами в рассматриваемом диапазоне температур;
- 5) коэффициент теплопередачи внутри каждой секции постоянен, что исключает влияние температурных и скоростных градиентов на поверхности теплообмена;
- 6) метан и воздух сохраняют агрегатное состояние в процессе теплообмена, то есть не происходит фазовых переходов;
- 7) неравномерность обдува и распределения температуры по длине труб и между секциями пренебрегается, процесс рассматривается как равномерный;
- 8) температуры и скорости потоков усреднены по поперечному сечению, что позволяет использовать одномерное приближение при описании тепловых процессов.

Для нахождения выходной температуры первой секции выразим ее через первое выражение (2):

$$t_{\text{вых1}} = t_{\text{вх}} - \eta \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}) = t_{\text{ос}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}})(1 - \eta). \quad (3)$$

Тогда выходная температура из второй секции с учетом подстановки выходной температуры из первой секции (3) примет вид:

$$t_{\text{вых2}} = t_{\text{ос}} + (t_{\text{ос}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}})(1 - \eta) - t_{\text{ос}})(1 - \eta) = t_{\text{ос}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}})(1 - \eta)^2. \quad (4)$$

При дальнейшем решении выходные температуры из третьей и четвертой секции принимают вид рекуррентной зависимости:

$$t_{\text{вых}i} = t_{\text{ос}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}})(1 - \eta)^i, \text{ где } i \neq 0 \quad (5)$$

где  $i$  – номер секции.

Если (5) подставить в (2) и упростить, то получим компактное аналитическое выражение для определения КР:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta)^i, \text{ где } (1 - \eta) \neq 0 \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой интегральный показатель тепловой эффективности, который описывает суммарную эффективность теплообмена всех секций многоступенчатых схем АВО газа.

*Вывод тепловой нагрузки АВО газа с помощью интегрального показателя*

Коэффициент регенерации можно определить через отношение тепловых нагрузок:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка;  $Q_{\text{max}}$  – максимальная тепловая нагрузка.

Максимальная нагрузка определяется:

$$Q_{\text{max}} = G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}), \quad (8)$$

где  $G_{\text{газ}}$  – массовый расход газа (метан);  $c_{\text{газ}}$  – теплоемкость газа.

Если выразить  $Q_i$  из (7), то получим:

$$Q = \eta \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}). \quad (9)$$

Если сделать необходимые преобразования из (6), то выражение (9) для нахождения тепловой нагрузки на  $i$ -ой секции примет вид:

$$Q_i = \eta \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}) \cdot (1 - \eta)^{i-1}. \quad (10)$$

Выражения (6) и (10) последовательно учитывают вклад каждого вентилятора в секции в общий процесс теплообмена, что позволяет более точно описывать изменение тепловой эффективности при включении или отключении вентиляторов и, следовательно, служит средством оценки тепловых нагрузок и математической основой для оптимизации дискретного управления.

Проведем графический анализ, полученных выражений (6) и (10) для двухступенчатой схемы охлаждения АВО газа. На графике (рис.2) представлены распределение относительных тепловых нагрузок ( $Q_{\text{отн}}$ ) по секциям и изменение интегрального коэффициента тепловой эффективности КР ( $\eta_{\text{общ}}$ ) при значении локального КР ( $\eta = 0,5$ ) для одной секции (все секции и аппараты одинаковые). Анализ графика показывает, что каждая последующая секция обеспечивает всё меньший прирост передаваемой теплоты, что обусловлено снижением температурного напора между газом и воздухом по мере последовательного охлаждения в аппарате. Уже при четырёх работающих вентиляторах эффективность системы приближается к предельному значению (94 %), при этом увеличение числа вентиляторов даёт незначительное улучшение тепловой эффективности при существенном росте энергопотребления, что позволяет обосновать рациональное количество работающих вентиляторов при оптимизации режима работы АВО газа.

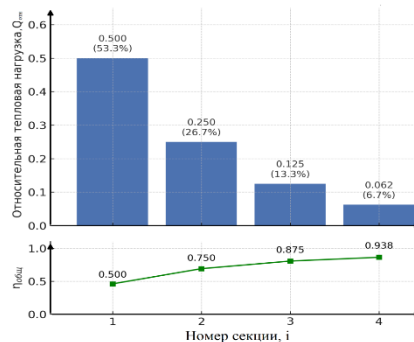


Рис.2. Распределение тепловой нагрузки и КР при двухступенчатом охлаждении Fig. 2. Distribution of thermal load and regeneration coefficient (RC) during two-stage cooling

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

*Сравнительный анализ интегрального метода и NTU-модели*

Для проверки точности предложенного интегрального подхода был выполнен сравнительный анализ с методом  $NTU$  (Number of Transfer Units), который широко используется в инженерной практике для оценки работы теплообменных аппаратов с перекрестным током. Подход  $NTU$  представляет собой аналитическую методику, позволяющую определить эффективность теплообменного аппарата через связь между коэффициентом регенерации и числом единиц переноса ( $NTU$ ). Метод предназначен для



случаев, когда выходные температуры потоков неизвестны, а расчёт опирается лишь на их входные параметры и конструктивно-эксплуатационные характеристики оборудования [13–15].

Метод  $NTU$  использует зависимость КР для теплообменного аппарата с перекрестным током [16]:

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{1}{s} \cdot NTU^{0,22} \cdot (\exp(-s \cdot NTU^{0,78}) - 1)\right), \quad (11)$$

где  $NTU$  – число единиц переноса, которое определяется как:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}}}, \quad (12)$$

где  $U$  – коэффициент теплопередачи;  $A$  – площадь теплообменной поверхности секции;  $s$  – отношение теплоемкостей потоков для теплообменника:

$$s = \frac{C_{\text{газ}}}{C_{\text{возд}}}, \quad (13)$$

где  $C_{\text{газ}}$  – теплоемкость потока метана,  $C_{\text{возд}}$  – теплоемкость потока воздуха.

Для оценки чувствительности интегрального метода к неоднородности условий теплообмена была проведена серия расчётов, в которых локальная эффективность отдельных секций задавалась различными значениями, формирующими контролируемое распределение КР по ступеням. Такой подход моделирует типичную ситуацию эксплуатации АВО газа, когда геометрически одинаковые секции демонстрируют различную тепловую эффективность вследствие неодинаковой степени загрязнения, неравномерности обдува, частичных засорений воздушного тракта и других эксплуатационных факторов. Введение неоднородных значений КР позволяет моделировать реалистичное распределение тепловых нагрузок вдоль секций и тем самым проверить устойчивость интегрального метода при условиях, существенно отличающихся от идеализированной равномерной схемы охлаждения, принятой при допущениях. Для сравнения методов рассмотрим 3 варианта распределения локальных КР по секциям:

- 1) вариант 1:  $\eta_i = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  (шаг 0,1);
- 2) вариант 2:  $\eta_i = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$  (шаг 0,2);
- 3) вариант 3:  $\eta_i = 0,1; 0,35; 0,6; 0,85$  (шаг 0,25).

Для интегрального метода КР средний по секциям и общий КР определяется как:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \eta_i; \eta_{\text{общ,интегр}} = 1 - (1 - \eta_{\text{ср}})^4. \quad (14)$$

Тогда для метода  $NTU$ :

$$\eta_{\text{общ,NTU}} = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \eta_i). \quad (15)$$

Ошибка между методами:

$$\Delta = \eta_{\text{общ,интегр}} - \eta_{\text{общ,NTU}}; \delta = \frac{\Delta}{\eta_{\text{общ,NTU}}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Сравнение интегрального метода и  $NTU$ -модели при различных КР по секциям

*Comparison of the integral method and  $NTU$  model at different regeneration rates for sections*

| Вариант | $\eta_i$             | $\eta_{\text{ср}}$ | $\eta_{\text{общ,NTU}}$ | $\eta_{\text{общ,интегр}}$ | $\Delta$ | $\delta, \%$ |
|---------|----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|----------|--------------|
| 1       | 0,1; 0,2; 0,3; 0,4   | 0,250              | 0,698                   | 0,684                      | -0,014   | -2,0         |
| 2       | 0,1; 0,3; 0,5; 0,7   | 0,400              | 0,906                   | 0,870                      | -0,035   | -3,9         |
| 3       | 0,1; 0,35; 0,6; 0,85 | 0,475              | 0,965                   | 0,924                      | -0,041   | -4,2         |

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

Проведённый анализ секций показал, что интегральный метод демонстрирует высокую устойчивость к изменению тепловых характеристик секций. Несмотря на существенную разницу между КР отдельных секций, общее расхождение между интегральным показателем и методом  $NTU$  составляет 2-4 %. Это свидетельствует о том, что интегральная модель корректно усредняет влияние неоднородности и обеспечивает реалистичную оценку суммарной эффективности многосекционного теплообменного

аппарата. Результаты показывают, что при умеренном распределении КР (0,10-0,40) интегральный метод практически совпадает с методом NTU, а при существенном разбросе (0,10-0,70 и 0,10-0,85) наблюдаемое отклонение не превышает типичных эксплуатационных погрешностей измерений температуры, что адекватно отражает изменение общего КР теплообменного аппарата. Полученные результаты подтверждают, что интегральный метод может использоваться не только для идеализированной равномерной структуры секций, но и для анализа реальных установок охлаждения газа с различной степенью загрязнённости и неодинаковой тепловой нагрузкой.

Важным фактором, влияющим на точность модели теплообменного аппарата, является отношение теплоёмкостей потоков  $s$  (13). Для АВО газа с перекрёстным током (11) величина  $s$  определяет, какая из сторон аппарата ограничивает перенос теплоты, и существенно влияет на эффективность, получаемую по NTU-методу. В АВО газа значение  $s$  изменяется в широких пределах в зависимости от расхода воздуха, степени его нагрева, режима работы вентиляторов и текущего состояния воздушного тракта. Поэтому даже одинаковые секции из одной установки могут демонстрировать разные значения эффективности при идентичной геометрии. Чтобы учесть эту физическую особенность, в работе дополнительно проведено сравнение интегрального показателя и NTU-метода для различных значений  $s$ . Такой подход позволяет количественно оценить, как изменение теплоёмкости холодного потока влияет на точность приближения интегрального метода, и определить диапазон условий, при которых он остаётся согласованным с NTU-моделью. Это также даёт возможность проверить, насколько устойчив интегральный показатель к вариациям теплофизических параметров и может ли он корректно описывать реальные эксплуатационные режимы, где  $s$  не является постоянным и меняется от секции к секции.

Чтобы воспроизвести такую ситуацию в численном анализе, были рассмотрены различные значения  $s$  с использованием опытно-экспериментальных данных для АВО газа типа 2АВГ-75С (табл.2) [17].

Таблица 2

Table 2

Теплотехнические характеристики АВО газа типа 2АВГ-75

*Thermal characteristics of 2AVG-75 gas air cooling apparatus*

| Параметр                             | Показатель       | Размерность            | Значение |
|--------------------------------------|------------------|------------------------|----------|
| коэффициент теплопередачи            | $U$              | Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | 16       |
| площадь теплообмена для одной секции | $A$              | м <sup>2</sup>         | 4969     |
| теплоемкость газа                    | $c_{\text{газ}}$ | Дж/(кг·К)              | 2200     |
| массовый расход газа                 | $G_{\text{газ}}$ | кг/с                   | 50       |

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

Используя выражения (11) и (12), выполним сравнение интегрального и NTU метода на основе экспериментальных данных при разбросе  $s$  теплообменного аппарата от 0,1 до 0,9 (шаг 0,1) (табл.3).

Таблица 3

Table 3

Сравнение интегрального метода и NTU-модели при различных отношениях теплоёмкостей потоков

*Comparison of the integral methods and NTU model for different heat capacity ratios of the flows*

| $s$ | $\eta_{i,\text{интегр}}$ | $\eta_{\text{общ,интегр}}$ | $\eta_{i,\text{NTU}}$ | $\eta_{\text{общ,NTU}}$ | $\delta, \%$ |
|-----|--------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|
| 0,1 | 0,515                    | 0,945                      | 0,502                 | 0,939                   | 0,6          |
| 0,2 |                          |                            | 0,488                 | 0,931                   | 1,5          |
| 0,3 |                          |                            | 0,476                 | 0,925                   | 2,2          |
| 0,4 |                          |                            | 0,463                 | 0,917                   | 3,1          |
| 0,5 |                          |                            | 0,451                 | 0,909                   | 4,0          |
| 0,6 |                          |                            | 0,440                 | 0,902                   | 4,8          |
| 0,7 |                          |                            | 0,428                 | 0,893                   | 5,8          |
| 0,8 |                          |                            | 0,416                 | 0,884                   | 6,9          |
| 0,9 |                          |                            | 0,405                 | 0,875                   | 8            |

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

Проведённое сравнение показало, что влияние отношения теплоёмкостей потоков  $s$  существенно отражается на эффективности теплообмена, рассчитанной по NTU-методу, однако интегральный показатель демонстрирует высокую устойчивость к изменению этого параметра, несмотря на то, что исходно он основан на упрощённом предположении о малой

теплоёмкости холодного потока. Полученные расчёты показывают, что различия между двумя подходами растут умеренно и остаются в пределах 10 %, что сопоставимо с реальными эксплуатационными параметрами расхода воздуха и неизбежными погрешностями измерений температур. Это говорит о том, что интегральный показатель сохраняет свою работоспособность при существенно неодинаковых режимах работы теплообменного аппарата и корректно отражает изменение общего КР при увеличении или уменьшении отношения теплоёмкостей газа и воздуха, особенно в тех случаях, когда параметры воздушного потока изменяются во времени или недоступны для точного определения в реальных условиях эксплуатации.

*Аналитическая аппроксимация паспортной лучевой характеристики АВО газа*

Для оценки теплотехнических параметров АВО газа типа 2АВГ-75 в качестве исходной информации использована лучевая паспортная номограмма, отражающая зависимость тепловой нагрузки аппарата от расхода охлаждаемого газа и температурного напора и служащая базовым источником заводских данных, применяемых при проектировании и эксплуатации АВО газа (рис.3).

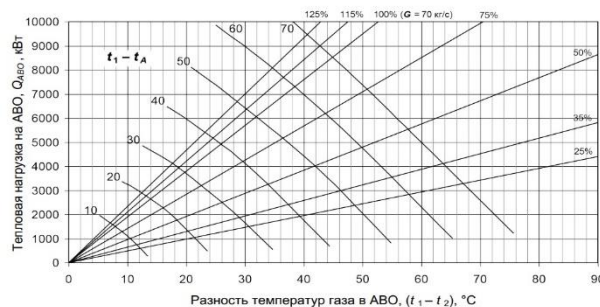


Рис.3. Паспортные теплотехнические характеристики АВО газа типа 2АВГ-75С (два вентилятора в работе)

\*Источник: [17] Source: [17].

Паспортная лучевая номограмма представлена в графическом виде, что затрудняет точное считывание данных и не позволяет использовать её в расчётных моделях и оптимизационных алгоритмах. Для дальнейшего количественного анализа паспортной теплотехнической характеристики АВО типа 2АВГ-75 выполнено извлечение контрольных точек с лучевой номограммы, представленной в заводской документации. Оцифрованные значения были приведены к безразмерной форме через относительный расход газа ( $g = G/G_{ном}$ ) и КР ( $\eta$ ). С целью выбора наиболее адекватной математической зависимости  $\eta(g)$  была проведена аппроксимация полученных данных с помощью полиномиальной, экспоненциальной, степенной зависимостями в программном комплексе MS Excel. Для каждой модели рассчитан коэффициент детерминации  $R^2$ , характеризующий степень соответствия аппроксимирующей функции паспортным данным, и осуществлен анализ поведения функции КР при различных диапазонах расхода газа ( $g \in [0;1,5]$ ). Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Сравнение моделей аппроксимации с паспортной лучевой теплотехнической характеристикой АВО газа типа 2АВГ-75С

*Comparison of approximation models with the passport radiation thermal characteristics of the 2AVG-75S gas air cooling apparatus*

| Вид функции                   | Уравнение, $\eta=f(g)$                                         | $R^2$  | Расход $g=0,25 \dots 1,25$ | Расход $g < 0,25$ | Расход $g > 1,25$   |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|----------------------------|-------------------|---------------------|
| кусочно-линейная интерполяция | $\eta_i + \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{g_{i+1} - g_i} (g - g_i)$ | 1      | имеет изломы между узлами  | $\eta > 1$        | МОНОТОННО убывающая |
| полином 2-я степень           | $0,1221g^2 - 0,5886g + 1,1457$                                 | 0,9940 | слабое расхождение         | $\eta > 1$        |                     |

| Вид функции                      | Уравнение, $\eta=f(g)$                                         | $R^2$  | Расход<br>$g=0,25 \dots 1,25$ | Расход<br>$g<0,25$                                 | Расход<br>$g>1,25$     |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|
| кусочно-линейная<br>интерполяция | $\eta_i + \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{g_{i+1} - g_i} (g - g_i)$ | 1      | имеет изломы<br>между узлами  | $\eta > 1$                                         | монотонно<br>убывающая |
| полином<br>3-я степень           | $0,06326 g^3 - 0,02026 g^2 - 0,49419 g + 1,12830$              | 0,9941 |                               | $\eta > 1$                                         |                        |
| степенная                        | $0,6730 g^{-0,3241}$                                           | 0,9504 | сильное<br>расхождение        | При $g \rightarrow 0$<br>$\eta \rightarrow \infty$ |                        |
| экспоненциальная                 | $1,1429 e^{-0,5176 g}$                                         | 0,9938 | слабое<br>расхождение         | $\eta > 1$                                         |                        |

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

В рабочем диапазоне  $g=0,25 \dots 1,25$  все рассмотренные зависимости демонстрируют монотонное снижение тепловой эффективности с ростом расхода газа. Кусочно-линейная интерполяция точно воспроизводит паспортные точки, но имеет изломы в узлах. Полиномиальные зависимости обеспечивают гладкое представление характеристики; полином третьей степени лучше описывает кривизну паспортной зависимости при сохранении монотонности в рабочем диапазоне, что делает его предпочтительным для дальнейших расчётов. Вне диапазона исходных данных ( $g<0,25$  и  $g>1,25$ ) все зависимости являются экстраполяцией и не рассматриваются как количественно достоверные; в этих областях возможны нетипичные значения ( $\eta>1$ ), поэтому экстраполяция используется только для качественной иллюстрации поведения функции.

Анализ результатов аппроксимации показал, что наилучшее согласование с паспортной лучевой номограммой обеспечивает полиномиальная регрессионная модель третьей степени по критерию коэффициента детерминации  $R^2$  и поведению функции КР в рабочем диапазоне:

$$\eta_{\text{паспорт}}(g) \approx 0,06326 \cdot g^3 - 0,02026 \cdot g^2 - 0,49419 \cdot g + 1,12830. \quad (17)$$

Для аппарата типа 2АВГ-75 в номинальном режиме при температуре газа на входе  $T_{\text{вх}}=75^\circ\text{C}$ , на выходе  $T_{\text{вых}}=45^\circ\text{C}$ , температуре воздуха  $T_{\text{возд}}=30^\circ\text{C}$ , номинальном расходе газа  $G=54,4$  кг/с ( $G=70$  кг/с максимальный расход), паспортная тепловая нагрузка составляет не менее 4400 кВт, что соответствует КР=0,667 (рис.3). При подстановке в (17) номинального значения расхода газа, паспортный КР ( $\eta_{\text{паспорт}}(g)$ )  $\approx 0,677$ , что говорит о хорошей сходимости паспортной характеристики ( $\delta \approx 1,5\%$ ) с подобранной аппроксимацией (регрессионной моделью) в номинальном диапазоне режима работы теплообменного аппарата (табл.5).

Таблица 5

Table 5

Значения паспортного коэффициента регенерации при различных расходах газа

Values of the rated regeneration coefficient at different gas flows

| Относительный расход,<br>$g = G / 54,4$ | Фактический расход,<br>$G$ , кг/с | $\eta$ (g) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|------------|
| 0,3                                     | 16,32                             | 0,979      |
| 0,4                                     | 21,76                             | 0,931      |
| 0,5                                     | 27,2                              | 0,884      |
| 0,6                                     | 32,64                             | 0,838      |
| 0,7                                     | 38,08                             | 0,794      |
| 0,75                                    | 40,8                              | 0,773      |
| 0,8                                     | 43,52                             | 0,752      |
| 0,9                                     | 48,96                             | 0,713      |
| 1                                       | 54,4                              | 0,677      |
| 1,15                                    | 62,56                             | 0,629      |
| 1,25                                    | 68                                | 0,602      |

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

Для анализа адекватности описания теплообменных процессов предложенной регрессионной модели на рис.4. приведены зависимости  $\eta(g)$  (кусочно-линейная интерполяция и полином третьей степени) и нормированной тепловой мощности  $Q(g)$ .

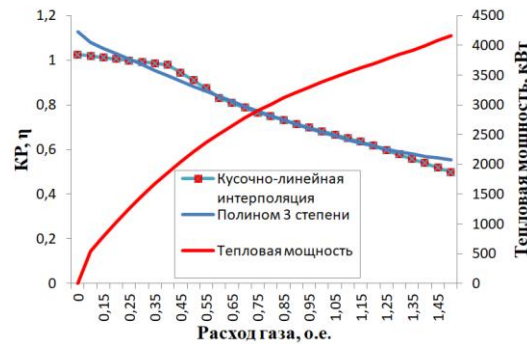


Рис.4. Сопоставление температурной эффективности охлаждения (КР), аппроксимированной полиномом третьей степени, и тепловой мощности аппарата при изменении относительного расхода газа.

Fig. 4. Comparison of the temperature regeneration coefficient (RC) approximated by a third-degree polynomial and the heat capacity of the apparatus when the relative gas flow rate changes

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

Анализ аппроксимации показывает, что при малых расходах газа температурная эффективность охлаждения близка к единице, однако тепловая мощность аппарата остаётся незначительной вследствие малой теплоёмкости газового потока, что ограничивает практическую значимость данных режимов. При дальнейшем увеличении расхода наблюдается снижение  $\eta(g)$ , что соответствует физическим ограничениям процесса теплообмена. Это объясняется выходом теплообменного аппарата на режим, при котором дальнейшее увеличение расхода газа приводит к снижению времени контакта и не сопровождается ростом коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха. Полученные зависимости полностью согласуются с классической теорией теплообмена, и не противоречат форме паспортной номограммы.

Если выразить из выражения (6) локальный паспортный КР для одной секции будет равен:

$$\eta_{\text{паспорт1}}(g) = 1 - \sqrt{1 - \eta_{\text{паспорт}}(g)} \approx 0,4229. \quad (18)$$

Тогда общий паспортный КР для схемы двухступенчатого охлаждения (если принять, что все секции одинаковые) при применении интегрального показателя будет равен:

$$\eta_{\text{паспорт.общ}}(g) = 1 - (1 - 0,4229)^4 = 0,889. \quad (19)$$

При сопоставлении с табл.3 относительная погрешность КР между паспортным и рассчитанным методом NTU в диапазоне теплоемкостей потоков (0,5...0,9) составит не более 7 % для одной секции и 2 % для четырех секций. Повышенные значения относительной погрешности при малых теплоёмкостях потоков (0,1...0,4) объясняются малой величиной теплового эффекта и сопоставимостью абсолютных погрешностей измерений с измеряемыми величинами. Данный эффект носит методический характер и не влияет на выводы, полученные в рабочем диапазоне расходов. Следовательно, применение интегральной модели позволяет формировать обобщённую характеристику многоступенчатой системы охлаждения газа с помощью регрессионной модели, полученной на основе паспортной лучевой характеристики АВО газа с допустимой степенью точности.

#### Интегральный критерий теплотехнического состояния АВО газа

Для количественной оценки теплотехнического состояния теплообменного оборудования традиционно применяется классический безразмерный критерий  $K_{\text{те}}$ , основанный на сравнении фактической и эталонной паспортной эффективности охлаждения (тепловой нагрузки):

$$K_{\text{те}} = \frac{\eta_{\text{факт}}}{\eta_{\text{паспорт}}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{паспорт}}}. \quad (20)$$

Использование критерия (20) ограничено рядом факторов:

- 1) оценка теплотехнического состояния в одной точке измерения;

2) не учитывается многоступенчатая структура теплообменного аппарата, включающего последовательно работающие секции;

3) не позволяет восстановить теплотехническое состояние отдельной секции по измеренной эффективности многоступенчатой системы охлаждения.

Для устранения ограничений и получения более полной оценки параметров работы АВО газа предлагается ввести усовершенствованный диагностический подход, основанный на сопоставлении регрессионной модели (19), определяемой по паспортной лучевой характеристике АВО газа, с интегральным коэффициентом (6), учитывающим реальные условия эксплуатации, позволяющий ввести новый интегральный критерий теплотехнического состояния одного аппарата:

$$K(g) = \frac{\eta_{\text{общ}}}{\eta_{\text{паспорт}}(g)}. \quad (21)$$

Критерий (21) учитывает паспортную зависимость эффективности от расхода и обеспечивает корректное сравнение фактического и номинального режимов в реальных условиях эксплуатации. Для анализа состояния отдельной секции аппарата предлагается ввести секционный диагностический показатель, основанный на восстановлении эффективности секции по измеренным параметрам аппарата:

$$K_{\text{сек}}(g) = \frac{\eta_{\text{сек}}}{\eta_{\text{паспорт1}}(g)} = \frac{1 - \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{общ,интегр}}}}{1 - \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{паспорт}}(g)}}. \quad (22)$$

Выражение (22) представляет собой интегральный критерий теплотехнического состояния секции для многоступенчатой схемы охлаждения газа. Диапазон возможных значений  $K_{\text{сек}}(g)$  показывает степень отклонения теплопередающей способности от номинальных параметров, что позволяет выделить нормальный, переходный и критический режимы работы оборудования. Произведем анализ чувствительности критерия теплотехнического состояния для одной секции, одного аппарата (2 секции), двух аппаратов (4 секции, схема двухступенчатого охлаждения) (табл.6).

Таблица 6

Table 6

Влияние снижения эффективности секции на коэффициент теплотехнического состояния

*The effect of reducing the efficiency of a section on the coefficient of thermal condition*

| Снижение<br>эффективности<br>секции, % | Одна секция,<br>$K_{\text{сек}}$ | Один аппарат,<br>$K_2$ | Два аппарата,<br>$K_4$ |
|----------------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| 5                                      | 0,95                             | 0,963                  | 0,981                  |
| 10                                     | 0,90                             | 0,924                  | 0,959                  |
| 15                                     | 0,85                             | 0,884                  | 0,935                  |
| 20                                     | 0,80                             | 0,843                  | 0,909                  |
| 25                                     | 0,75                             | 0,800                  | 0,880                  |
| 30                                     | 0,70                             | 0,756                  | 0,849                  |
| 35                                     | 0,65                             | 0,711                  | 0,814                  |
| 40                                     | 0,60                             | 0,664                  | 0,776                  |

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

Проведённый расчёт показал, что при последовательном включении секций эффективность аппарата или группы аппаратов становится менее чувствительной к снижению эффективности отдельной секции. Даже при значительном падении КР одной секции (20 %) суммарный критерий для двух аппаратов остаётся близким к единице, что приводит к искажённой оценке реального состояния оборудования. Для корректной оценки состояния оборудования предлагается ввести калибровку пороговых значений критериев, основанную на сопоставлении их с одинаковыми уровнями падения эффективности секций (22), что позволит перейти к единой шкале чувствительности. Предлагаемая интерпретация критерия (22), представленная в табл.7, может служить основанием для принятия решений о необходимости очистки, диагностики или корректировки режимов функционирования АВО газа с учетом предлагаемой идентификации критерия теплотехнического состояния по шкалам чувствительности.

Предлагаемая калибровка пороговых значений критерия позволит обеспечить корректное диагностирование состояния отдельных секций и всего аппарата, повысить информативность критерия и сделать возможной своевременную идентификацию начала снижения теплотехнической эффективности в АВО газа.

Таблица 7

Table 7

Идентификация критерия теплотехнического состояния по шкалам чувствительности

*Identification of the thermal condition using sensitivity scales*

| Уровень состояния            | Одна секция, $K_{сек}$      | Один аппарат, $K_2$       | Два аппарата, $K_4$       | Характеристика                                                                      |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| норма (чистое состояние)     | $K_{сек} \geq 0,9$          | $K_2 \geq 0,93$           | $K_4 \geq 0,96$           | потеря эффективности секции $\leq 10\%$ , теплопередача близка к паспортной         |
| умеренное загрязнение        | $0,8 \leq K_{сек} \leq 0,9$ | $0,85 \leq K_2 \leq 0,93$ | $0,91 \leq K_4 \leq 0,96$ | ориентировочно 10–20 % падение эффективности секции, требуется плановая очистка     |
| существенное загрязнение     | $0,7 \leq K_{сек} \leq 0,8$ | $0,78 \leq K_2 \leq 0,85$ | $0,85 \leq K_4 \leq 0,91$ | ориентировочно 20–30 % падение эффективности секции, заметное ухудшение теплообмена |
| сильное загрязнение / дефект | $K_{сек} < 0,7$             | $K_2 < 0,78$              | $K_4 < 0,85$              | потеря эффективности секции $> 30\%$ , требуется срочная очистка и диагностика      |

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

*Коэффициент минимального эквивалентного числа работающих слоев*

Анализ графика (рис.2) показал, что наибольшую долю тепловой нагрузки берет на себя первый по ходу движения газа вентилятор в секции. Обозначим все первые секции АВО газа по ходу движения газа как первый слой, все вторые секции по ходу движения как второй слой и т.д. (рис.5).

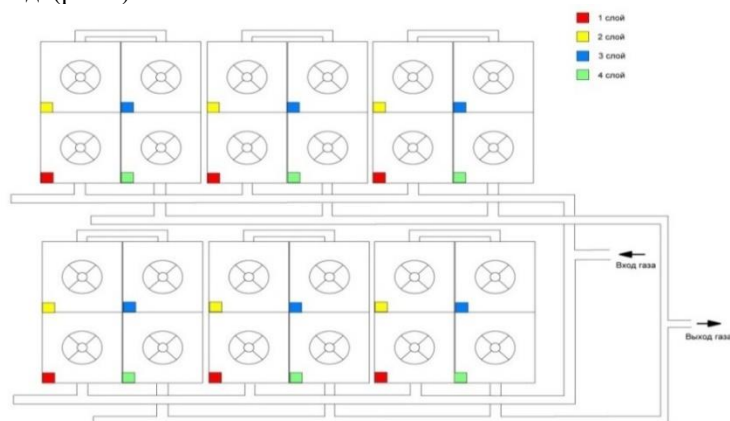


Рис.5. Принцип послойного распределения Fig.5. Layer-by-layer distribution principle for a two-stage gas AVO scheme

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

Сравним, при каком условии тепловая нагрузка от четырех слоев будет эквивалентна нескольким первым слоям АВО газа.

Схема №1: двухступенчатая схема охлаждения, где задействованы слои 1-2-3-4 последовательно. Тогда по (6):

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta)^4. \quad (23)$$

Тепловая нагрузка из (10):

$$Q_{\text{режим}} = 1 - (1 - \eta)^4 \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}). \quad (24)$$

Схема №2: двухступенчатая схема охлаждения, где включены по первому слою в нескольких теплообменных аппаратах:

$$Q_{2\text{режим}} = w_1 \cdot \eta \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}), \quad (25)$$

где  $w_1$  – количество эквивалентно работающих первых слоев по тепловой нагрузке.

Тогда условие равенства тепловых нагрузок при двух схемах работы примет вид:

$$Q_{1\text{режим}} = Q_{2\text{режим}}. \quad (26)$$

Подставляя (23) и (25) и сокращая множитель (расход газа одинаков) получим:

$$1 - (1 - \eta)^4 = w_1 \cdot \eta \rightarrow w_1 = \frac{1 - (1 - \eta)^4}{\eta} . \quad (27)$$

Учитывая, что число вентиляторов не может быть дробным, то округлим в сторону большего числа для обеспечения необходимого запаса по охлаждению. Получим коэффициент минимального эквивалентного числа первых слоев, необходимых для достижения тепловой нагрузки, равной тепловой нагрузке четырех слоев, работающих последовательно в одном АВО:

$$w_{\min} = \left\lceil \frac{1 - (1 - \eta)^4}{\eta} \right\rceil . \quad (28)$$

Построим график, согласно (28) при различных значениях эффективности (рис.6).

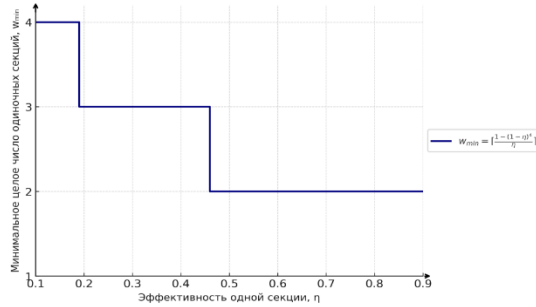


Рис.6. Зависимость  $w_{\min}$  от эффективности одной секции  $\eta$  Fig.6. Dependence of  $w_{\min}$  on the efficiency of one section  $\eta$

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

Анализ графика показывает ступенчатый характер изменения количества первых слоев от индивидуальной эффективности слоя. При увеличении индивидуальной эффективности слоя доля тепловой нагрузки, обеспечиваемая каждой из них, возрастает, что приводит к уменьшению требуемого числа одновременно работающих вентиляторов в первых слоях с эквивалентным тепловым эффектом от четырех последовательно включённых слоев.

Для качественной и количественной оценки зависимости требуемого числа одновременно работающих первых слоев от их индивидуальной эффективности был рассчитан коэффициент минимального числа первых слоев, обеспечивающий эквивалентную тепловую нагрузку для четырех последовательных слоев, и определен режим работы системы охлаждения (табл.8).

Таблица 8

Table 8

Характеристика режима работы для двухступенчатой схемы охлаждения при послойном управлении электроприводами АВО газа  
Characteristics of the operating mode for a two-stage cooling scheme with layer-by-layer control of the AVO gas electric drives

| №  | Эффективность слоя, $\eta$ | Количество первых слоев, $w_{\min}$ | Характеристика режима        |
|----|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 1  | 0,1                        | 4                                   | низкая эффективность         |
| 2  | 0,15                       | 4                                   |                              |
| 3  | 0,20                       | 3                                   | переходный режим             |
| 4  | 0,30                       | 3                                   | средний режим                |
| 5  | 0,4                        | 3                                   | оптимальный переходный режим |
| 6  | 0,5                        | 2                                   | энергосберегающий режим      |
| 7  | 0,6                        | 2                                   | устойчивый эффективный режим |
| 8  | 0,7                        | 2                                   |                              |
| 9  | 0,8                        | 2                                   |                              |
| 10 | 0,9                        | 2                                   |                              |

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

Для оценки диапазона эффективности слоёв, при котором возможно снижение числа включённых вентиляторов без ухудшения тепловых характеристик системы,



построена контурная диаграмма зависимости общей эффективности системы охлаждения от эффективности отдельного слоя при фиксированном числе АВО газа (рис.7).

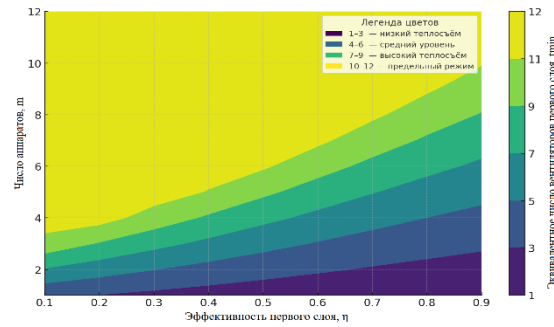


Рис.7. Контурная диаграмма эффективности системы охлаждения при различной эффективности первого слоя и числе АВО газа

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

На основании анализа контурной диаграммы установлено, что эффективность системы воздушного охлаждения газа определяется сочетанием высокой эффективности секций и рационального числа задействованных аппаратов. При этом достижение зоны насыщения указывает на необходимость оптимизации схемы включения вентиляторов и переходу к послойному управлению, что позволит уменьшить число включённых электроприводов без потери тепловой мощности.

*Оптимизация режима работы АВО газа по критерию минимума включенных вентиляторов*

Цель оптимизации заключается в определении такого количества включённых вентиляторов, которые обеспечивают требуемую суммарную тепловую нагрузку на установке охлаждения газа (УОГ) при минимальном числе работающих слоев АВО газа.

КР  $i$ -ого последовательного слоя в одном аппарате, согласно (6) и (10) определяется:

$$\Delta\eta_i = (1 - \eta)^{i-1} \cdot \eta, \text{ где } i=1,2,3,4 \quad (29)$$

КР последовательно включенных слоев в одном аппарате:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta)^4 = \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i. \quad (30)$$

Тогда эффективность  $j$ -го АВО газа определяется как:

$$E_j = \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i \cdot x_{j,i}, \quad j=1, \dots, U \quad (31)$$

$$x_{j,i} \in \{0,1\}. \quad (32)$$

где  $x_{j,i}$  – бинарная переменная, характеризующая состояние (включен/выключен)  $i$ -ого вентилятора в  $j$ -ом аппарате;  $U$  – количество одинаковых АВО газа на УОГ.

При этом должно выполняться условие, где включение последующих слоев в аппарате возможно только при работе предшествующего слоя:

$$x_{j,i} \leq x_{j,i-1}, \quad i=2,3,4. \quad (33)$$

Требуемая эффективность АВО газа, где включение происходит по слоям можно привести к виду:

$$E_{\text{треб}} = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i \cdot x_{j,i} = y_1 \cdot \Delta\eta_1 + y_2 \cdot \Delta\eta_2 + y_3 \cdot \Delta\eta_3 + y_4 \cdot \Delta\eta_4, \quad (34)$$

где  $y_1, y_2, y_3, y_4$  – количество включенных слоев.

Цель оптимизации обеспечить минимальное число включенных вентиляторов с учетом вклада слоя по заданному тепловому режиму (эффективности) УОГ со следующими ограничениями:

$$N_{\text{вент}} = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 x_{j,i} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \rightarrow \min, \quad (35)$$

$$E_{\text{треб}} \geq E_{\text{зад}}, \quad (36)$$

$$y_1 \geq y_2 \geq y_3 \geq y_4, \quad (37)$$

$$0 \leq y_i \leq U, \quad (38)$$

$$y_i \in N, \quad (39)$$

где  $E_{зад}$  – заданная эффективность УОГ,  $y_i$  – номер слоя,  $N$  – множество натуральных чисел.

Заданная эффективность УОГ определяется:

$$E_{зад} = U \cdot \eta_{общ}. \quad (40)$$

*Оптимизация режима работы АВО газа по критерию минимума отклонения от требуемой эффективности*

При дискретном управлении вентиляторами включение только секций первого слоя может привести к резкому превышению заданной эффективности охлаждения. Для плавного приближения к заданному значению эффективности (температуры) необходимо использовать переход на последующие слои, которые, согласно (24), вносят меньшую тепловую нагрузку. С учётом необходимости ограничения переохлаждения газа (верхняя граница) условие (31) необходимо дополнить следующим:

$$E_{зад} + \Delta E_{\delta} \geq E_{треб} \geq E_{зад}, \quad (41)$$

где  $\Delta E_{\delta}$  – максимально допустимое превышение требуемой эффективности, которое может быть определено как:

$$\Delta E_{\delta} = \frac{\Delta T_{\delta}}{T_{вх} - T_{ос}}, \quad (42)$$

где  $\Delta T_{\delta}$  – максимально допустимое превышение температуры (переохлаждение).

Отклонение эффективности охлаждения можно определить как:

$$R = E_{зад} - E_{тек}, \quad (43)$$

где  $E_{тек}$  – текущая суммарная эффективность включенных вентиляторов.

Выражение (43) при  $R > 0$  показывает, что охлаждение недостаточно,  $R = 0$  эффективность достигнута,  $R < 0$  охлаждение избыточно.

Цель оптимизации обеспечить минимум отклонения от требуемой эффективности:

$$|E_{зад} - E_{тек}| \rightarrow \min. \quad (44)$$

Чтобы обеспечить плавное приближение к требуемой эффективности без скачков температуры необходимо осуществить переход между слоями. Эффективность с учетом вклада слоев будет равна:

$$E_i = E_{тек} + \Delta \eta_i, \quad (45)$$

$$E_{i+1} = E_{тек} + \Delta \eta_{i+1}. \quad (46)$$

Тогда ошибка между полученной эффективностью и заданной определяется как:

$$\delta_i = |E_{зад} - E_i|, \quad (47)$$

$$\delta_{i+1} = |E_{зад} - E_{i+1}|. \quad (48)$$

Подставив в (47) выражение (45), и аналогично для (48) и (46) с учетом (43) получим:

$$\delta_i = |R - \Delta \eta_i|, \quad (49)$$

$$\delta_{i+1} = |R - \Delta \eta_{i+1}|. \quad (50)$$

Учитывая, что шаг ошибки для последующих слоев меньше чем предыдущих, получим:

$$|R - \Delta \eta_{i+1}| \geq |R - \Delta \eta_i|. \quad (51)$$

Решая неравенство (51) получим выражение, которое является условием перехода на следующий слой:

$$R \leq \frac{\Delta \eta_i + \Delta \eta_{i+1}}{2}. \quad (52)$$

Условие (52) обеспечивает минимальное отклонение от требуемой температуры газа и плавное регулирование без переохлаждения.

*Количественная оценка энергосберегающего эффекта предлагаемого алгоритма*

Для демонстрации практической значимости разработанного алгоритма послойного дискретного управления электроприводами АВО газа выполнена расчётная оценка снижения энергопотребления в сравнении с исходной двухступенчатой схемой охлаждения газа. В соответствии с ранее полученными зависимостями интегрального коэффициента регенерации и коэффициента минимального эквивалентного числа слоёв (табл. 8) установлено, что при известной эффективности секции эквивалентная тепловая нагрузка четырёх последовательных слоёв достигается при работе  $w_{\min}$  слоёв.

В исходной схеме при достижении исходной тепловой нагрузки задействуются четыре последовательно работающих асинхронных двигателей (АД):

$$P_{\text{исх}} = 4 \cdot P_{\text{АД}}, \quad (53)$$

где  $P_{\text{АД}}$  – мощность АД.

Оптимизированный послойный алгоритм требует работы количества АД вентиляторов:

$$P_{\text{опт}} = w_{\min} \cdot P_{\text{АД}}. \quad (54)$$

Тогда снижение установленной мощности составляет:

$$\Delta P = P_{\text{баз}} - P_{\text{опт}}. \quad (55)$$

Относительная экономия энергии в данном режиме равна:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{баз}} - P_{\text{опт}}}{P_{\text{баз}}} \cdot 100\%. \quad (56)$$

Пусть длительность работы аппарата в данном тепловом режиме составляет  $T$  часов в год. Тогда годовая экономия электроэнергии рассчитывается как:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T. \quad (57)$$

При оценке энергосберегающего эффекта были выбраны режимы работы, соответствующие типовой эксплуатации АВО газа на газотранспортных объектах. В расчётах установлена двухступенчатая схема охлаждения газа с электродвигателями мощностью 37 кВт и рабочими колёсами ГАЦ-50-4М2, что характерно для применяемых на практике аппаратов типа 2АВГ-75. В соответствии с формулами (53-57) произведем оценку при исходной и послойной схеме управления АВО газа. Для количественной оценки энергосберегающего эффекта были выбраны два характерных режима работы АВО газа. Выбор именно этих режимов обусловлен как теплотехническими особенностями установки, так и практическими условиями её эксплуатации. В первом режиме наблюдается наибольший потенциал для энергосбережения, так как в свою очередь второй режим работы характерен для большой доли реальных рабочих состояний АВО газа, особенно при умеренной температуре наружного воздуха и нестабильных суточных тепловых потоках. Этот диапазон представляет собой переходную область, в которой каждый включённый слой даёт заметный тепловой эффект, однако эффективность использования вентиляторов всё ещё далека от насыщения. Именно поэтому в данном режиме послойный алгоритм обеспечивает более умеренное, но устойчивое снижение энергопотребления (на уровне 20–30 %), отражая реалистичный сценарий эксплуатации оборудования (18-19). Таким образом, рассмотренные режимы охватывают как наиболее энергетически неэффективный участок работы исходной схемы, так и наиболее часто встречающийся рабочий диапазон, что позволяет корректно и объективно оценить энергетическую эффективность предложенного алгоритма в двух принципиально разных условиях эксплуатации АВО газа (табл. 9).

Таблица 9

Table 9

Оценка энергосбережения при исходном и послойном управлении АВО газа

*Evaluation of energy savings in traditional and layer-by-layer control of gas air cooling apparatus*

| Режим работы | Эффективность слоя, $\eta$ | Число вентиляторов (исходная схема) | Число вентиляторов (послойная схема) | Потребляемая мощность исходной схемы, кВт | Потребляемая мощность послойной схемы, кВт | Относительное снижение мощности, % | Годовая экономия, кВт·ч/год |
|--------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 1            | 0,5                        | 4                                   | 2                                    | 148                                       | 74                                         | 50                                 | 444000                      |
| 2            | 0,4                        |                                     | 3                                    |                                           | 111                                        | 25                                 | 222000                      |

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

*Сравнение существующих методов управления АВО газа с предложенным алгоритмом*

Анализ литературных источников показывает, что современные методы управления аппаратами воздушного охлаждения газа развиваются в двух основных направлениях: совершенствование дискретных алгоритмов переключения вентиляторов и внедрение интеллектуальных систем регулирования на основе предиктивных и адаптивных подходов. Для корректной оценки эффективности предложенного алгоритма послойного управления выполнено сравнение его характеристик с методами, описанными в источниках [1, 4-6, 9-11] (табл.10).

В работах [1,9] показано, что традиционное дискретное управление приводит к избыточному числу включённых вентиляторов, поскольку переключения выполняются по фиксированным порогам температуры без учёта распределения тепловой нагрузки между секциями. Комбинированные схемы управления обеспечивают сокращение числа пусков и снижение энергопотребления на 10-15 % относительно традиционного алгоритма, однако также не учитывают различия в эффективности отдельных слоёв АВО. Предлагаемый алгоритм использует интегральную теплотехническую модель и позволяет уменьшить среднее число включённых вентиляторов на 20-25 %, а в режимах насыщения тепловой эффективности до 50 %, что превышает значения, достигаемые в работах [1,9].

В исследованиях [4-6] рассматриваются модели предиктивного управления, методы оптимизации расхода воздуха и алгоритмы распределения нагрузки между секциями. Достижимое снижение энергопотребления составляет 15-30 %, при этом обеспечивается повышение точности поддержания температурного режима. Отмечается, что данные методы требуют модернизации оборудования, установки дополнительной измерительной аппаратуры и, в большинстве случаев, применения частотно-регулируемых электроприводов. Предлагаемый в настоящей работе алгоритм обеспечивает сопоставимый энергетический эффект (до 25 % в среднем) без необходимости изменения аппаратной части установки и при сохранении штатного дискретного управления вентиляторов.

В работах [10, 11] улучшение энергетической эффективности достигается за счёт анализа эксплуатационных данных и построения предиктивных моделей функционирования теплообменных аппаратов. Энергосбережение составляет 10-25 %, однако методы требуют накопления значительного объёма данных, вычислительных ресурсов и внедрения дополнительного программного обеспечения. В отличие от этого, предложенный алгоритм опирается на аналитические зависимости (интегральный коэффициент регенерации, NTU-модель) и не требует статистического обучения, что повышает его надёжность и обеспечивает возможность внедрения на объектах с ограниченной информационной инфраструктурой.

Таблица 10

Table 10

Сравнение методов управления АВО газа по критерию энергосбережения

*Comparison of methods for controlling gas air-cooling apparatus based on energy saving criteria*

| Метод управления                                | Необходимость модернизации оборудования | Энергосбережение, %                  | Основные особенности                                                                  |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| традиционное ступенчатое [1]                    | не требуется                            | 0                                    | простота реализации, низкая гибкость                                                  |
| комбинированное дискретное [1, 9]               | минимальная                             | 10–15                                | уменьшение числа пусков, отсутствие оптимизации по слоям                              |
| предиктивные и адаптивные методы [4–6]          | высокая                                 | 15–30                                | высокая точность, применение частотно-регулируемого привода и дополнительных датчиков |
| алгоритмы на основе машинного обучения [10, 11] | высокая                                 | 10–25                                | зависимость от данных, сложность внедрения                                            |
| предлагаемый алгоритм послойного управления     | не требуется                            | 20–25 %, до 50 % в режимах насыщения | аналитическая модель, применение на существующих системах                             |

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

Сравнение показало, что предложенный алгоритм послойного управления обеспечивает энергетический эффект, сопоставимый с интеллектуальными методами регулирования и превосходящий комбинированные дискретные решения, при этом требуя минимальных изменений существующей системы управления. Такое сочетание эффективности и простоты внедрения делает данный подход предпочтительным для объектов, эксплуатирующих нерегулируемые электродвигатели вентиляторов и не имеющих возможности перехода к частотно-регулируемым системам.

*Оптимизация дискретного управления электроприводами АВО газа*

Реализация алгоритма оптимального дискретного управления электроприводами АВО газа сводится к решению двух целевых функций:

$$F_1 = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 x_{j,i} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \rightarrow \min, \quad (58)$$

$$F_2 = |E_{\text{зад}} - E_{\text{тек}}| \rightarrow \min. \quad (59)$$

Анализ литературных источников [18-21] указывает на то, что решение может быть осуществлено с помощью двух стратегий: последовательной и двухцелевой оптимизации (табл.11). Последовательная (иерархическая) оптимизация основана на поэтапном решении задачи с приоритетом одной целевой функции. В рамках управления системой воздушного охлаждения газа первым этапом минимизируется количество работающих вентиляторов при обеспечении требуемой тепловой нагрузки. После достижения заданного значения эффективности выполняется уточнение решения по второму критерию – минимизации отклонения полученного результата от требуемого уровня эффективности (охлаждения). Такой подход обеспечивает простоту реализации в системах дискретного управления, однако может приводить к скачкообразным изменениям температуры и увеличению риска переохлаждения при малом запасе по эффективности. В отличие от последовательного подхода, двухцелевая (многокритериальная) оптимизация рассматривает обе цели одновременно. Оптимизация направлена на нахождение компромиссного решения между минимизацией числа работающих вентиляторов и минимизацией отклонения эффективности охлаждения от требуемого значения. В результате формируется более гибкий и сбалансированный режим работы установки, обеспечивающий стабильность температуры газа и снижение энергопотребления. Для реализации на практике применяется объединённый критерий:

$$F = \alpha \cdot F_1 + \beta \cdot F_2 \rightarrow \min, \quad (60)$$

где  $\alpha$  – весовой коэффициент, отражающий приоритет первой функции;  $\beta$  – весовой коэффициент, отражающий приоритет второй функции.

Критерий (60) в зависимости от весовых коэффициентов может применяться для следующих целей: 1)  $\alpha \gg \beta$  – экономия электрической энергии; 2)  $\alpha \ll \beta$  – стабильность и точность охлаждения.

Таблица 11

Table 11

Сравнительная характеристика последовательной и двухцелевой оптимизации систем управления АВО газа

*Comparative characteristics of sequential and dual-objective optimization of gas air-cooling control systems*

| Характеристика          | Последовательная оптимизация | Двухцелевая оптимизация      |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| гибкость управления     | дискретные шаги              | адаптация                    |
| энергопотребление       | низкое                       | оптимизированное             |
| область применения      | простые системы              | адаптивные системы           |
| риск гидратообразования | высокий риск                 | минимизирован                |
| переход между слоями    | резкий                       | плавный                      |
| преимущества            | легкая реализация            | адаптивность                 |
| недостатки              | резкие перепады температуры  | сложная настройка управления |

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

*Методика выбора весовых коэффициентов объединённого критерия*

В объединённом критерии оптимизации (54) весовые коэффициенты определяют относительную значимость двух целевых функций: минимизации числа включённых вентиляторов и минимизации отклонения эффективности охлаждения. Для исключения произвольности выбора коэффициентов предлагается методика, основанная на

нормировании частных критериев и учёте технологических ограничений. Поскольку критерии  $F_1$  и  $F_2$  имеют различную размерность, они приводятся к безразмерному виду:

$$F_{1\text{отн}} = \frac{F_1 - F_{1,\min}}{F_{1,\max} - F_{1,\min}}, \quad (61)$$

$$F_{2\text{отн}} = \frac{|R|}{R_{\max}}, \quad (62)$$

где  $F_{1,\min}$  – минимальное значение критерия энергопотребления ( $w_{\min}$ );  $F_{1,\max}$  – максимальное значение критерия энергопотребления (максимальное число последовательных вентиляторов в теплообменном аппарате);  $R$  – отклонение эффективности охлаждения;  $R_{\max}$  – максимально допустимое отклонение согласно технологическим требованиям.

Приведение к безразмерному виду обеспечивает корректное сравнение влияния двух критериев. После нормирования объединённый критерий принимает вид:

$$F = \alpha \cdot F_{1\text{отн}} + \beta \cdot F_{2\text{отн}}, \quad (63)$$

$$\alpha + \beta = 1. \quad (64)$$

Выбор весовых коэффициентов определяется эксплуатационными задачами и может быть выражен через относительную важность энергосбережения и стабильности теплового режима через отношение:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{3_{\text{вент}}}{3_{\text{откл.тем}}}, \quad (65)$$

где  $3_{\text{вент}}$  – относительная значимость увеличения числа включённых вентиляторов;

$3_{\text{откл.тем}}$  – относительная значимость отклонения температуры охлаждаемого газа.

Тогда выбор коэффициентов, учитывающих реальные условия эксплуатации и обеспечивающих воспроизведение результатов оптимизации из (59) определяется:

$$\alpha = \frac{3_{\text{вент}}}{3_{\text{вент}} + 3_{\text{откл.тем}}}, \quad (66)$$

$$\beta = \frac{3_{\text{откл.тем}}}{3_{\text{вент}} + 3_{\text{откл.тем}}}, \quad (67)$$

На основе выражений (63, 66-67) предлагаются следующие варианты выбора весовых коэффициентов объединённого критерия (табл. 12).

Таблица 12

Table 12

Рекомендуемые значения весовых коэффициентов

*Recommended values of weight coefficients*

| Режим                              | Описание                                           | $\alpha$ | $\beta$ |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|---------|
| энергосберегающий                  | приоритет минимизации числа вентиляторов           | 0,7      | 0,3     |
| сбалансированный                   | равный учёт экономичности и точности регулирования | 0,5      | 0,5     |
| температурно-ориентированный режим | приоритет минимизации отклонения эффективности     | 0,3      | 0,7     |

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

Применение весовых коэффициентов в объединённом критерии оптимизации требует их обоснованного выбора, поскольку эти параметры определяют баланс между энергопотреблением вентиляторов и соблюдением теплотехнических ограничений. Предложенная методика, основанная на нормировании частных критериев и учёте эксплуатационных условий, позволяет задать веса не эмпирически, а в соответствии с

технологическими приоритетами функционирования АВО газа. Разделение режимов по уровням значимости показателей обеспечивает возможность гибкой адаптации алгоритма к различным рабочим ситуациям и предотвращает субъективность при выборе коэффициентов. Тем самым достигается согласованность результатов оптимизации с реальными требованиями эксплуатации без изменения структуры алгоритма управления.

#### **Результаты (Results)**

1. Получено аналитическое выражение для интегральной оценки тепловой эффективности многоступенчатых систем охлаждения газа.

2. Предложена интегрированная методика оценки теплотехнического состояния АВО, объединяющая аналитическую аппроксимацию паспортной характеристики, интегральный диагностический критерий и калиброванные пороговые значения для различных конфигураций аппаратов.

3. Разработан принцип и алгоритм послойного включения вентиляторов, обеспечивающий снижение энергопотребления без потери эффективности охлаждения.

4. Определён коэффициент минимального эквивалентного числа вентиляторов, позволяющий рассчитывать рациональное количество работающих электроприводов.

5. Сформулированы две целевые функции: минимизация числа работающих вентиляторов и минимизация отклонения эффективности охлаждения.

6. Предложен объединённый критерий оптимизации, обеспечивающий компромисс между энергосбережением и стабильностью температурного режима.

7. Предложена методика выбора весовых коэффициентов объединённого критерия оптимизации.

#### **Заключение (Conclusions)**

По результатам исследования разработан комплексный научно-практический подход к повышению энергетической эффективности работы АВО газа, основанный на объединении аналитических теплотехнических моделей, регрессионного анализа паспортных характеристик и оптимальных алгоритмов дискретного управления электроприводов вентиляторов. Проведённый теплотехнический анализ позволил получить аналитическое выражение интегрального коэффициента регенерации для многоступенчатых систем охлаждения. Показано, что интегральная модель обеспечивает высокую точность в сравнении с NTU-методом и устойчива к неоднородности тепловой эффективности секций. Это подтверждает возможность её применения для реальных условий эксплуатации АВО газа, в которых секции обладают различной эффективностью из-за загрязнения и неравномерности теплообмена. Впервые сформирована аналитическая функция паспортной теплотехнической характеристики АВО типа 2АВГ-75С, полученная на основе регрессионной аппроксимации лучевой номограммы. Это обеспечило переход от графического паспортного представления к его строгой математической форме и позволило использовать её в диагностике и оптимизации режимов работы. На основе аналитической зависимости  $\eta(g)$  предложены интегральный критерий теплотехнического состояния аппарата и секционный критерий, позволяющие количественно оценивать отклонения фактической (эксплуатационной) эффективности относительно заводских (паспортных) характеристик для многоступенчатых схем охлаждения газа. Показано, что при последовательном включении секций возникает эффект снижения чувствительности суммарного диагностического показателя, что приводит к недооценке ухудшения теплопередачи. Для устранения этого эффекта разработана система калиброванных порогов для секции, аппарата и группы аппаратов, обеспечивающая единую и физически корректную шкалу оценки состояния. Разработанный алгоритм послойного включения вентиляторов базируется на интегральной модели тепловой нагрузки и позволяет определять минимальное эквивалентное число вентиляторов, обеспечивающих требуемый тепловой режим. Определён коэффициент минимального эквивалентного числа слоёв, позволяющий рационально выбирать конфигурацию включения вентиляторов при сохранении требуемой эффективности охлаждения. Показано, что переход к послойному управлению обеспечивает снижение энергетических затрат по сравнению с существующей схемой управления. Сформулирована двухцелевая постановка задачи оптимизации, включающая минимизацию числа работающих вентиляторов и минимизацию отклонения эффективности охлаждения от заданного технологического режима. Предложен объединённый критерий оптимизации и методика выбора весовых коэффициентов, обеспечивающая получение сбалансированного решения между энергетической эффективностью и стабильностью температурного режима. Проведённое сравнение с существующими методами управления показало, что предложенный алгоритм послойного включения вентиляторов обеспечивает энергетический эффект,

сопоставимый с интеллектуальными системами регулирования, и при этом не требует глубокой модернизации оборудования, в отличие от большинства рассмотренных методов и одновременно остаётся технологически совместимым с существующими системами. Такой баланс делает метод перспективным для практического внедрения на объектах, где применение частотно-регулируемых или машинно-обучающих систем затруднено по техническим или экономическим причинам.

Результаты, полученные в исследовании, формируют комплексный подход к управлению электроприводами вентиляторов АВО газа, который позволяет улучшить энергетические и эксплуатационные показатели установки. Предложенная стратегия обеспечивает:

- 1) сокращение избыточного энергопотребления вентиляторов за счёт более рационального распределения тепловой нагрузки;
- 2) повышение точности и адаптивности регулирования при переменных тепловых режимах;
- 3) учёт фактического теплотехнического состояния секций в процессе управления;
- 4) повышение информативности диагностики теплового состояния оборудования за счёт использования интегральных критериев;
- 5) возможность практического внедрения в действующие системы управления без необходимости модернизации аппаратной части.

Такое сочетание диагностических и управляющих решений позволяет повысить эффективность работы и эксплуатации АВО газа, и обеспечить более устойчивое поддержание технологических параметров при минимальных изменениях существующей инфраструктуры.

### Литература

1. Абакумов А. М., Кузнецов П. К. Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 3(71). С. 67–82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4.
2. Новожилов И. М., Абрамкин С. Е., Мальцев П. А., и др. Разработка системы управления аппаратом воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16. № 2. С. 31–43. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.
3. Срок службы электродвигателя: анализ эксплуатационных факторов и прогнозирование долговечности [Электронный ресурс] // Образовательный сайт. URL: <https://inner.su/articles/srok-sluzhby-elektrodvigatelya-v-raznykh-usloviyakh-ekspluatatsii.html> (дата обращения: 29.10.2025).
4. Chen X., Guan L., Yang C., et al. A Novel Optimal Control Method for Building Cooling Water Systems with Variable Speed Condenser Pumps and Cooling Tower Fans // Buildings. 2025. Vol. 15. No. 19. DOI: 10.3390/buildings15193568.
5. Chang Q., Huang Y., Liu K., et al. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 16.
6. Luo Z., Yao Q. Multi-Model-Based Predictive Control for Divisional Regulation in the Direct Air-Cooling Condenser // Energies. 2022. Vol. 15. No. 13. DOI: 10.3390/en15134803.
7. Шальгин А. В., Фетисов В. Г., Карякина И. В. Исследование работы аппарата воздушного охлаждения в системе магистрального газопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 2. С. 29–32. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-29-32.
8. Захаров П. А., Крюков О. В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. № 2. С. 98–103.
9. Зубков Ю. В., Абакумов А. М., Абакумов О. А. Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2024. Т. 32. № 2(82). С. 103–118. DOI: 10.14498/tech.2024.2.6.
10. Mujtaba M. A., Munir M. A., Akhtar M., et al. Leveraging Machine Learning to Optimize Cooling Tower Efficiency for Sustainable Power Generation // Frontiers in Energy Research. 2025. Vol. 13. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1473946.
11. Wenzel P. M., Fensterle E., Radgen P. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit including Climate and Cooling Demand Normalization // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 21. DOI: 10.3390/su152115454.



12. Белянкин Р. В., Устинов Е. В., Хромов К. С. Применение частотного регулирования для предотвращения образования гидратов природного газа при его охлаждении // Газовая промышленность. 2011. № 2(656). С. 79–83.
13. Антонов В. А., Котляров Е. Ю., Финченко В. С. Экспресс-методика определения эффективной тепловой проводимости компактного газожидкостного теплообменника, функционирующего в атмосферной среде // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 5. С. 203–214. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-5-203-214.
14. Портянихин В. А. Модифицированный метод эффективности-NTU ( $m$ - $\varepsilon$ -NTU) для расчёта воздухоохладителей в режиме с влаговыведением или инеевыпадением. Часть I // Холодильная техника. 2021. Т. 110. № 1. С. 5–11. DOI: 10.17816/RF108665.
15. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 3-е изд., репр. М.: Изд. дом «Бастет», 2010. 344 с.
16. Navarro H. A., Cabezas-Gómez L. C. Effectiveness-NTU Computation with a Mathematical Model for Cross-Flow Heat Exchangers // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2007. Vol. 24. No. 4. P. 509–518.
17. Методика оценки технического состояния аппаратов воздушного охлаждения газа. ООО «Газпром трансгаз Уфа». Утверждена по протоколу № 145 производственного совещания от 13 декабря 2008 г. Уфа, 2008. 25 с.
18. Roijers D. M., Vamplew P., Whiteson S., et al. A Survey of Multi-Objective Sequential Decision-Making // Journal of Artificial Intelligence Research. 2013. Vol. 48. DOI: 10.1613/jair.3987.
19. Зыкина А. В. Последовательная оптимизация для многокритериальной задачи // Экономика и математические методы. 2006. Т. 42. № 1. С. 110–119.
20. Свитачева М. П. О некоторых многокритериальных методах выбора плановых решений // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2016. № 3(3). С. 32–38.
21. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 258 с.

#### Авторы публикации

**Масков Линар Рамильевич** – ООО «Газпром добыча Ямбург».

**Сафин Альфред Робертович** – д-р техн. наук, доцент по кафедре электроснабжения промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Abakumov AM, Kuznetsov PK. Kombinirovannoe upravlenie elektroprivodami ventilyatorov ustanovok okhlazhdeniya gaza. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2021;29(3):67–82. (In Russ). doi:10.14498/tech.2021.3.4.
2. Novozhilov IM, Abramkin SE, Maltsev PA, et al. Razrabotka sistemy upravleniya apparatom vozdušnogo okhlazhdeniya masla v sostave gazoperekachivayushchego agregata. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2023;16(2):31–43. (In Russ). doi:10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.
3. Srok sluzhby elektrodvigatelya: analiz ekspluatatsionnykh faktorov i prognozirovaniye dolgovrechnosti. Available at: <https://inner.su/articles/srok-sluzhby-elektrodvigatelya-v-raznykh-usloviyakh-ekspluatatsii.html>. Accessed: 29 Oct 2025. (In Russ).
4. Chen X, Guan L, Yang C, et al. A Novel Optimal Control Method for Building Cooling Water Systems with Variable Speed Condenser Pumps and Cooling Tower Fans. *Buildings*. 2025;15(19). doi:10.3390/buildings15193568.
5. Chang Q, Huang Y, Liu K, et al. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review. *Sustainability*. 2024;16(16).
6. Luo Z, Yao Q. Multi-Model-Based Predictive Control for Divisional Regulation in the Direct Air-Cooling Condenser. *Energies*. 2022;15(13). doi:10.3390/en15134803.
7. Shalygin AV, Fetisov VG, Karyakina IV. Issledovanie raboty apparata vozdušnogo okhlazhdeniya v sisteme magistral'nogo gazoprovoda. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodородного syr'ya*. 2023;(2):29–32. (In Russ). doi:10.24412/0131-4270-2023-2-29-32.
8. Zakharov PA, Kryukov OV. Printsipy invariantnogo upravleniya elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchaynykh vozmushcheniyakh. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2008;(2):98–103. (In Russ).

9. Zubkov YuV, Abakumov AM, Abakumov OA. Optimizatsiya algoritmov kombinirovannogo upravleniya elektroprivodami ustanovok okhlazhdeniya prirodnogo gaza. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2024;32(2):103–118. (In Russ). doi:10.14498/tech.2024.2.6.
10. Mujtaba MA, Munir MA, Akhtar M, et al. Leveraging Machine Learning to Optimize Cooling Tower Efficiency for Sustainable Power Generation. *Frontiers in Energy Research*. 2025;13. doi:10.3389/fenrg.2025.1473946.
11. Wenzel PM, Fensterle E, Radgen P. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit including Climate and Cooling Demand Normalization. *Sustainability*. 2023;15(21). doi:10.3390/su152115454.
12. Belyankin RV, Ustinov EV, Khromov KS. Primenenie chastotnogo regulirovaniya dlya predotvrashcheniya obrazovaniya gidratov prirodnogo gaza pri ego okhlazhdenii. *Gazovaya promyshlennost'*. 2011;2(656):79–83. (In Russ).
13. Antonov VA, Kotlyarov EYu, Finchenko VS. Ekspress-metodika opredeleniya effektivnoy teplovoy provodimosti kompaktnogo gazozhidkostnogo teploobmennika, funktsioniruyushchego v atmosfernoй srede. *Teplovyе protsessy v tekhnike*. 2023;15(5):203–214. (In Russ). doi:10.34759/tpt-2023-15-5-203-214.
14. Portyanikhin VA. Modifitsirovannyi metod effektivnost'-NTU (m-ε-NTU) dlya rascheta vozdukho-okhladiteley v rezhime s vlagovypadeniem ili ineevypadeniem. *Kholodil'naya tekhnika*. 2021;110(1):5–11. (In Russ). doi:10.17816/RF108665.
15. Mikheev MA, Mikheeva IM. Osnovy teploperedachi. 3rd ed. Moscow: Bastet; 2010. (In Russ).
16. Navarro HA, Cabezas-Gómez LC. Effectiveness–NTU Computation with a Mathematical Model for Cross-Flow Heat Exchangers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2007;24(4):509–518.
17. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza. Ufa: Gazprom transgaz Ufa; 2008. (In Russ).
18. Roijers DM, Vamplew P, Whiteson S, et al. A Survey of Multi-Objective Sequential Decision-Making. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2013;48. doi:10.1613/jair.3987.
19. Zykina AV. Posledovatel'naya optimizatsiya dlya mnogokriterial'noy zadachi. *Ekonomika i matematicheskie metody*. 2006;42(1):110–119. (In Russ).
20. Svitacheva MP. O nekotorykh mnogokriterial'nykh metodakh vybora planovykh resheniy. *Sotsial'no-ekonomicheskii i gumanitarnyy zhurnal*. 2016;3(3):32–38. (In Russ).
21. Podinovskiy VV, Nogin VD. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ).

#### Authors of the publication

**Linar R. Maskov** – Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russia.

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

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 01.12.2025 г.

**Отредактировано** 28.01.2026 г.

**Принято** 13.02.2026 г.



## СТАБИЛИЗАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДКИН И ПОСТРОЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ЛОГИКИ КООРДИНАЦИИ ЗАЩИТ

Скопин Г.А., Комков А.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия  
asostraik@gmail.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена ростом доли чувствительных электроприемников в распределительных сетях низшего напряжения, где глубокие провалы и искажения напряжения вызывают остановку технологических процессов, нештатные режимы силовой электроники и настроенных защит. Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) способен восстановить форму напряжения при возникновении данных явлений, однако при длительной компенсации в условиях дефицита мощности система может перейти в предельный колебательный режим. Это нарушает штатную работу защит и усугубляет переходный процесс. ЦЕЛЬ исследования заключается в формировании комплексного подхода к согласованию алгоритмов ДКИН и системы защит через определение границы устойчивости системы и разработку логики безопасного перехода от режима компенсации к защитным мероприятиям с учетом возможности подавления колебаний путем настройки параметров компенсатора. МЕТОДЫ включают математическое описание ДКИН и компьютерное моделирование в MATLAB Simulink для серии глубоких провалов напряжения с параметрическим изменением компенсатора, для обеспечения стабилизации системы. По полученным данным о характере компенсации формируется аддитивная логика взаимодействия ДКИН и выбранных систем защит в первичной и вторичной конфигурации системы. РЕЗУЛЬТАТЫ показывают, что полученные зависимости допустимого времени компенсации от глубины провала и параметров накопителя, а также выделенные признаки приближения к предельному режиму для разных вариантов настройки системы, позволяют исключить негативные последствия критических режимов при комплексной имплементации полученных данных в логику срабатывания защит. При этом правильно подобранные параметры фильтрации и других узлов системы ДКИН позволяют исключить колебательные процессы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная логика ограничивает негативное влияние динамических процессов, формирует сигнал о приближении к предельному режиму и заранее инициирует защитные действия до потери стабильности. Полученные результаты оптимизации указывают на необходимость правильного расчета и подбора параметров компенсатора, что позволяет обеспечить контролируемый выход из режима компенсации, снизить колебательность и риск внештатных срабатываний защит, уменьшая негативное влияние на нагрузку.

**Ключевые слова:** динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН); релейная защита и автоматика (РЗА); автоматическое включение резерва (АВР); провал напряжения; DC-шина; устойчивость; переходный процесс.

**Для цитирования:** Скопин Г.А., Комков А.Н. Стабилизация критических переходных процессов ДКИН и построение аддитивной логики координации защит // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 86-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-86-102.

## STABILIZATION OF CRITICAL TRANSIENT PROCESSES IN DVR SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF ADDITIVE PROTECTION COORDINATION LOGIC

Skopin G.A., Komkov A.N.

I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)  
Moscow, Russia  
asostraik@gmail.com

**Abstract:** *RELEVANCE* of the study is driven by the growing share of sensitive electrical loads in low-voltage distribution networks, where deep voltage sags and voltage distortions lead to stoppages of technological processes, abnormal operating modes of power electronics, and improper operation of coordinated protection devices. A Dynamic Voltage Restorer (DVR) can restore the voltage waveform when these phenomena occur; however, during prolonged compensation under power-deficit conditions, the system may enter a limiting oscillatory mode. This disrupts the normal operation of protection devices and aggravates the transient response. The AIM of the study is to develop a comprehensive approach to coordinating DVR control algorithms with the protection system by determining the system stability boundary and developing logic for a safe transition from the compensation mode to protective actions, taking into account the possibility of suppressing oscillations by tuning the compensator parameters. *METHODS* include a mathematical model of the DVR and computer simulations in MATLAB Simulink for a series of deep voltage sags with parametric variation of the compensator to ensure system stabilization. Based on the data obtained on the compensation behavior, an additive interaction logic between the DVR and the selected protection systems is formulated for the primary and secondary system configurations. *RESULTS* show that the derived relationships between the permissible compensation time and the sag depth and energy-storage parameters, as well as the identified indicators of approaching the limiting mode for different system tuning options, make it possible to eliminate the adverse effects of critical operating conditions when these findings are comprehensively implemented in the protection trip logic. At the same time, properly selected filtering parameters and other DVR subsystem settings can eliminate oscillatory processes. *CONCLUSION.* The developed logic limits the negative impact of dynamic processes, generates a signal indicating an approach to the limiting mode, and initiates protective actions in advance before stability is lost. The obtained optimization results indicate the need for accurate calculation and proper selection of compensatory parameters, which makes it possible to ensure a fully controlled exit from the compensation mode, reduce oscillations and the risk of unintended protection trips, and thereby reduce the negative impact on the load.

**Keywords:** *dynamic voltage restorer (DVR); relay protection and automation (RPA); automatic transfer switch (ATS); voltage sag; DC bus; stability; transient process.*

**For citation:** Skopin G.A., Komkov A.N. Stabilization of critical transient processes in DVR systems and development of additive protection coordination logic. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 86-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-86-102.

### ***Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)***

Провалы напряжения в сетях 0,4 кВ в настоящее время целесообразно рассматривать не только как показатель качества электрической энергии, но и как фактор технологического риска, влияющий на электромеханические режимы нагрузки и надёжность функционирования средств защиты и автоматики. Чувствительные электроприводы, источники питания и цифровые системы управления реагируют даже на кратковременные отклонения перезапусками, отказами и остановами оборудования, что напрямую влияет на непрерывность технологических процессов. Для снижения последствий применяются различные инженерные подходы, включая модернизацию систем электроснабжения и установку средств компенсации на наиболее уязвимых участках сети. Наиболее перспективным и практикоориентированным решением для последнего сценария является использование динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) [1]. В результате анализа его возможностей возникает вопрос о том, что основное внимание в публикационной среде уделяется повышению качества восстановления напряжения и совершенствованию алгоритмов управления, тогда как вопросы критических режимов и их динамических последствий, а также вопросы согласованного взаимодействия с защитами освещаются в меньшей степени. Между тем внедрение устройств данного класса изменяет условия протекания и выявления ненормальных режимов работы системы. Проводимая устройством компенсация данных явлений на стороне нагрузки, для самого компенсатора оборачивается значительным снижением демпфирующих свойств. При снижении уровня заряда батареи и его приближении к энергетическим пределам, возникают значительные колебательные переходные процессы и, как следствие, проявляется флуктуация измеряемых величин, повышающая вероятность нестабильной работы пороговых алгоритмов защиты и автоматики. Очевидно, что подобные режимы необходимо учитывать при осуществлении

компенсации, которая будет влиять на наблюдаемость предаварийных состояний и корректность действий защит [2]. В результате, принципиальным становится рассмотрение не только эффективности работы устройства в штатных режимах работы, но и его поведения в предельных состояниях. Следовательно, важным объектом оценки и управления является переходный процесс вблизи границы устойчивой компенсации и его влияние на устойчивость и управляемость системы электроснабжения в целом. В результате формируется актуальная научно-прикладная задача разработки согласованной логики, в рамках которой компенсатор и защиты рассматриваются как элементы единой системы управления, обеспечивающей координацию действий до наступления наиболее неблагоприятной динамики, предотвращая развитие колебательных режимов и снижая вероятность нештатных срабатываний [3].

Дальнейший анализ направлен на исследование работ, в которых поднимаются описанные вопросы и проблемы определения границ устойчивой компенсации и последствий этих факторов для согласования действий компенсатора с защитными функциями системы. Предварительное сопоставление публикаций показывает, что перечисленные аспекты чаще исследуются раздельно и лишь в ограниченном числе работ сводятся в единую постановку проблемы, требующей решения.

Касаясь анализа работы ДКИН, основной массив исследований ориентирован на повышение качества компенсации и улучшение переходных процессов за счёт совершенствования систем управления [4]. Наиболее активно развиваются робастные подходы, включая скользящие режимы и методы подавления возмущений, обеспечивающие повышение устойчивости динамики и точности восстановления напряжения при глубоких провалах [5,6]. Данное направление дополняют работы по оптимизации настроек регуляторов, а также аппаратные решения, снижающие зависимость компенсатора от энергонакопителя, включая реализацию систем на основе матричных преобразователей, нацеленных на повышение быстродействия и упрощение силовой части [7]. В то же время во многих публикациях ДКИН рассматривается преимущественно как автономный объект управления, вследствие чего вопросы согласования его режимов с внешними защитно-автоматическими устройствами и объединения с их функциями, а также влияние предельных режимов компенсации на условия корректного функционирования, освещаются ограниченно либо не рассматриваются.

Отдельное направление анализа, обусловленное отсутствием совокупных данных по поставленному вопросу, связано с оценкой пределов работоспособности компенсации. Существующие исследования показывают, что выбор режима компенсации и энергетические затраты ДКИН существенно влияют на достижимую глубину и длительность компенсации [8], а в работах с подключением накопителя к звену постоянного тока подчёркивается роль энергетического обеспечения и алгоритмов управления источником при тяжёлых возмущениях [9]. Однако диагностические признаки, отражающие энергетическое состояние компенсатора и переход к режимам ограничения, как правило, трактуются как внутренняя информация системы управления и существенно реже рассматриваются как формализованные входные сигналы для внешних алгоритмов защиты. Наряду с этими энергетическими ограничениями, необходимо отметить, что на устойчивость и колебательность переходных процессов существенно влияет выходное фильтрующее звено и другие элементы преобразования энергии. В ряде работ устойчивость обеспечивается выбором структуры или параметров фильтра, а также алгоритмами подавления колебательных составляющих [10], однако связь между настройкой фильтрации, проявлениями приближения к предельным режимам ДКИН и условиями корректного функционирования с имплементацией защитных функций обычно не формализуется и не изучается системно.

В связи с чем конечным этапом исследований становится оценка литературы в тематике автоматики и защит. В современных системах чаще всего рассматривается вопрос управления, связанный с ростом доли распределённых источников на инверторной основе, для которых характерны изменения измерительной картины аварийных режимов и ограничения токов. Эти особенности отражены в обзорных работах по координации защит [11,12]. Отдельно анализируются проблемы применимости традиционных защитных принципов и особенности направленных токовых функций в присутствии инверторных источников [13], а также подходы к оптимизации уставок и координации направленных токовых защит с учётом влияния IBR на селективность и чувствительность [14]. Вместе с тем влияние серийной компенсации напряжения и энергетических ограничений ДКИН на наблюдаемость режимов и на корректность последовательности защитных действий рассматривается существенно реже, а работы по комбинированным устройствам,

совмещающим компенсацию напряжения и ограничение токов короткого замыкания [15], относятся к иному классу задач и не закрывают вопрос координации с динамикой и ограничениями ДКИН в низковольтной сети. Следовательно, сохраняется актуальность комплексного рассмотрения переходного процесса, в котором режимы ДКИН, энергетическое состояние звена постоянного тока, параметры выходного звена и логика защиты и переключения анализируются совместно и формализуются в рамках единой схемы взаимодействия.

Цель исследования заключается в формировании комплексного подхода к согласованию алгоритмов работы динамического компенсатора искажений напряжения и системы защит в сетях 0,4 кВ при глубоких провалах напряжения через определение границы устойчивости системы и разработку логики безопасного перехода от режима компенсации к защитным мероприятиям, с учетом возможности подавления колебаний настройкой параметров компенсатора.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Выполняется анализ современной литературы по компенсации провалов напряжения с применением динамических компенсаторов в разрезе критических режимов.
2. Формируется математическое описание и модельная постановка системы, включающая шину постоянного тока, накопитель энергии и выходное фильтрующее звено типа RLC, а также критерии предельного режима компенсации.
3. Проводится параметрическое исследование влияния параметров устройства на устойчивость и колебательность переходного процесса с выделением условий, при которых колебательные процессы подавляются.
4. Разрабатывается аддитивная логика взаимодействия компенсатора и выбранных функций защиты, в которой признаки приближения к предельному режиму и режимы ограничения компенсации используются для своевременного инициирования защитных действий.

Научная значимость исследования заключается в объединении энергетико-динамического анализа предельных режимов компенсации с учётом влияния параметров компенсатора и разработке согласованной логики защитных функций для предотвращения критических режимов работы системы. Указанная значимость конкретизируется следующими основными научными результатами:

- аналитическая проработка позволила установить зависимости, связывающие параметры выходного RLC-фильтра и другие характеристики компенсатора с динамикой критического переходного процесса и определить, что данные параметры влияют не только на степень подавления колебаний, но и на границы области устойчивой компенсации, включая критическое напряжение и критический уровень заряда накопителя ( $SoC_{\text{крит}}$ );
- выполненная разработка алгоритма превентивного автоматического переключения на резервный источник питания (АВР) и других защитных мер, реализованных на основе аддитивной логики, позволила обеспечить прогнозирование момента достижения критического уровня заряда накопителя ( $SoC_{\text{крит}}$ ) и селективность работы защит, снижая вероятность некорректных срабатываний и обеспечивая устойчивость системы в предельных режимах.

В совокупности стабилизация параметров компенсатора и применение предложенной логики защиты обеспечивают существенное повышение устойчивости работы системы в предельных режимах, что приводит к повышению устойчивости системы.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенных принципов при внедрении динамических компенсаторов и других типов устройств компенсации в реальные низковольтные системы электроснабжения. Выстроенная согласованная логика и оптимизация параметров устройства могут быть реализованы на базе микропроцессорных устройств релейной защиты и подстанционной автоматики, поддерживающих пользовательские алгоритмы и быстрый обмен сигналами между конечными участниками сети. Исходя из предварительной оценки, внедрение таких решений должно сократить длительность провалов питания при переключениях АВР примерно на 90 % — до долей миллисекунд или полного их исключения, повысить временные возможности компенсации на 30–40 % за счёт значительного увеличения допустимого времени компенсации до стандартизированных пределов уровня напряжения и ускорить реакцию системы на критические возмущения с учётом выявленных взаимосвязей на 50–60 %.<sup>1</sup> Кроме того, применение данной логики позволит снизить количество

<sup>1</sup> Приведённые диапазоны являются ориентировочными и основаны на типовых сетях и обобщённых производственных данных. Их достоверность требует практической проверки на широкой выборке наблюдений; значения не являются окончательными.

внештатных остановок и увеличить среднее время наработки оборудования до отказа за счёт сокращения перегрузок и критических режимов.

**Теоретический анализ и математическая модель** (*Theoretical analysis and mathematical model*)

Поскольку, как ранее отмечалось, на динамику процесса влияет множество параметров системы, в рамках методики анализа основной акцент делается на параметрах устройства ДКИН. Это связано с тем, что они одновременно определяют требуемый уровень напряжения инвертора при компенсации заданной глубины провала и формируют условия демпфирования в выходном звене. Поэтому требуемое напряжение звена постоянного тока далее рассматривается как функция не только глубины провала и мощности нагрузки, но также параметров фильтрации и коэффициента трансформации. После определения требуемого напряжения звена выполняется оценка энергетических возможностей накопителя и вычисляются его критические параметры: критическое напряжение, критический уровень заряда и допустимое время устойчивой компенсации. Изначально необходимо оценить требуемое напряжение на узле шунтирующей RC-ветви выходного звена  $U_{RC,тр}$ , которое определяется заданным добавочным напряжением ДКИН  $U_{ДКИН,зад}$  и падением напряжения на утечках последовательной вторичной обмотки:

$$U_{RC,тр}(\delta) = k_{тр} \left( U_{ДКИН,зад}(\delta) + Z_{\sigma,2}(j\omega_1) I_{сети}(\delta) \right), \quad (1)$$

где  $\delta$  — глубина провала;  $U_{ДКИН,зад}$  — требуемое добавочное напряжение;  $U_{RC,тр}$  — требуемое напряжение на RC-узле;  $I_{сети}$  — ток сети;  $k_{тр} = N_1/N_2$  — коэффициент трансформации;  $\omega_1$  — круговая частота основной гармоники;  $Z_{\sigma,2}(j\omega_1) = R_{\sigma,2} + j\omega_1 L_{\sigma,2}$  — комплексное сопротивление утечек вторичной обмотки;  $R_{\sigma,2}$  — активная составляющая утечек;  $L_{\sigma,2}$  — индуктивность утечек.

Ток, связанный с компенсацией добавочного напряжения, можно привести к стороне инвертора через коэффициент трансформации:

$$I_{ДКИН}(\delta) = \frac{I_{сети}(\delta)}{k_{тр}}, \quad (2)$$

где  $I_{ДКИН}$  — ток, соответствующий передаче мощности через ВДТ.

Шунтирующая RC-ветвь таким образом формирует дополнительный ток, протекающий в линии, зависящий от её импеданса:

$$Z_{RC}(j\omega) = R_{CR} + \frac{1}{j\omega C_{RC}}, I_{RC}(\delta) = \frac{U_{RC,тр}(\delta)}{Z_{RC}(j\omega_1)}, \quad (3)$$

где  $R_{CR}$ ,  $C_{RC}$  — параметры RC-ветви;  $Z_{RC}$  — её комплексное сопротивление;  $I_{RC}$  — ток RC-ветви.

Тогда ток инвертора можно определить суммой токов:

$$I_{инв}(\delta) = I_{ДКИН}(\delta) + I_{RC}(\delta), \quad (4)$$

где  $I_{инв}$  — ток на выходе инвертора.

Падение напряжения на последовательной RL-ветви фильтра выражается через её комплексное сопротивление:

$$Z_{RL}(j\omega) = R_{LR} + j\omega L_{LR}, U_{RL}(\delta) = Z_{RL}(j\omega_1) I_{инв}(\delta), \quad (5)$$

где  $R_{LR}$ ,  $L_{LR}$  — параметры последовательной RL-ветви;  $Z_{RL}$  — её комплексное сопротивление;  $U_{RL}$  — падение напряжения на RL-ветви.

После чего требуемое фазное напряжение на стороне инвертора можно представить суммой напряжения на RC-узле и падения на RL-ветви:

$$U_{инв,тр}(\delta) = U_{RC,тр}(\delta) + U_{RL}(\delta), \quad (6)$$

где  $U_{инв,тр}$  — требуемое фазное напряжение инвертора.

Соотношения (1)–(6) задают требуемый уровень  $U_{инв,тр}$  и токовую нагрузку инвертора как функции параметров  $R_{LR}$ ,  $L_{LR}$ ,  $R_{CR}$ ,  $C_{RC}$  и  $k_{тр}$ . Из условия достижимости  $U_{инв,тр}$  при принятом способе формирования напряжения инвертором (ограничение по индексу модуляции) определяемое требуемое напряжение звена постоянного тока можно выразить как:

$$U_{DC,тр}(\delta) = \frac{2\sqrt{2}}{m_{\max}} |U_{инв,тр}(\delta)|, \quad (7)$$

где  $U_{DC,тр}$  — требуемое напряжение звена постоянного тока;  $m_{\max}$  — предельный индекс модуляции (для двухуровневого инвертора).

После задания уровня  $U_{DC,тр}$  можно перейти к непосредственному расчёту критического уровня накопителя и допустимого времени компенсации. Мощность, требуемая со стороны звена постоянного тока при компенсации провала глубины  $\delta$ , аппроксимируется и будет равна:

$$P_{DC}(\delta) \approx \frac{\delta P_{нагр}}{\eta}, \quad (8)$$

где  $P_{DC}$  — мощность со стороны звена постоянного тока;  $P_{нагр}$  — активная мощность нагрузки;  $\eta$  — эквивалентный КПД силовой части.

Для суперконденсаторного накопителя, выбранного в качестве источника энергии, исходя из совокупности его преимуществ, эквивалентные параметры батареи задаются через параметры одного элемента и число соединений:

$$C_{эkv} = C_{ном} \frac{N_{пар}}{N_{посл}}, \quad (9)$$

$$R_{эkv} = ESR_{ном} \frac{N_{посл}}{N_{пар}}, \quad (10)$$

где  $C_{эkv}$ ,  $R_{эkv}$  — эквивалентные ёмкость и последовательное сопротивление батареи;  $C_{ном}$  — номинальная ёмкость одного суперконденсатора;  $ESR_{ном}$  — эквивалентное последовательное сопротивление одного суперконденсатора;  $N_{посл}$ ,  $N_{пар}$  — число последовательно и параллельно соединённых элементов.

Критическое напряжение накопителя в результате задаётся через требуемое напряжение звена постоянного тока и падение напряжения на эквивалентном сопротивлении при отдаче конечной мощности:

$$U_{нак,крит}(\delta) = U_{DC,тр}(\delta) + R_{эkv} \frac{P_{DC}(\delta)}{U_{DC,тр}(\delta)}, \quad (11)$$

где  $U_{нак,крит}$  — критическое напряжение накопителя.

Допустимое время компенсации в результате определяется временем разряда накопителя от начального напряжения  $U_0$  до  $U_{нак,крит}(\delta)$  при квазипостоянном отборе мощности:

$$t_{доп}(\delta) = \frac{0,5 C_{эkv} (U_0^2 - U_{нак,крит}^2(\delta))}{P_{DC}(\delta)}, \quad (12)$$

где  $t_{доп}$  — допустимое время устойчивой компенсации;  $U_0$  — начальное напряжение накопителя.

Критический уровень заряда суперконденсаторной батареи определяется из энергетической интерпретации (энергия пропорциональна квадрату напряжения), поэтому в нормированном виде будет равен:

$$SoC_{крит}(\delta) = \frac{U_{нак,крит}^2(\delta)}{U_0^2}, \quad (13)$$

где  $SoC_{крит}$  — критическое значение состояния заряда накопителя.

Полученные выражения показывают, что приближение напряжения накопителя к  $U_{нак,крит}$  снижает возможность поддерживать заданную компенсацию, а при одновременном ухудшении демпфирования выходного звена возрастает риск перехода к колебательным режимам и сокращения  $t_{доп}$ . Для более точного определения конечных зависимостей и оценки влияния выделенных параметров необходимо выполнить моделирование работы системы с установленными параметрами, которое будет представлено далее.

### Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследования таким образом является участок системы электроснабжения низшего напряжения 0,4 кВ с группой приводной и вспомогательной нагрузки, чувствительной к глубоким провалам напряжения. В качестве основных электроприёмников приняты асинхронные двигатели АИМУ-225М2 и АИМУ-180М4, а также статическая нагрузка собственных нужд (СН). СН является эквивалентной долей вспомогательных потребителей низкой мощности и моделирует питание шкафов управления и маломощных нагрузок, чтобы обеспечить реалистичное суммарное поведение шины в переходных режимах, включая влияние на токи в момент провала и на характер восстановления после компенсации и переключений. Номинальные и расчетные параметры, используемые для задания моделей двигателей и нагрузки, приняты по верификационной части модели шины 0,4 кВ и соответствуют компрессорному и вентиляторному характеру механической нагрузки (рис. 1). В модели также учтены кабельные линии выбранных потребителей, поскольку их активные и реактивные сопротивления влияют на динамику токов и напряжений при провале и при работе компенсатора. Структура самого устройства компенсации ДКИН принята типовой и включает силовой инвертор, звено постоянного тока с накопителем энергии, выходное фильтрующее звено и вольдобавочный трансформатор. Накопитель задан как суперконденсаторная установка, а ее питание в модели учитывает конечное время восстановления уровня заряда, поскольку это влияет на повторную готовность ДКИН к компенсации и на корректность работы автоматики при повторных событиях. Компьютерная модель реализована в MATLAB Simulink и предназначена для воспроизведения провалов напряжения, регистрации напряжений до и после ДКИН, токов нагрузки и ветвей фильтра, напряжения и мощности звена постоянного тока, а также для проведения параметрических исследований по накопителю и по выходным звеньям



устройства. Отдельно в модели фиксируются сигналы состояния ДКИН, которые затем используются в логике защит и автоматики, включая признак активной компенсации, признак ограничения компенсации и признак приближения к предельному режиму.

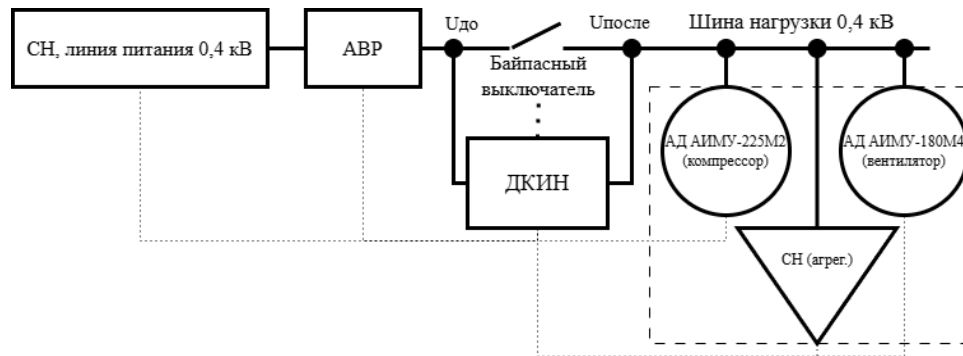


Рис. 1. Структура узла 0,4 кВ с ДКИН

Fig. 1. 0.4 kV section with DVR

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

Предварительные результаты (рис. 2–3) моделирования режима работы системы для заданного объекта при провале глубиной 0,6 о.е. показывают, что варьирование параметров накопителя в основном лишь смещает критическую точку доступной компенсации ( $U_{\text{нак,крит}}$ ,  $SoC_{\text{крит}}$ ), но слабо влияет на характер конечного переходного процесса. При этом изменение данных параметров приводит лишь к полной остановке системы, с возможностью восстановления только после стабилизации напряжения на вышестоящей линии питания, не позволяя в значительной степени продлить время стабильной компенсации без значительного увеличения емкости. Так как изменения параметров источника не привели к значительным результатам, дальнейшие этапы верификации исходя из ранее полученных математических выражений будут основываться и оцениваться при варьировании параметров, расположенных вне звена постоянного тока — прежде всего параметров выходной фильтрации и вольтдобавочного трансформатора, которые через (1)–(6) и (13) определяют требуемый уровень  $U_{\text{ДС,тр}}(\delta)$  и оказывают более существенное влияние на колебательный процесс.

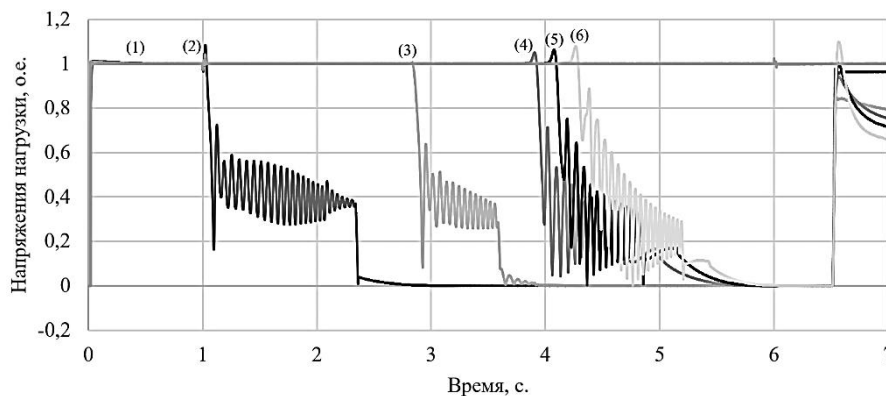


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при изменении сопротивления СУ и приближения к предельному режиму для падения напряжения в размере 0,6 о.е. в момент 1 с, с последующим восстановлением в 6,5 с при компенсации: 1  $U_{\text{ideal}}$ ; 2  $10 \cdot R_{\text{экв}}$ ; 3  $5 \cdot R_{\text{экв}}$ ; 4  $R_{\text{экв}}$ ; 5  $0,5 \cdot R_{\text{экв}}$ ; 6  $0,1 \cdot R_{\text{экв}}$ .

Fig. 2. Oscillograms of the load voltage (RMS) when varying the SU resistance and approaching the limiting operating mode, for a voltage drop of 0.6 p.u. at  $t = 1$  s with subsequent recovery at  $t = 6,5$  s: 1 –  $U_{\text{ideal}}$ ; 2 –  $10 \cdot R_{\text{eq}}$ ; 3 –  $5 \cdot R_{\text{eq}}$ ; 4 –  $R_{\text{eq}}$ ; 5 –  $0,5 \cdot R_{\text{eq}}$ ; 6 –  $0,1 \cdot R_{\text{eq}}$ .

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

Имитационное моделирование и верификация исходя из предыдущих тезисов проводились для двух сценариев возмущений:

1.режим работы системы с возникновением возмущения электропривода при набросе нагрузки в 2 раза в интервале  $t = 1 - 6$  с, сопровождаемый провалом напряжения на стороне сети глубиной 0,6 о.е. в  $t = 7 - 12$  с;

2.режим работы системы с возникновением внешнего провала напряжения глубиной 0,4 о.е. в интервале  $t = 1 - 8$  с.

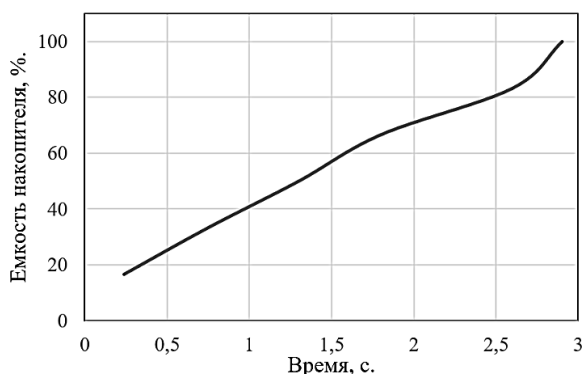


Рис. 3. Зависимость допустимого времени компенсации от емкости СУ для провала напряжения в размере 0,6 о.е.

Fig. 3. Dependence of the allowable compensation time on the SU capacitance for a voltage sag of 0.6 p.u.

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

Для каждого сценария рассматриваются четыре варианта реализации системы:

1. без условий стабилизации переходного процесса, без отстройки комбинированной логики защит;
2. без условий стабилизации переходного процесса, с комбинированной настройкой защит;
3. со стабилизацией переходного процесса, без отстройки комбинированной логики защит;
4. со стабилизацией переходного процесса, с комбинированной настройкой защит.

Остальные исходные параметры системы в пределах каждой итерации оставались неизменными, что обеспечивает сопоставимость результатов и позволяет выделить вклад исследуемых настроек в устойчивость компенсации и динамику переходных процессов.

#### Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В результате проведения опытов по стабилизации переходного процесса в критическом режиме работы компенсатора были выделены оптимальные значения параметров компенсатора при неизменных значениях накопительного устройства, что позволило отказаться от дальнейшего варьирования ранее исследованных параметров и сосредоточиться на наиболее влияющих переменных.

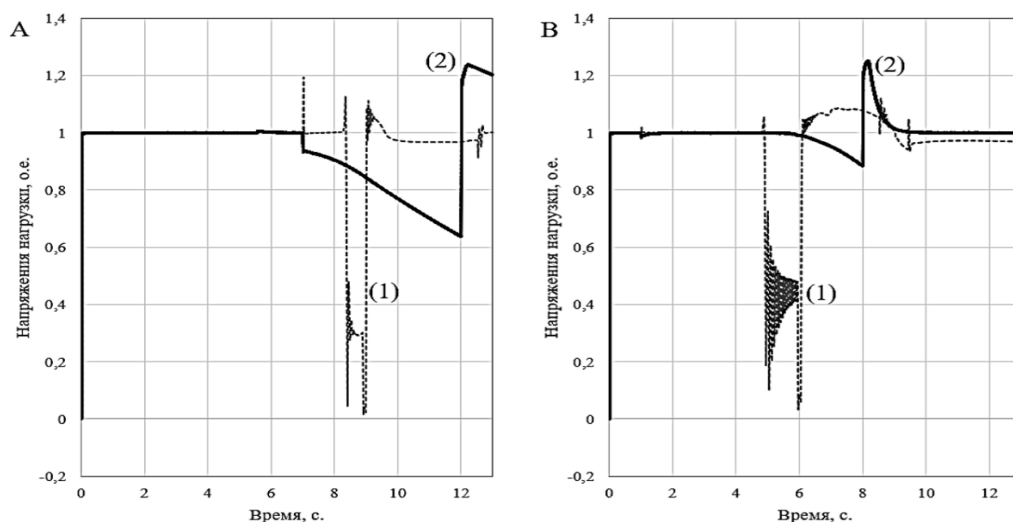


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при компенсации: А – провал 0,2 о.е., при  $t = 5$  с, и провал 0,6 о.е. при  $t = 5$  с; В – провал 0,6 о.е., при  $t = 7$  с; 1 – при старых параметрах ДКИН; 2 – при новых параметрах ДКИН.

Fig. 4. Load voltage (RMS) waveforms during compensation: A – 0.2 p.u. sag at  $t = 5$  s and 0.6 p.u. sag at  $t = 5$  s; B – 0.6 p.u. sag at  $t = 7$  s. 1 – DVR with previous parameters; 2 – DVR with updated parameters.

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

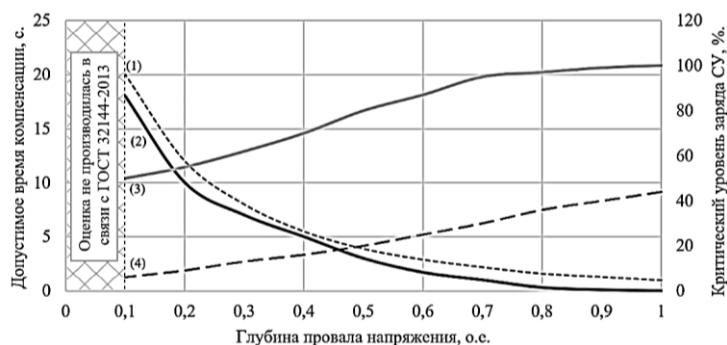


Рис. 5. Смещение границы устойчивой компенсации при изменении параметров системы:  $t_{доп}(\delta)$  и  $SoC_{крит}(\delta)$ : 1 –  $t_{доп}(\delta)$  при старых параметрах ДКИН; 2 –  $t_{доп}(\delta)$  при новых параметрах ДКИН; 3 –  $SoC_{крит}(\delta)$  при новых параметрах ДКИН; 4 –  $SoC_{крит}(\delta)$  при старых параметрах ДКИН.

Fig. 5. Shift of the stable compensation boundary when the system parameters change:  $t_{доп}(\delta)$  and  $SoC_{крит}(\delta)$ : 1 –  $t_{доп}(\delta)$  with the old DVR parameters; 2 –  $t_{доп}(\delta)$  with the new DVR parameters; 3 –  $SoC_{крит}(\delta)$  with the new DVR parameters; 4 –  $SoC_{крит}(\delta)$  with the old DVR parameters.

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

При циклическом выборе параметров конечной фильтрации, исходя из неизменности показаний в штатном режиме и соблюдения частотно-резонансных характеристик фильтра для стабильного подавления гармонических составляющих, в момент активации компенсации и перехода в нестабильный режим, удалось добиться оптимальных параметрических установок (рис. 4). Для двух режимов работы системы с учетом возникновения провалов напряжения, вызванных увеличением момента нагрузки и провалом напряжения с глубиной 0,6 о.е., а также отдельным провалом напряжения с глубиной 0,4 о.е. удалось полностью исключить выявленную колебательность системы (рис. 4А(2) и 4В(2)). Однако при этом границы конечной допустимой компенсации оказались существенно смещены как по уровню критического заряда, так и по допустимому времени компенсации (рис. 5). Фактически после изменения параметров система стала предъявлять более жесткие требования к накопителю. Чтобы удерживать режим компенсации без перехода в предельное состояние, системе, исходя из ранее полученных данных, необходим более высокий уровень заряда и напряжения накопителя. Вне данных условий достижение критической точки происходит быстрее, что напрямую связано с тем, что перенастройка выходных звеньев цепи меняет ранее выделенные ключевые параметры системы. При росте требуемого напряжения на стороне инвертора требуется поддерживать более высокий уровень DC-напряжения, из-за чего критическая точка по уровню заряда смещается вверх и накопитель достигает предельного режима уже при более высоком SoC. Аналогично, увеличение дополнительных токов и потерь в выходных звеньях повышает фактическую мощность, снимаемую с накопителя, ускоряет разряд и сокращает допустимое время компенсации.

Возвращаясь к оценке проведенного опыта, полученные данные показывают значительные изменения в самом переходном процессе по истечении времени компенсации, а также в характере восстановления напряжения. Полученные результаты отвечают поставленной задаче и подтверждают ранее сформулированные выводы. Однако в случае изменённых параметров наблюдается более выраженный восстановительный процесс по амплитуде импульса и по времени выхода напряжения к номинальному уровню после восстановления питания. Такой характер обусловлен тем, что при изменении параметров выходного фильтрующего звена меняются эквивалентные демпфирующие свойства и фазо-частотные характеристики выходной цепи, вследствие чего смещается точка, в которой обеспечивается требуемое сглаживание коммутационных составляющих и подавление динамических отклонений напряжения на стороне нагрузки. При неизменной частоте среза конечных фильтров перераспределение сопротивлений и реактивностей в звене приводит к изменению динамических свойств преобразовательной части, а значит также влияет и на формы отклика при переключении режимов и восстановлении напряжения. Дополнительно следует учитывать, что в момент начала компенсации для новых параметров системы питающее напряжение уже снижено провалом напряжения, вызванным набросом нагрузки на двигатель и его отключением, поэтому переход в режим компенсации происходит при уменьшенной жесткости источника и повышенной чувствительности системы к параметрам

фильтрации. В этих условиях после окончания интервала компенсации формируется кратковременный, но более интенсивный переходный процесс, связанный с изменением баланса мощностей и переформированием напряжения на стороне нагрузки. При этом длительность такого процесса остаётся недостаточной для срабатывания защит по минимальному напряжению и по перегрузке при принятых выдержках времени, а также не приводит к запуску АВР. Для первичных параметров системы включение АВР происходит штатно, однако сопровождается заметным интервалом работы нагрузки при пониженном напряжении и кратковременным снижением напряжения до нуля в момент коммутации.

Таким образом, характер переходных процессов при внедрении ДКИН и особенно при изменении его параметров становится фактором, напрямую влияющим на условия срабатывания защит и последовательность переключений. В связи с этим возникает вопрос, который был поставлен ранее, а именно, реализация комбинированной логики срабатывания защит как ДКИН, так и отдельных потребителей, а также АВР. С учётом достигнутой стабилизации переходного процесса выделяется также дополнительная задача использования сформированного запаса устойчивого и плавного снижения напряжения до допустимого минимума как временного ресурса компенсации, применяемого для согласования работы ДКИН с защитами и АВР, исключения преждевременных отключений и сокращения избыточных коммутаций. Реализация такой согласованной последовательности действий и описывается ниже в виде комбинированной логики, где компенсация, диагностика и защитные функции увязаны по условиям срабатывания и по признакам восстановления режима.

Исходя из полученных данных о значительном влиянии параметров источника питания на продолжительность конечной возможности компенсации, представленная логика (рис. 6) реализуется на базе циклического анализа состояния питания и нагрузки, а также качества напряжения на стороне потребителей с разнесением контроля до ДКИН и после ДКИН. Построенная логика таким образом включает компенсационные, диагностические и защитные действия, рассматриваемые как элементы единого переходного процесса.

В изначальном состоянии компенсатор находится в режиме ожидания и выполняет пассивный контроль напряжения на конечной нагрузке, а также отслеживает состояние накопителя, включая подзаряд звена постоянного тока. При снижении напряжения ниже порогового уровня на контролируемой линии  $U_{\text{порог}}$  фиксируется событие провала и запускается первичный цикл анализа причин, представленный на схеме штриховыми контурами и обратными связями. В этом цикле сопоставляются измерения на стороне среднего уровня напряжения (СН) по данным вышестоящего измерительного трансформатора, уровни напряжения после трансформации СН и до входа ДКИН, а также предыстория состояния нагрузки, включая параметры электроприводов и их нагрузку до начала события и при его непосредственном приближении. По результатам сопоставления формируются признаки, указывающие на наиболее вероятный источник нарушения режима и возможный проблемный участок. Данные признаки используются при выборе дальнейшей ветви алгоритма. При отсутствии провала либо при незначительном отклонении, когда  $U^* > U_{\text{порог}}$ , система сохраняет режим ожидания. Параллельно действует диагностическая ветвь, в которой при несоответствии входного напряжения или параметров нагрузки допустимым условиям формируется предупреждение о неопределённой причине провала и допускается компенсация только до предельного режима, а при обнаружении неисправности ДКИН выполняется его отключение с обесточиванием и сигнализацией кода ошибки.

После подтверждения существенного провала определяется его принадлежность диапазону компенсации ДКИН ( $U_{\text{min}} \leq U^* < U_{\text{max}}$ ). Если провал относится к рабочей области компенсации, либо при значительно более глубоком провале дополнительно подтверждена доступность резерва по АВР, формируется задание на добавочное напряжение  $U_{\text{ДКИН,зад}}(\delta)$ , и ДКИН переходит в режим компенсации, поддерживая напряжение на стороне нагрузки. Если провал выходит за выбранный диапазон компенсации и является наиболее глубоким, выполняется проверка доступности резерва по уровню напряжения на смежной линии питания и исправности ввода. При достаточном уровне напряжения резерва и готовности коммутационного аппарата допускается включение компенсации как переходного средства на время подготовки переключения. При недостаточном уровне напряжения резерва либо при неисправности ввода переключение на резерв блокируется, а дальнейшие действия определяются возможностями ДКИН и выбранными защитными функциями.

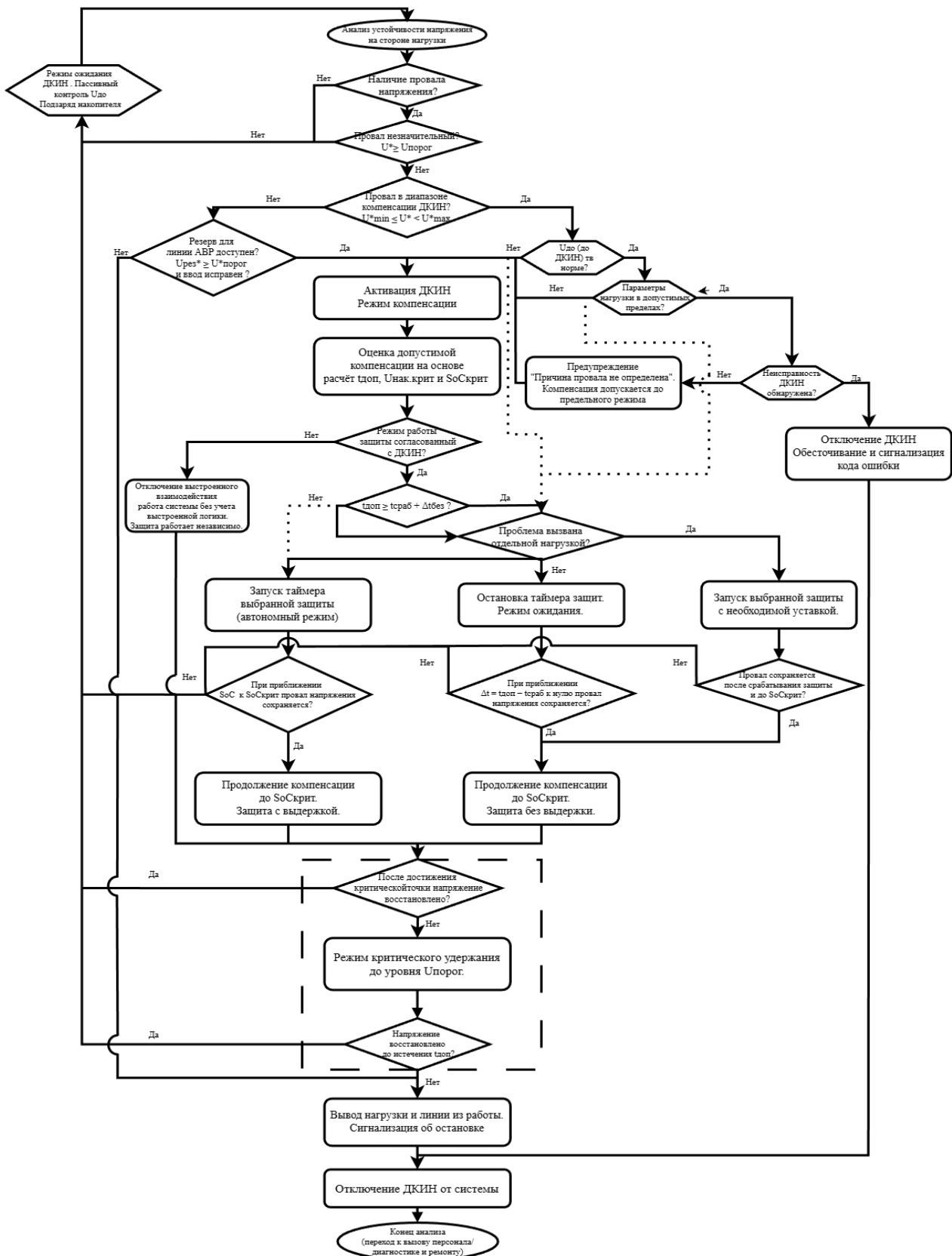


Рис. 6. Блок-схема работы системы управления защиты ДКИН с формированием сигнала предельного режима для внешней автоматики.

Fig. 6. Block diagram of the operation of the DVR protection control system with generation of a limit-mode signal for external automation.

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

При этом стоит отметить, что эти этапы анализа могут быть реализованы в логике защиты в случае использования ранее указанных микропроцессорных контроллеров и

других быстродействующих устройств автоматики, которые позволяют провести выборку данных за время, не превышающее допустимого интервала ввода ДКИН в работу.

Одновременно с переходом в режим компенсации оценивается допустимость её продолжения по энергетическим ограничениям накопителя, для чего рассчитываются либо задаются  $t_{\text{доп}}(\delta)$ ,  $U_{\text{нак,крит}}(\delta)$  и  $SoC_{\text{крит}}(\delta)$ , определяющие границу устойчивой работы звена постоянного тока и допустимую длительность поддержания требуемой компенсации. Дальнейшие действия определяются наличием согласованного режима работы защит с ДКИН. Возможность согласования предусматривается как для штатной эксплуатации, так и для режимов пуска наладки и ремонта, когда требуется автономная работа защит и уточнение параметров по результатам экспериментальной оценки. При отсутствии согласования комплекс защитных устройств функционирует независимо, а компенсация рассматривается как локальная мера повышения устойчивости нагрузки. При наличии согласования энергетический ресурс ДКИН сравнивается с требуемым временем срабатывания выбранной защитной функции. При достаточном запасе  $t_{\text{доп}} \geq t_{\text{сраб}} + \Delta t_{\text{без}}$  запускается таймер защиты, и компенсация продолжается до достижения  $SoC_{\text{крит}}$  при сохранении выдержки. При сокращении запаса компенсация допускается до  $SoC_{\text{крит}}$ , а действие защиты переводится в режим минимальной выдержки вплоть до достижения максимально допустимого уровня напряжения, что исключает выход ДКИН за энергетический предел. Ветвь, в которой провал интерпретируется как следствие отдельной нагрузки, приводит к запуску выбранной защиты с необходимой уставкой, не блокируя ее работу, что позволяет локализовать возмущение и сохранить работоспособность остальных участков системы с уменьшением вероятности дополнительных переходных процессов из-за избыточных коммутаций. В режиме ожидания таймеры защит останавливаются при наличии признаков восстановления или отсутствия системного нарушения и возобновляются только при подтверждении сохранения провала по напряжению до ДКИН.

После достижения критического уровня по напряжению накопителя,  $SoC$  или по времени ресурса проверяется восстановление напряжения вне зоны компенсации по напряжению до ДКИН. В логике также учитывается, что предварительный подбор параметров выходного звена и его соответствие конечному переходному процессу позволяет увеличить время допустимой компенсации до заданной критической уставки по напряжению на нагрузке и обеспечить работу при более тяжёлых возмущениях без раннего перехода к отключению системы, что расширяет полезный диапазон компенсации относительно типовых границ срабатывания защит. При сохранении нарушения питания формируется сигнал предельного режима, который используется внешней автоматикой как приоритетный признак необходимости защитных действий и не трактуется как восстановление питания. Переходя к описанию данного сценария, при отсутствии восстановления питания вводится режим критического удержания, при котором выполняется ограниченная компенсация до уровня  $U_{\text{порог}}$ , позволяющая кратковременно избежать резкого провала на нагрузке. Если напряжение не восстанавливается до истечения допустимого времени с учетом отключения нагрузки или перевода системы на резервный источник, выполняется вывод нагрузки и линии из работы с сигнализацией об остановке и последующим отключением ДКИН от системы. Такой порядок работы обеспечивает компенсацию настолько долго, насколько это допускают условия устойчивой работы звена постоянного тока и компенсатора в целом, и предотвращает ненужные отключения и повторные переключения. При низком напряжении на резервной линии АВР остаётся заблокированным, а при стабилизации сети в процессе компенсации отсчёт выдержки прерывается, что исключает переключение при восстановлении питания во время работы ДКИН.

Касаясь отстройки логики устройств автоматики, для упрощённой реализации защиты минимального напряжения (ЗМН) и защиты от перегрузки, принята схема с выдержкой времени при снижении напряжения ниже уставки, в которой предусматривается логическая блокировка на интервал переключения АВР, что исключает одновременные действия двух автоматических устройств на одном событии, а также формирование признака окончания переходного процесса по восстановлению напряжения после переключения. Для АВР реализована схема двухходового питания на основе сравнения действующих значений напряжений основного и резервного вводов с уставками, с выдержками времени на подтверждение аварийного режима, на отключение с контролем восстановления питания (рис. 7). Для согласования АВР с режимами компенсации в логический контроллер АВР введён информационный вход от ДКИН, так же, как и для других типов защит. При формировании сигнала предельного режима АВР инициирует переключение на резерв до начала развития слабодемпфированных колебаний выходного

звена и до момента, когда ДКИН перестанет обеспечивать требуемую компенсацию. Такая связь исключает задержку перехода на резерв из-за временного удержания напряжения на стороне нагрузки и предотвращает преждевременное переключение при устойчивой работе ДКИН и достаточном запасе по  $t_{\text{доп}}$ .

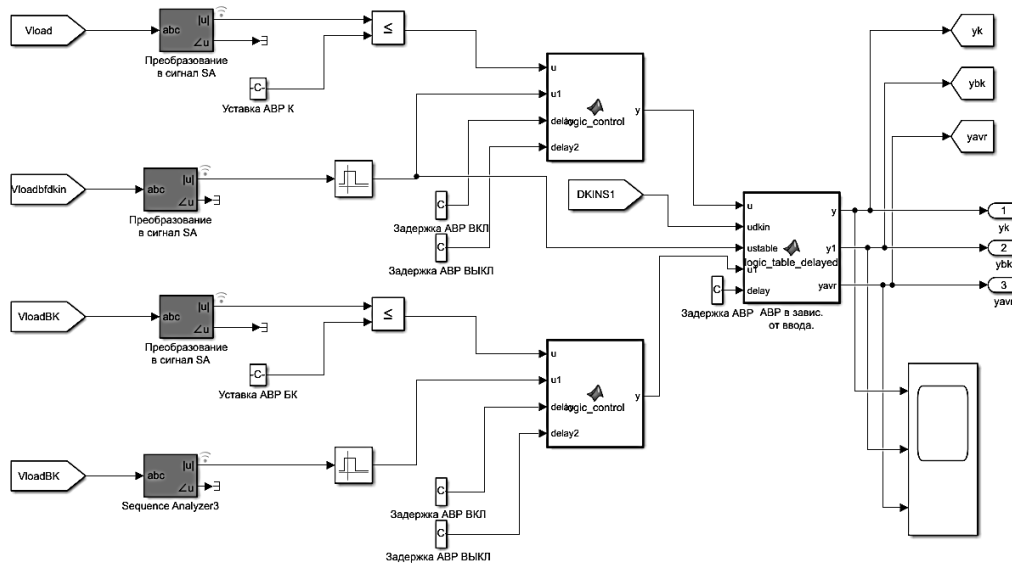


Рис. 7. Контур управления логикой АБР при совмещении с ДКИН в программном комплексе MATLAB Simulink.

Fig. 7. Control loop of the ATS logic when integrated with the DVR in the MATLAB Simulink.

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

В результате внедрения и верификации данной согласованной логики взаимодействия ДКИН с защитами для режима работы системы, соответствующего ранее рассмотренному сценарию (рис. 8), получен режим, полностью соответствующий решению поставленной задачи. По сравнению с вариантом без дополнительных связей удалось в большей степени снизить влияние коммутаций на электромеханические режимы нагрузки и уменьшить выраженность динамических эффектов, определявших качество напряжения и характер восстановления работы системы (рис. 9). В исходной постановке при неблагоприятной динамике выходного звена проявлялась колебательность, а при её подавлении на первый план выходили эффекты восстановительного процесса после завершения интервала компенсации, включая импульсный характер изменения напряжения и склонность к перегулированию. Реализованная логика устраняет критичность этих факторов за счёт того, что благодаря реализованной логике осуществляется переключение на смежную линию, которое назначается в пределах окна устойчивой компенсации и согласуется с оценкой энергетического ресурса накопителя и текущим уровнем напряжения на стороне сети. В результате реализации логики для нестабилизированных параметров процесс переключения выполняется до наступления предельного состояния, что исключает переход к слабодемпфированным колебаниям и одновременно сохраняет резерв энергии накопителя для компенсации полного исчезновения питающего напряжения на интервале коммутации, предотвращая провал напряжения на нагрузке при работе АБР. При устойчивом нисходящем характере изменения напряжения, когда отсутствуют признаки колебательности, обеспечивается удержание уровня остаточного напряжения порядка 0,9 о.е. в течение дополнительного времени, сформированного компенсацией, что создаёт окно для восстановления питания по основному вводу без обязательного перевода на резерв и, при отсутствии восстановления, позволяет выполнить принудительное переключение на смежную линию без доведения ДКИН до энергетического предела. Моделирование работы защит по минимальному напряжению и по перегрузке подтверждает, что наличие такого временного окна позволяет выполнять селективные действия в пределах допустимого времени компенсации без полного обесточивания смежных участков, сокращая перерыв питания и снижая число коммутаций оборудования и эксплуатационные нагрузки на силовую часть и коммутационные аппараты.

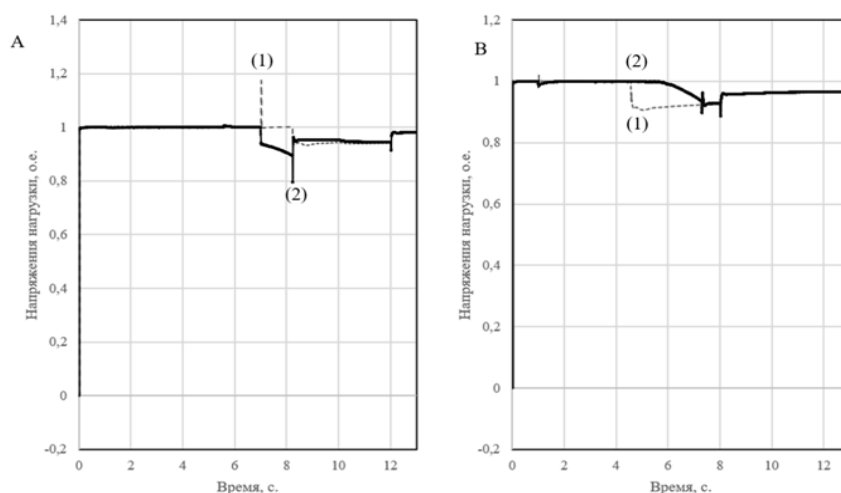


Рис. 8. Осциллограммы напряжения (RMS) нагрузки при компенсации: А – провал 0,2 о.е., при  $t = 5$  с, и провал 0,6 о.е. при  $t = 5$  с; В – провал 0,6 о.е., при  $t = 7$  с; 1 – при старых параметрах ДКИН; 2 – при новых параметрах ДКИН.

Fig. 8. Load voltage (RMS) waveforms during compensation: A – 0.2 p.u. sag at  $t = 5$  s and 0.6 p.u. sag at  $t = 5$  s; B – 0.6 p.u. sag at  $t = 7$  s 1 – DVR with previous parameters; 2 – DVR with updated parameters.

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

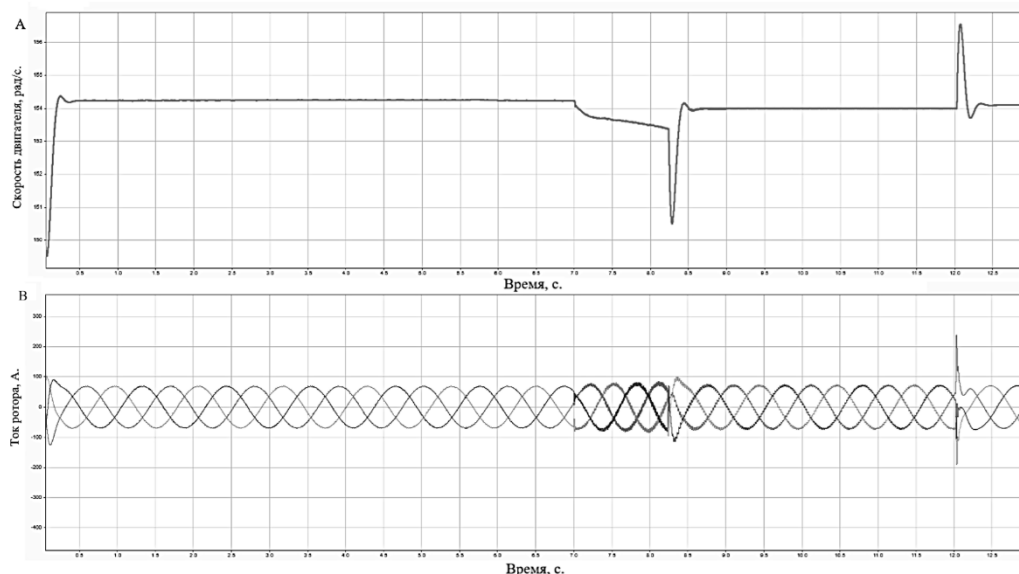


Рис. 9. Параметры двигателя АИМУ-180М4 при конечной модификации системы защит и стабилизации переходного процесса: А – скорость вращения двигателя; В – ток ротора двигателя.

Fig. 9. Parameters of the AIMU-180M4 motor under the final modification of the protection and transient-process stabilization system: A - motor rotational speed; B - motor rotor current.

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

Суммируя вышеизложенный результат, можно сказать, что:

1. согласование ДКИН с защитами обеспечивает управляемое использование окна устойчивой компенсации, предотвращая провалы напряжения на нагрузке в интервале коммутации и исключая развитие слабодемпфированных колебаний;
2. сформированный временной резерв в результате проведения оптимизации параметров ДКИН позволяет повысить селективность и результативность защитных действий без избыточных переключений, снижая длительность перерыва питания и эксплуатационные нагрузки на оборудование.

#### Заключение (Conclusions)

Проведённое исследование показало, что применение ДКИН должно рассматриваться как совместная задача силовой части и алгоритмов взаимодействия с автоматикой и защитным оборудованием, поскольку именно при их согласовании и



комбинированном использовании возможно определить и добиться наиболее устойчивого переходного процесса и корректности защитных и коммутационных действий в низковольтных линиях питания с приводной и вспомогательной нагрузкой, чувствительной к глубоким провалам напряжения. Построенная имитационная модель в программном комплексе MATLAB Simulink позволила воспроизвести реалистичное суммарное поведение шины для выбранных сценариев и оценить влияние компенсации на конечную линию в момент восстановления с учетом характера последующего переходного процесса.

Параметрическая оптимизация накопителя энергии и выходных звеньев ДКИН, включая настройку фильтрации и других параметров системы, позволила расширить границы управляемого переходного процесса и увеличить интервал устойчивой компенсации без выхода в предельные режимы звена постоянного тока, что особенно важно с учётом конечного времени восстановления уровня заряда накопителя и требований к повторной готовности устройства. За счёт этого становится возможным формирование более продолжительного и предсказуемого режима работы при провалах напряжения и последующих переключениях, в результате чего снижается выраженность неблагоприятных переходных явлений и формируются условия для выполнения селективных действий с меньшим риском внештатных срабатываний и с меньшей глубиной ухудшения питания чувствительной нагрузки. Построенная логика защит и автоматики, использующая признаки активной компенсации в дополнение к стабилизации переходного процесса, обеспечивает согласование момента переключений с текущими возможностями ДКИН и предотвращает доведение устройства до энергетического предела и в значительной степени стабилизирует конечные переходные процессы. При этом предложенная логика взаимодействия использует параметры, традиционно рассматриваемые как внутренние для ДКИН, в частности SoC и напряжение звена постоянного тока  $U_{\text{нак}}$ , в качестве входных сигналов для внешней автоматики, что представляет собой новый подход к интеграции компенсатора с устройствами защиты и автоматики. В результате компенсация перестаёт быть изолированной функцией восстановления напряжения и становится управляемым ресурсом системы, повышающим предсказуемость обеспечения устойчивости питания и снижающим вероятность развития слабодемпфированных колебаний, негативных переходных процессов, а также иных режимных отклонений при повторных событиях искажений напряжения.

### Литература

1. Скопин Г.А. Анализ программных средств для исследования функционирования динамических компенсаторов искажений напряжения // Нефть и газ — 2024. 2024. С. 820-821.
2. Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.
3. Анализ взаимодействия динамического компенсатора искажений напряжения с системами релейной защиты и автоматики // Фёдоровские чтения 2025: материалы конференции. 2025. ISBN 978-5-7046-3297-9. URL: <http://epp.mpei.ru/fedchten/>.
4. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Васильев В.В. Использование устройств динамического восстановления напряжения в электрических сетях 0,4 кВ // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17. № 3(82). С. 119-132. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_3\_119.
5. Abdelaal A.K. et al. Sliding mode control based dynamic voltage restorer for voltage sag compensation // Results in Engineering. 2024. Vol. 24 (102936). DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.
6. Huang L. et al. Modulation strategy of dynamic voltage restorer based on dual-feedforward active disturbance rejection compound controller // Frontiers in Energy Research. 2024. Vol. 12 (1462565). DOI: 10.3389/fenrg.2024.1462565.
7. Soomro A.H. et al. Enhancement of power quality based on dynamic voltage restorer matrix inverter-sliding mode control scheme // Electric Power Systems Research. 2025. Vol. 241 (111408). DOI: 10.1016/j.epsr.2025.111408.
8. Li S. et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation // Electronics. 2023. Vol. 12. № 3 (531). DOI: 10.3390/electronics12030531.

9. Nori A.M. et al. Enhancing Fault Ride-Through and Power Quality in Wind Energy Systems Using Dynamic Voltage Restorer and Battery Energy Storage System // *Electronics*. 2025. Vol. 14. № 14 (2760). DOI: 10.3390/electronics14142760.
10. Абрамович Б.Н., Богданов И.А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // *Записки Горного института*. 2021. Т. 249. С. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
11. Manju A.S. et al. Design and control of LCC DVR // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15 (25730). DOI: 10.1038/s41598-025-07618-x.
12. Alasali F. et al. The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13074.
13. Shyamaprasad A. et al. Field analysis of directionality measurement with inverter-based distributed energy resource system // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2025. DOI: 10.1049/gtd2.70008.
14. Li J. et al. Optimal protection coordination for directional overcurrent relays in radial distribution networks with inverter-based distributed energy resources // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025. Vol. 167 (110622). DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110622.
15. Amogne Y. et al. Fault current limiting dynamic voltage restorer for power quality improvement in distribution system // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2025. DOI: 10.1186/s43067-025-00233-w.

#### Авторы публикации

**Скопин Георгий Андреевич** – аспирант РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. *Email*: asostrak@gmail.com.

**Комков Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. *Email*: komkov.a@gubkin.ru.

#### References

1. Skopin GA. Analysis of software tools for studying operation of dynamic voltage distortion compensators. *Neft' i gaz* — 2024. 2024:820-821. (In Russ.). (eLIBRARY ID: 72011737).
2. Dzyuin DV, Skopin GA, Komkov AN, Dmitrieva VV. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(2):49-62. (In Russ.). DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.
3. Interaction analysis of a dynamic voltage distortion compensator with relay protection and automation systems. In: *Fyodorovskie chteniya 2025: conference proceedings*. 2025. ISBN 978-5-7046-3297-9. Available at: <http://epp.mpei.ru/fedchten/>.
4. Afonichev DN, Pilyaev SN, Vasil'ev VV. Ispol'zovanie ustroystv dinamicheskogo vosstanovleniya napryazheniya v elektricheskikh setyakh 0.4 kV. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024;17(3(82)):119-132. (In Russ.). DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_3\_119.
5. Abdelaal AK, et al. Sliding mode control based dynamic voltage restorer for voltage sag compensation. *Results in Engineering*. 2024;24:102936. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.
6. Huang L, et al. Modulation strategy of dynamic voltage restorer based on dual-feedforward active disturbance rejection compound controller. *Frontiers in Energy Research*. 2024;12:1462565. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1462565.
7. Soomro AH, et al. Enhancement of power quality based on dynamic voltage restorer matrix inverter-sliding mode control scheme. *Electric Power Systems Research*. 2025;241:111408. DOI: 10.1016/j.eprsr.2025.111408.
8. Li S, et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation. *Electronics*. 2023;12(3):531. DOI: 10.3390/electronics12030531.
9. Nori AM, et al. Enhancing Fault Ride-Through and Power Quality in Wind Energy Systems Using Dynamic Voltage Restorer and Battery Energy Storage System. *Electronics*. 2025;14(14):2760. DOI: 10.3390/electronics14142760.

10. Abramovich BN, Bogdanov IA. Povyshenie effektivnosti avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov neftegazovykh predpriyatii. Zapiski Gornogo instituta. 2021;249:408-416. (In Russ.). DOI: 10.31897/PML.2021.3.10.
11. Manju AS, et al. Design and control of LCC DVR. Scientific Reports. 2025;15:25730. DOI: 10.1038/s41598-025-07618-x.
12. Alasali F, et al. The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review. IET Generation, Transmission & Distribution. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13074.
13. Shyamaprasad A, et al. Field analysis of directionality measurement with inverter-based distributed energy resource system. IET Generation, Transmission & Distribution. 2025. DOI: 10.1049/gtd2.70008.
14. Li J, et al. Optimal protection coordination for directional overcurrent relays in radial distribution networks with inverter-based distributed energy resources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2025;167:110622. DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110622.
15. Amogne Y, et al. Fault current limiting dynamic voltage restorer for power quality improvement in distribution system. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2025. DOI: 10.1186/s43067-025-00233-w.

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

**Georgy A. Skopin** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. Email: asostrak@gmail.com.

**Aleksandr N. Komkov** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. Email: komkov.a@gubkin.ru.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **25.02.2026 г.**

**Отредактировано** **01.04.2026 г.**

**Принято** **14.04.2026 г.**



## ЭЛЕКТРОННАЯ МЕТКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЗАДЕРЖКИ ТОКА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Головин М.М., Портнягин Н.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

golovin.maksim.m@gmail.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что в подчиненных системах управления асинхронным электроприводом электромагнитная инерционность роторной цепи учитывается, как правило, косвенно (через постоянную времени ротора), тогда как при повышении быстродействия токовых контуров она формирует измеримую задержку и влияет на фазовый запас системы. НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. Работа формирует экспериментальную базу для верификации динамических моделей асинхронной машины, включая оценку эквивалентной постоянной времени ротора по данным осциллографирования. ЦЕЛЬ. Разработать и апробировать метод экспериментального определения задержки тока ротора относительно опорного события на стороне статора на основе кратковременной электронной метки. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ. Предложен способ «маркировки» процесса прямоугольным импульсом, вводимым в фазу статора. Метка формируется генератором на таймере NE555 и подается через оптрон TLP627(F), обеспечивающий гальваническую развязку сигнальной и силовой цепей. Регистрация выполняется цифровым осциллографом с дифференциальным щупом; испытания проведены на лабораторном двигателе IMM71 (370 Вт) в режиме заторможенного ротора ( $s=1$ ). РЕЗУЛЬТАТЫ. Показана устойчивость формирования и регистрации импульсной метки на фоне сетевого напряжения 50 Гц. По осциллограммам получена оценка фазовой задержки тока ротора относительно опорного события порядка 40–45 градусов, что соответствует 2.2–2.5 мс при частоте 50 Гц. ВЫВОДЫ. Электронная метка повышает воспроизводимость измерения задержки в асинхронной машине с фазным ротором и может использоваться для валидации имитационных моделей и для настройки токовых контуров, учитывающих электромагнитную инерционность роторной цепи.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; фазный ротор; электронная метка; фазовый сдвиг; задержка тока; токовый контур; оптронная развязка; NE555.

**Для цитирования:** Головин М.М., Портнягин Н.Н. Электронная метка для экспериментальной оценки задержки тока ротора асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 103-111. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-103-111.

## ELECTRONIC MARKER FOR EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ROTOR CURRENT DELAY IN AN INDUCTION MOTOR

Golovin M.M., Portnyagin N.N.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

golovin.maksim.m@gmail.com

**Abstract:** RELEVANCE. In subordinate and field-oriented control of induction motor drives, rotor electromagnetic inertia is often treated implicitly. However, when the bandwidth of inner current loops is increased, rotor dynamics introduces a measurable delay and affects stability margins. SCIENTIFIC SIGNIFICANCE. The study provides an experimental basis for validating induction-machine dynamic models and for estimating an equivalent rotor time constant from oscillograms. OBJECT. To develop and validate a laboratory method for estimating rotor current delay with respect to a stator-side reference event using a short electronic marker. METHODOLOGY. A rectangular pulse marker is injected into one stator phase. The marker is generated by an NE555 pulse generator and delivered through a TLP627(F) optocoupler, providing galvanic isolation. A digital oscilloscope with a differential probe records the marker on the 50 Hz waveform together

with rotor current. The test is carried out in a locked-rotor condition (slip  $s=1$ ). RESULTS. The marker is reliably detected on top of the supply waveform. The measured phase delay between the stator reference and the rotor current response is about 40–45 degrees (2.2–2.5 ms at 50 Hz). CONCLUSIONS. The electronic marker approach improves repeatability of rotor delay measurements and can be used for simulation validation and current-loop tuning that accounts for rotor electromagnetic inertia.

**Keywords:** induction motor; wound rotor; electronic marker; phase shift; current delay; current loop; optocoupler isolation; NE555.

**For citation:** Golovin M.M., Portnyagin N.N. Electronic marker for experimental estimation of rotor current delay in an induction motor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 103-111. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-103-111.

### **Введение (Introduction)**

Асинхронный электропривод (АД) широко применяется в технологических установках и вспомогательных механизмах, включая объекты нефтегазовой промышленности. Для повышения энергоэффективности и управляемости активно используются преобразователи частоты и подчиненные системы управления, в которых внутренний токовый контур строится существенно быстрее внешних контуров скорости и момента.

При стремлении увеличить полосу пропускания токового контура проявляется влияние внутренних динамических факторов: электрической постоянной времени ротора, нелинейностей магнитной системы, задержек измерительного тракта, дискретизации и вычислительных задержек. Эти факторы приводят к уменьшению фазового запаса, перерегулированию и снижению устойчивости при фиксированных настройках регулятора.

Для асинхронной машины с фазным ротором роторная цепь доступна для прямого измерения тока через контактные кольца. Однако классическое определение фазового сдвига между синусоидальными сигналами статора и ротора не обеспечивает стабильной воспроизводимости из-за неопределенности опорной точки и помех.

Актуальность работы связана с потребностью в практическом лабораторном методе, позволяющем однозначно привязать измерение задержки отклика ротора к событию на стороне статора.

Цель исследования — разработка и апробация метода измерения задержки тока ротора относительно опорного события на стороне статора на основе кратковременной электронной метки.

Научная значимость — формирование экспериментальной базы для верификации динамических моделей асинхронной машины и ориентировочной оценки постоянной времени ротора.

Практическая значимость — повышение воспроизводимости измерений, необходимых для настройки токовых контуров и согласования модели и объекта.

Отдельно следует подчеркнуть, что наблюдаемое «запаздывание» в асинхронной машине не сводится только к  $\tau$ -L динамике роторной цепи. В силовой магнитной цепи (статорный и роторный сердечники) при перемагничивании возникают динамические эффекты: вихревые токи, перераспределение потоков по сечению, релаксация доменной структуры и частотно-зависимые потери. Эти явления приводят к тому, что магнитная индукция  $B$  и намагничивающая сила  $H$  могут быть сдвинуты по фазе даже при синусоидальном воздействии, а эквивалентная магнитная ветвь приобретает инерционность. В современной литературе такие эффекты рассматриваются в контексте моделей потерь в магнитных сердечниках и динамической гистерезисной зависимости  $B(H, f)$ , в том числе через разделение потерь на гистерезисные, вихретоковые и «аномальные» составляющие [1].

В данной работе экспериментальная идея состоит в том, чтобы использовать электронную метку как опорное событие на стороне статора и оценить суммарную задержку отклика ротора, которая включает вклад электромагнитной связи и динамики магнитной цепи. Таким образом, измерение задержки служит косвенным тестом на наличие конечного времени установления магнитных процессов в машине.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Дополнительную теоретическую интерпретацию задержки удобно строить через уравнения релаксационного типа. В классической теории магнитного резонанса Ф. Блох

ввёл феноменологические уравнения для вектора намагниченности  $M$ , включающие прецессию и релаксацию к равновесному состоянию с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$  [2]. Несмотря на то что исходно уравнения Блоха относятся к ядерной намагниченности, их важная идея — существование конечного времени релаксации, из-за которого система «не успевает» мгновенно следовать воздействию — универсальна и часто используется как модель первого порядка для описания инерционности магнитных процессов.

Для ферромагнитных сердечников электрических машин аналогичные эффекты проявляются как фазовый сдвиг между  $H$  и  $B$  и как частотно-зависимые потери. Обзор современных моделей потерь в магнитных сердечниках подчёркивает роль динамических механизмов (вихревые токи, перемещение доменных стенок, релаксационные явления), которые можно эквивалентно представлять в виде инерционных звеньев в магнитной ветви [1]. Модели построения статических и динамических петель гистерезиса для электротехнических сталей, применяемые для расчёта потерь и фазовых эффектов, также рассматриваются в современной литературе [3]. В контексте асинхронной машины это означает, что при воздействии на статор не только токи, но и магнитный поток имеет конечное время установления; следовательно, в измеряемой задержке отклика ротора может присутствовать вклад динамики магнитной цепи. Эксперимент с электронной меткой направлен на выделение и устойчивую регистрацию этой задержки.

В последние годы наблюдается усиление требований к динамике и энергоэффективности электроприводов, что приводит к развитию как классических регуляторов (ПИ/PR<sup>1</sup>), так и предиктивных алгоритмов управления. В частности, в работе Bašić и соавт. рассмотрено предиктивное управление током (MPCC<sup>2</sup>) и показано, что учет насыщения и потерь в модели асинхронной машины способен улучшать качество управления, но повышает требования к адекватности параметров модели [4]. В задачах IFOC<sup>3</sup> ключевым параметром является постоянная времени ротора, чувствительная к изменению сопротивлений при нагреве. Нап и соавт. предложили онлайн-метод настройки этого параметра с использованием высокочастотной инъекции и MRAS<sup>4</sup>-оценивания, что подчеркивает важность экспериментальной верификации параметров ротора [5]. Для высокопроизводительных приводов растёт интерес к предиктивному управлению моментом. В работе Janisch и соавт. предложена высокопроизводительная стратегия MPTC<sup>5</sup> для индукционных машин, ориентированная на применение в электромобилях; при этом отмечается чувствительность предиктивных методов к ошибкам модели и задержкам измерения [6]. В отечественной литературе отдельное направление составляют исследования энергоэффективности и оптимизации режимов асинхронных двигателей. Так, Мартынов и соавт. оценивали влияние конструктивных решений обмотки статора на энергетические характеристики двигателя [7], а Цветков и соавт. рассматривали вопросы оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля [8]. В [9] приведены примеры имитационного моделирования режимов энергетических систем с использованием *MATLAB/Simulink*, а также исследования конструктивных решений электрических машин [10]. С аппаратной точки зрения для формирования опорного события и безопасного ввода сигнала в силовую цепь применяются распространенные компоненты: таймер NE555 [11] и оптрон TLP627 [12].

В инженерных задачах построения имитационных моделей востребованы методы параметризации схемы замещения по каталожным данным и программная реализация вычисления параметров, что показано в работе Дзюина и Дмитриевой [13]. Примеры построения моделей асинхронного двигателя для анализа пуска и переходных процессов приведены в статье Ольховатова и соавт. [14]. Таким образом, современная литература подтверждает, что учет динамики и задержек является важным условием как для классических контуров тока, так и для предиктивных методов, а значит необходимы воспроизводимые лабораторные процедуры измерения и верификации динамических параметров ротора.

<sup>1</sup> ПИ (PI (пропорционально-интегральный)) — пропорционально-интегральный регулятор, PR — пропорционально-резонансный регулятор;

<sup>2</sup> MPCC (предиктивное управление током, model predictive current control) — предиктивное управление током;

<sup>3</sup> IFOC (косвенное векторное управление по полю, indirect field-oriented control) — косвенное векторное управление по полю;

<sup>4</sup> MRAS (адаптивная система модели-эталона, model reference adaptive system) — адаптивная система модели-эталона;

<sup>5</sup> MPTC (предиктивное управление моментом, model predictive torque control) — предиктивное управление моментом.

Дополнительно отметим, что подходы к экспериментальной оценке переходных процессов и задержек в асинхронных машинах рассматривались в работах конференционного уровня [6], а также в прикладных исследованиях электроприводов для горных машин [11] и диагностике асинхронных двигателей по признакам повреждений обмоток [12]. Патентные решения по векторному управлению и структурам регуляторов подтверждают практическую востребованность учета внутренних динамических факторов [15].

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

В качестве объекта исследования выбран асинхронный двигатель лабораторного стенда типа IMM71 ( $P_n=370$  Вт;  $U_n=380/220$  В;  $I_n=1,37/2,37$  А;  $n_n=1370$  об/мин;  $\cos\varphi=0,7$ ;  $p=2$ ). Эксперимент выполнялся в режиме заторможенного ротора ( $s=1$ ), что позволяет минимизировать влияние механической инерции и сосредоточиться на электромагнитной динамике. В фазу статора вводилась прямоугольная метка (электронный импульс), которая использовалась как опорное событие для синхронизации осциллограмм и измерения запаздывания отклика ротора.

Для теоретического обоснования вводится представление о конечном времени установления магнитных процессов. Ф. Блох предложил феноменологические уравнения, описывающие динамику вектора намагниченности  $M(t)$  с учётом релаксации к равновесию (постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$ ) [2]. В компонентной форме они записываются как:

$$\begin{aligned}\frac{dM_x}{dt} &= \gamma(M_y B_z - M_z B_y) - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} &= \gamma(M_z B_x - M_x B_z) - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} &= \gamma(M_x B_y - M_y B_x) - \frac{M_z - M_0}{T_1}\end{aligned}$$

где  $M_x, M_y, M_z$  - компоненты магнитного момента,  $B_x, B_y, B_z$  - компоненты магнитного поля,  $\gamma$  - гиромагнитное отношение,  $T_1$  и  $T_2$  - времена поперечной и продольной релаксации соответственно,  $M_0$  - равновесный магнитный момент

Для инженерной интерпретации низкочастотного перемангничивания удобно использовать релаксационное приближение первого порядка (без детализации прецессии):

$$\frac{dM}{dt} + \frac{1}{\tau_m} M = \frac{1}{\tau_m} Meq(H)$$

где  $\tau_m$  — эффективное время установления магнитного состояния, включающее вклад вихретоковых и релаксационных процессов в стали [1, 3]. Для гармонического воздействия частоты  $\omega$  такая модель даёт фазовый сдвиг

$$|\varphi_m| = \arctan(\omega * \tau_m)$$

и эквивалентное запаздывание

$$\Delta t_m = |\varphi_m|/\omega$$

Чтобы интерпретировать измеренную задержку, далее используется разложение по вкладам. В общем виде измеряемая задержка  $\Delta t_{\text{общ}}$  может быть представлена как сумма

$$\Delta t_{\text{общ}} = \Delta t_r + \Delta t_m + \Delta t_{\text{изм}}$$

где  $\Delta t_r$  связано с электромагнитной динамикой роторной цепи (эквивалентная  $\tau_r$ ),  $\Delta t_m$  — вклад динамики магнитной цепи (эффективная  $\tau_m$ ), а  $\Delta t_{\text{изм}}$  — вклад измерительного тракта (каналы осциллографа, щупы, фильтрация). Практически  $\Delta t_{\text{изм}}$  оценивается калибровкой (подачей одного и того же импульса на оба канала). Для приближённого отделения  $\Delta t_r$  и  $\Delta t_m$  полезны два приёма: (а) сравнение задержки между меткой и током статора (как быстрым электрическим откликом) и задержки между меткой и током ротора; (б) изменение сопротивления внешней цепи ротора (добавочного сопротивления) при фиксированных параметрах магнитной цепи. Оценка  $\tau_r$  из фазового эквивалента может выполняться по соотношению

$$\tau = \frac{\tan(|\varphi|)}{2\pi f}, \#(1)$$

соответствующему модели первого порядка; при наличии заметного вклада магнитной цепи эта оценка отражает суммарный эффект и требует валидации серией опытов и сопоставлением с моделью. Оценка  $\tau$ , рассчитанная по (1), справедлива при аппроксимации динамики объекта моделью первого порядка (апериодическое звено) и при предположении, что фазовый сдвиг обусловлен одной доминирующей постоянной времени. В реальной асинхронной машине измеряемый сдвиг может включать вклад динамики более высокого порядка (дополнительные полюса), а также чистой задержки измерительного тракта и процессов в магнитной цепи. Поэтому  $\tau$ , определённая по (1), является эффективной (эквивалентной) оценкой и может иметь методическую погрешность. Ожидаемая

методическая погрешность такого упрощения, как правило, не превышает 10–20% и не влияет на качественный вывод о наличии задержки миллисекундного порядка.

Схемные и осциллографические материалы, поясняющие реализацию метки и процедуру измерений, приведены на рисунках 1–5.

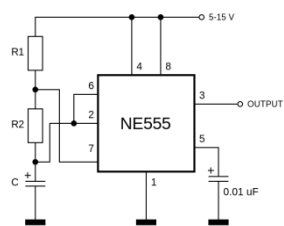


Рис. 1. Схема генератора прямоугольных импульсов (NE555)

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

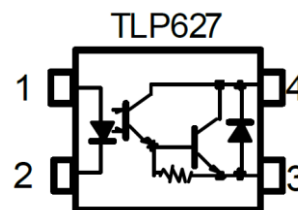


Рис. 2. Схема оптронной развязки (TLP627)

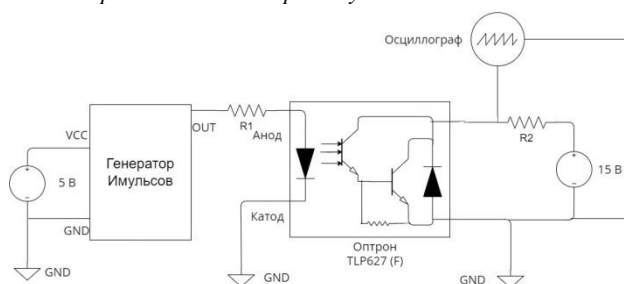


Рис. 3. Схема опыта (ввод метки в цепь статора в точке подключения осциллографа, регистрация сигналов)

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

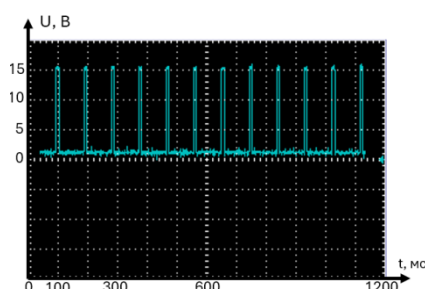


Рис. 4. Сигнал на осциллографе при автономной проверке узла метки

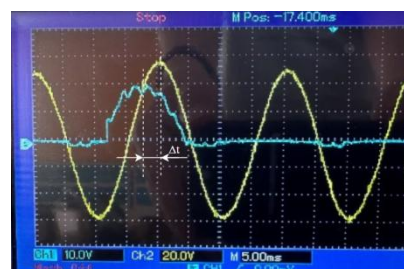


Рис. 5. Сигнал осциллографа при подключении электронной метки к цепи статора (50 Гц)

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

Интерпретация задержки с позиции инерционности магнитной цепи. Измеренная задержка  $\Delta t \approx 2.2\text{--}2.5$  мс отражает суммарный эффект: (а) г–L динамику роторной цепи, (b) конечную скорость установления потокоцепления из-за динамики магнитной цепи (вихревые токи и релаксация), (с) задержки измерительного тракта. Синяя кривая – это цепь ротора с учетом подмешивания импульса электронной метки, желтая – это цепь ротора. Для оценки вклада измерительного тракта рекомендуется предварительно выполнить калибровку каналов осциллографа на одном и том же сигнале и учесть систематический фазовый сдвиг каналов. Экспериментальная межканальная калибровка ( $\Delta t_{cal}$ ) не была зафиксирована отдельной серией измерений, поэтому численное значение  $\Delta t_{cal}$  не приведено. Вместе с тем вклад собственно осциллографа UTD2052CL в измерение временных интервалов ограничен паспортной точностью измерения  $\Delta T$ :  $\pm(T_s + 50 \text{ ppm} \cdot \Delta T + 0.4 \text{ ns})$ . Для  $\Delta T \approx 2\text{--}3$  мс компонент  $50 \text{ ppm} \cdot \Delta T$  составляет порядка  $0.1\text{--}0.15$  мкс, что существенно меньше измеряемой задержки миллисекундного уровня. Задержка, вносимая кабелями щупов имеет порядок  $5\text{--}7$  нс; при использовании одинаковых щупов на обоих каналах эта задержка в основном взаимно компенсируется, а остаётся лишь разностный вклад (skew) из-за различий трактов.



Для подтверждения устойчивости результата целесообразно проводить серию измерений при одинаковых условиях (напряжение, схема включения, режим  $s=1$ ) и оценивать среднее значение  $\Delta t$  и стандартное отклонение. Дополнительно можно исследовать влияние параметров внешней цепи ротора (например, добавочного сопротивления) на измеряемую задержку.

Пример расчёта параметров по измеренной задержке. Для иллюстрации пересчёта приведём пример: при  $\Delta t=2.4$  мс и  $f=50$  Гц фазовый эквивалент составляет  $\varphi = 360 \cdot f \cdot \Delta t \approx 43.2^\circ$ . По формуле (1) получаем  $\tau \approx 3.0$  мс. Эта величина сопоставима с ожидаемыми постоянными времени для машин малой мощности и может использоваться как ориентир при настройке наблюдателей и токовых контуров. Чувствительность к параметрам режима. Ожидается, что при изменении напряжения/частоты питающей сети и степени насыщения магнитной системы может изменяться вклад  $\Delta t_m$ . Поэтому перспективным является проведение опытов при нескольких значениях напряжения (в пределах допустимого) и, при наличии ПЧ, при нескольких частотах, что позволит отделить эффекты  $\gamma$ -L динамики ротора от частотно-зависимых магнитных явлений. Полученная задержка может быть использована как экспериментальный критерий адекватности модели: после параметризации схемы замещения модель должна воспроизводить не только установившиеся токи, но и величину  $\Delta t$  при импульсном воздействии. Если модель без учёта динамики магнитной цепи систематически занижает задержку, это является аргументом в пользу введения дополнительного инерционного элемента в магнитной ветви.

### Результаты (Results)

В ходе автономной отладки подтверждена устойчивость прямоугольных импульсов электронной метки: фронты отчётливо выделяются, амплитуда достаточна для уверенного триггирования. После подключения к цепи статора метка сохраняет идентифицируемую форму поверх синусоидального напряжения 50 Гц, что позволяет использовать её как однозначное опорное событие. В режиме заторможенного ротора по осциллограммам получена оценка задержки отклика ротора относительно метки порядка  $40\text{--}45^\circ$ , что эквивалентно  $\Delta t \approx 2.2\text{--}2.5$  мс при  $f=50$  Гц. При пересчёте по модели первого порядка это соответствует ориентировочной постоянной времени  $\tau \approx 2.7\text{--}3.2$  мс. По сравнению с измерениями без опорного импульса разброс оценок уменьшается, так как исключается неопределённость выбора момента отсчёта.

Количественные оценки задержки и производных параметров сведены в таблицу 1. Для расширения экспериментальной базы и отделения вкладов роторной и магнитной инерционности предложен план серии опытов (табл. 2).

Таблица 1

Table 1

Результаты оценки задержки тока ротора  
The results of the evaluation of the rotor current delay

| Показатель                               | Значение              | Примечание                                       |
|------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Фазовый эквивалент задержки $\varphi$    | $40\text{--}45^\circ$ | оценка по осциллограммам                         |
| Эквивалентное время $\Delta t$ при 50 Гц | 2.2–2.5 мс            | $\Delta t = \varphi / (360 \cdot 50)$            |
| Ориентировочная $\tau$                   | 2.7–3.2 мс            | $\tau \approx \tan( \varphi ) / (2\pi \cdot 50)$ |

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

Таблица 2

Table 2

План серии экспериментов для оценки вклада роторной и магнитной инерционности  
A plan for a series of experiments to evaluate the contribution of rotary and magnetic inertia

| Фактор                               | Уровни                        | Ожидаемый эффект                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| Режим скольжения                     | $s=1$ (заторм.); $s<1$ (ном.) | меняется вклад $\Delta t_r$                          |
| Напряжение сети                      | 0.8–1.0 $U_n$                 | влияние насыщения на $\Delta t_m$                    |
| Частота (при наличии ПЧ)             | 25/50/75 Гц                   | частотная зависимость потерь и $\varphi_m$           |
| Добавочное R ротора                  | 0; $R_{доп1}$ ; $R_{доп2}$    | изменяется $\tau_r \rightarrow \Delta t_r$           |
| Ток статора (эквивалентная нагрузка) | холостой/под нагрузкой        | изменяется магнитный поток                           |
| Повторы опыта                        | $N \geq 5$                    | оценка $\sigma(\Delta t)$ и доверительных интервалов |
| Калибровка каналов                   | до/после серии                | оценка $\Delta t$ изм                                |

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

Выполненные измерения показали, что электронная метка устойчиво регистрируется как на тестовой нагрузке, так и при подмешивании в фазу статора на фоне сетевого напряжения 50 Гц. Это обеспечивает однозначную синхронизацию каналов при осциллографировании и позволяет воспроизводимо оценивать временной сдвиг между опорным событием и реакцией ротора.

#### **Обсуждение (Discussions)**

Интерпретация измеренной задержки должна учитывать, что она является суммарной:  $\Delta t_{\text{общ}}$  складывается из вклада электромагнитной динамики роторной цепи ( $\Delta t_r$ ), динамики магнитной цепи ( $\Delta t_m$ ) и измерительного тракта ( $\Delta t_{\text{изм}}$ ). Роторный вклад связан с  $r$ - $L$ -инерционностью и конечной скоростью нарастания токов при  $s=1$ , а вклад магнитной цепи обусловлен тем, что потокосцепление не устанавливается мгновенно из-за вихревых и релаксационных процессов в стали; в инженерной форме это можно представлять как релаксационное звено с эффективным временем  $t_m$ , согласующееся с подходом релаксационных уравнений (в том числе в духе уравнений Блоха) и современных моделей потерь и гистерезиса магнитных сердечников. Таким образом, электронная метка выступает экспериментальным триггером, позволяющим измерить именно временной сдвиг отклика и связать его с параметрами модели.

С практической точки зрения полученная оценка задержки важна при настройке токового контура: увеличение полосы пропускания без учёта суммарной инерционности ( $t_r + t_m$ ) и задержек измерения/вычисления снижает фазовый запас и повышает риск перерегулирования. Поэтому результат рекомендуется использовать как критерий валидации имитационной модели (модель должна воспроизводить  $\Delta t$  при том же режиме) и как ограничение «реалистичной» настройки регулятора. Дальнейшая работа должна включать серию опытов по таблице 2 (изменение добавочного сопротивления ротора, напряжения/частоты при наличии ПЧ, повторяемость), калибровку  $\Delta t_{\text{изм}}$  и сопоставление с моделью, где динамика магнитной цепи учитывается через потери/гистерезис или эквивалентное инерционное звено.

Сопоставляя полученную интерпретацию с современной литературой, отметим следующее. Во-первых, в работах по моделям потерь в магнитных сердечниках и динамической гистерезисной зависимости подчёркивается, что частотно-зависимые механизмы (вихревые токи, релаксация доменной структуры, аномальные потери) приводят к фазовому сдвигу между  $H$  и  $B$  и могут быть эквивалентно представлены инерционными звеньями в магнитной ветви. Это согласуется с введением эффективного  $t_m$  при интерпретации задержки [1, 3]. Во-вторых, сама идея конечного времени релаксации как причины «неуспевания» магнитной подсистемы за воздействием соответствует феноменологической постановке уравнений Блоха и их инженерному релаксационному приближению, используемому в методике настоящей работы [2]. Следовательно, измерение  $\Delta t$  с помощью электронной метки может рассматриваться как практический тест адекватности выбранного уровня детализации модели магнитной цепи.

Ограничения проведённого исследования и направления улучшения методики связаны, прежде всего, с точностью измерения и зависимостью результата от режима. К систематическим факторам относятся возможный фазовый сдвиг измерительных каналов и влияние цепи ввода метки; к случайным — шум контактных колец и наводки. Рекомендуется обязательная калибровка каналов осциллографа на одном и том же импульсе, выполнение серии повторов с оценкой среднего и разброса  $\Delta t$ , а также проверка чувствительности результата к добавочному сопротивлению ротора и уровню насыщения (изменение напряжения/частоты при наличии ПЧ).

#### **Заключение (Conclusions)**

Разработан и экспериментально апробирован способ измерения электромагнитной задержки в асинхронной машине на основе электронной метки. Метка формируется генератором импульсов на таймере NE555 и вводится в цепь статора через оптронную развязку, что обеспечивает безопасную регистрацию опорного события и воспроизводимость измерений на фоне сетевого напряжения 50 Гц.

Показано, что использование метки позволяет синхронизировать осциллограммы и оценивать временной сдвиг между воздействием на статор и откликом ротора в режиме заторможенного ротора. Полученные экспериментальные оценки задержки имеют миллисекундный порядок и согласуются с представлением о конечной скорости установления электромагнитных процессов в роторной и магнитной цепях.

Предложена интерпретация измеренной задержки как суммарного эффекта, включающего вклад роторной цепи, динамики магнитной цепи и измерительного тракта. Это позволяет использовать измерение задержки как критерий верификации имитационной

модели и как практическое ограничение при настройке быстродействующих токовых контуров в системах векторного управления.

### Литература

1. Rodriguez-Sotelo D., Rodriguez-Licea M.A., Araujo-Vargas I., Prado-Olivarez J., Barranco-Gutiérrez A.-I., Perez-Pinal F.J. Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review // *Micromachines*. 2022. Т. 13. № 3. Ст. 418. doi:10.3390/mi13030418.
2. Bloch F. Nuclear Induction // *Physical Review*. 1946. Т. 70. № 7–8. С. 460–474.
3. Hamzehbahmani H., Anderson P.I. Static hysteresis modeling for grain-oriented electrical steels for dynamic modeling // *Journal of Applied Physics*. 2021. Т. 130. Ст. 055102. doi:10.1063/5.0058554.
4. Bašić M., Vukadinović D., Grgić I. Model Predictive Current Control of an Induction Motor Considering Iron Core Losses and Saturation // *Processes*. 2023. Т. 11. № 10. Ст. 2917. doi:10.3390/pr11102917.
5. Han Y., et al. Robust Online Rotor Time Constant Tuning Method with High-Frequency Current Injection for Indirect Field-Oriented Induction Motor Drives // *Symmetry*. 2025. Т. 17. № 10. Ст. 1729. doi:10.3390/sym17101729.
6. Janisch G., Kugi A., Kemmetmüller W. A high-performance model predictive torque control concept for induction machines for electric vehicle applications // *Control Engineering Practice*. 2024. Т. 153. Ст. 106128. doi:10.1016/j.conengprac.2024.106128.
7. Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021. Т. 23. № 6. С. 109–118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.
8. Цветков А.Н., Доан Н.Ш., Ярославский Д.А. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 3. С. 144–157. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.
9. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 3–12.
10. Сафин А.Р., Грачева Е.И., Behera R.K., Петров Т.И. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 47–55.
11. Texas Instruments. NE555 Precision Timers. Datasheet. Доступно по: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
12. Toshiba. TLP627, TLP627-2, TLP627-4 Photocouplers. Datasheet. Доступно по: <https://www.farnell.com/datasheets/2007824.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
13. Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2024. № 3. С. 84–92. doi:10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.
14. Ольховатов Д.В., Гребенников Н.В., Шевкунова А.В. Синтез электропривода компрессорной установки электровоза // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 5. С. 40–49. doi:10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.
15. Устройство управления вектором асинхронного электропривода. Патент РФ RU 2392732 С1. Оpubл. 20.06.2010. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU2392732C1/ru> (дата обращения: 31.01.2026).

### Авторы публикации

**Головин Максим Михайлович** – аспирант (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Email: [golovin.maksim.m@gmail.com](mailto:golovin.maksim.m@gmail.com).

**Портнягин Николай Николаевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-6073-9884>. Email: [pornic1@yandex.ru](mailto:pornic1@yandex.ru).

### References

1. Rodriguez-Sotelo D, Rodriguez-Licea MA, Araujo-Vargas I, et al. Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review. *Micromachines*. 2022;13(3):418. doi:10.3390/mi13030418.

2. Bloch F. Nuclear Induction. *Physical Review*. 1946;70(7-8):460-474.
3. Hamzehbahmani H, Anderson PI. Static hysteresis modeling for grain-oriented electrical steels for dynamic modeling. *Journal of Applied Physics*. 2021;130:055102. doi:10.1063/5.0058554.
4. Bašić M, Vukadinović D, Grgić I. Model Predictive Current Control of an Induction Motor Considering Iron Core Losses and Saturation. *Processes*. 2023;11(10):2917. doi:10.3390/pr11102917.
5. Han Y, et al. Robust Online Rotor Time Constant Tuning Method with High-Frequency Current Injection for Indirect Field-Oriented Induction Motor Drives. *Symmetry*. 2025;17(10):1729. doi:10.3390/sym17101729.
6. Janisch G, Kugi A, Kemmetmüller W. A high-performance model predictive torque control concept for induction machines for electric vehicle applications. *Control Engineering Practice*. 2024;153:106128. doi:10.1016/j.conengprac.2024.106128.
7. Martynov KV, Panteleeva LA, Blagodatskikh IA. Otsenka energeticheskikh kharakteristik asinkhronnogo dvigatelya s sovmeshchennoy obmotkoy [Estimation of energy characteristics of an induction motor with a combined winding]. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(6):109-118. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.
8. Tsvetkov AN, Doan NS, Yaroslavsky DA. Issledovaniya po optimizatsii vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem s primeneniem sistemy analiticheskogo kontrolya [Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using an analytical control system]. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022;24(3):144-157. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.
9. Ismoilov II, Gracheva EI. Povyshenie upravlyaemosti ehnergeticheskimi sistemami i uluchshenie kachestva ehlektroehnergii [Improving controllability of power systems and electric power quality]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022;14(1(53)):3-12. (In Russ).
10. Safin AR, Gracheva EI, Behera RK, Petrov TI. Ispol'zovanie ferritovykh magnitov v sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami [Using ferrite magnets in permanent-magnet synchronous motors]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022;14(1(53)):47-55. (In Russ).
11. Texas Instruments. NE555 Precision Timers. Datasheet. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>. Accessed: 31 Jan 2026.
12. Toshiba. TLP627, TLP627-2, TLP627-4 Photocouplers. Datasheet. Available at: <https://www.farnell.com/datasheets/2007824.pdf>. Accessed: 31 Jan 2026.
13. Dzyuin DV, Dmitrieva VV. Razrabotka programmy rascheta parametrov skhemy zameshcheniya trekhfaznogo asinkhronnogo ehlektrodvigateleya [Development of a program for calculating the equivalent circuit parameters of a three-phase induction motor]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii*. 2024;(3):84-92. (In Russ). doi:10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.
14. Olkhovaton DV, Grebennikov NV, Shevkunova AV. Sintez ehlektroprivoda kompressornoy ustanovki ehlektrovoza [Synthesis of an electric drive for an electric locomotive compressor unit]. *Transportnoe mashinostroenie*. 2024;(5):40-49. (In Russ). doi:10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.
15. Ustroistvo upravleniya vektorom asinkhronnogo ehlektroprivoda [Vector control device for induction drive]. Patent RUS RU 2392732 C1. Publ. 20 Jun 2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2392732C1/ru>. Accessed: 31 Jan 2026. (In Russ).

#### Authors of the publication

**Maksim M. Golovin** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. Email: [golovin.maksim.m@gmail.com](mailto:golovin.maksim.m@gmail.com).

**Nikolay N. Portnyagin** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-6073-9884>. Email: [pornic1@yandex.ru](mailto:pornic1@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 01.04.2026 г.

**Отредактировано** 14.04.2026 г.

**Принято** 06.05.2026 г.



## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ПУСКА

Деркачёв С.В., Сидоров В.А.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

sergey\_derkachev@mail.ru

**Резюме:** Развитие промышленного оборудования во многом обеспечивается использованием электромеханических систем, включающих приводной элемент – асинхронный двигатель. Техническое состояние электромеханической системы обеспечивает непрерывность и эффективность технологического процесса, что определяет актуальность применения различных методов диагностирования в практике эксплуатации. Проведенный краткий литературный обзор исследований в данном направлении указывает на общую тенденцию использования визуализации акустико-вибрационных сигналов, наряду с методами термографии для широкого применения. Известным фактом является то, что для диагностирования фактического состояния электромеханической системы высокой информативностью обладают переходные процессы. В проведенном исследовании оценка состояния проводилась на основе фиксации временных реализаций виброускорения в период запуска электромеханической системы (вентиляторного типа) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, что было реализовано с помощью прикладных программ к смартфону. В результате сформулированы основные признаки проявления неисправностей электрической и механической частей электромеханической системы при измерении виброускорения на корпусе электродвигателя – приводного элемента в режиме пуска, возникающие при этом сложности в формализации временных реализаций компенсируются пониманием физических процессов, сопровождающих процесс пуска, а также формированием справочника проявления признаков неисправностей. Полученные результаты использовались для принятия решений о целесообразности проведения ремонтных работ и показали достаточную точность безразборного диагностирования указанным методом при использовании относительной и взаимной оценки.

**Ключевые слова:** электромеханическая система; диагностирование; временная реализация; виброускорение; оценка состояния; переходный процесс.

**Благодарности:** Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзадания (FRRF-2024-0011).

**Для цитирования:** Деркачёв С.В., Сидоров В.А. Оценка технического состояния электромеханической системы на основе вибрационных показателей в режиме пуска // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 112-127. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-112-127.

## ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM BASED ON VIBRATION INDICATORS IN START-UP MODE

Derkachev S.V., Sidorov V.A.

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

sergey\_derkachev@mail.ru

**Abstract:** Object: This research aims to develop and validate a practical, low-cost methodology for the prompt technical condition assessment of electromechanical systems (EMS) during the startup transient. The primary goal is to enable binary classification ("satisfactory" or "unsatisfactory") of an EMS's state using vibration signals acquired solely via a smartphone's built-in accelerometer, facilitating widespread on-site screening without

*specialized equipment. Methods: The diagnostic approach is based on recording triaxial vibration acceleration time histories during the startup of industrial asynchronous motors driving screw compressors and exhaust fans. Using a dedicated mobile application (AccelerometerMeter), measurements were taken in three orthogonal directions (axial, horizontal, vertical) relative to the motor housing. The methodology relies on relative and mutual comparison of the recorded signals, focusing on transient characteristics rather than absolute metric values. Results were benchmarked against conventional vibration analysis conducted with professional equipment according to ISO standards and post-maintenance teardown inspections. Results: The analysis of startup vibration patterns successfully identified distinctive fault signatures. Key diagnostic indicators included anomalous peak amplitudes, sustained instability, and the presence of characteristic beats and shock impulses, particularly during star-delta switching. Empirical correlations were established between the spatial dominance of vibration (e.g., predominant axial vibration indicating misalignment, high vertical components suggesting foundation issues) and specific mechanical or electromagnetic faults. The smartphone-based method effectively differentiated between properly functioning systems and those with confirmed defects, such as bearing degradation or rotor imbalance, with conclusions corroborated by standard vibration severity assessments. Conclusions: Utilizing a smartphone for vibration analysis during the startup transient proves to be a highly effective and accessible tool for preliminary condition monitoring and screening of electromechanical assets. It provides a viable means for early fault detection in field conditions, allowing maintenance personnel to prioritize equipment for further detailed investigation using advanced diagnostic techniques. The study confirms the high informational content of transient processes for diagnostics and establishes a foundation for a structured, two-level monitoring strategy: initial rapid screening with mobile devices followed by targeted expert analysis, thereby optimizing maintenance resources and enhancing operational reliability.*

**Keywords:** electromechanical systems; condition monitoring; vibration analysis; startup transient; smartphone diagnostics; predictive maintenance.

**Acknowledgments:** The results of the work presented in the article were obtained during the implementation of research in the framework of the State Assignment (FRRF-2024-0011)

**For citation:** Derkachev S.V., Sidorov V.A. Assessment of the technical condition of an electromechanical system based on vibration indicators in start-up mode. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 112-127. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-112-127.

### **Введение (Introduction)**

Практически вся современная промышленность базируется на использовании электромеханических систем, безотказность которых во многом определяет показатели надежности всей системы. Наиболее распространённым вариантом реализации электромеханической системы является сочетание асинхронного или синхронного электродвигателя, выполняющего роль привода и соединённого с ним через соединительную муфту исполнительного механизма (компрессора, центробежного насоса, вентилятора, дымососа и др.). Согласование частот вращения и крутящего момента приводного двигателя и исполнительного механизма осуществляется при помощи редуктора. Основное конструкторское решение – двухопорный вал с консольным или межопорным расположением рабочего элемента.

Оценка состояния электромеханической системы, работающей в длительном режиме проводится по результатам измерения вибрационных показателей, для локализации места повреждения, измерения температуры узлов и анализу тока статора. Вопросы использования различных диагностических методов рассмотрены в ряде статей.

Для определения обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя используется: регрессионный анализ модуля результирующего вектора тока статора [1], разработка алгоритмов, основанных на различных подходах к обработке сигналов [2], сигнатуры дефектов извлекаемые из сигнала тока в соответствии с уровнем нагрузки, количеством повторов, амплитудой сигнала [3], спектральное вычитание токового сигнала [4]. Возникновение повреждений

подшипникового узла предлагается диагностировать по прямому спектру потребляемого тока [5], инклюзивная диагностика повреждений по частотным составляющим боковых полос тока нагрузки [6]. Измерение и анализ вибрационных показателей позволяет уверенно диагностировать перемещения ротора относительно статора и определять развитие короткого замыкания витков обмотки статора [7], возникновение межвитковых витковых замыканий сочетая разложение вейвлет-пакетов и статистический корреляционный анализ [8]. Особое внимание уделяется изучению причин повышенной вибрации: дисбаланс, износ подшипников, кавитация и др. на основе комплексного подхода, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей исходного сигнала виброускорения [9]. Одно из направлений в диагностировании электромеханического оборудования в нефтегазовой отрасли - мониторинг механических вибраций и параметров шума [10].

В работе [11] указывается, что анализ сигналов вибрации требует экспертных знаний, предлагается использовать много осевые статистические характеристики, алгоритмы машинного обучения, метод К-ближайших соседей и деревья решений для построения модели. В статье [12] рассматривается применение анализа акустических сигналов для обнаружения неисправностей подшипников, статора и ротора. Обсуждаются методы анализа во временной и частотной областях и признаки, полученные из необработанных акустических данных. Исследования [13] основанные на методах машинного обучения применяют метод классификации, преобразуя одномерные звуковые сигналы подшипников в двумерные скалограммы для трансферного обучения с предварительно обученной моделью. Визуализации звуковых сигналов [14], используется моделями классификации изображений для обнаружения неисправностей в электрических машинах и приводах.

Методология инфракрасной термографии [15] обеспечивает данные для анализа неисправностей трех состояний: двух, полутора уровней неисправности сломанного стержня ротора в асинхронном двигателе. В исследовании [16] предлагается использовать двумерные самоорганизующиеся операционные нейронные сети для диагностики несоосности и неисправностей ротора по тепловизионным изображениям асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Опубликован ряд работ, в которых мониторинг состояния двигателей и механизмов, выполняется путем обработки вибрационных показателей (виброускорения), полученных с помощью смартфона. В статье [17] представлена методика, использующая быстрое преобразование Фурье для определения составляющих компонентов вибрационного сигнала и сравнения их с информативными частотами возможных повреждений. Смартфон, в данном случае, выполняет роль сборщика данных, а компьютерная программа, использующая алгоритм нечеткой логики – роль экспертной системы.

В статье [18] предложено использование смартфона *Android* для сбора первичных данных о вибрации, которые затем передаются для обработки и визуализации в серии панелей управления, что позволяет в реальном времени отслеживать состояние оборудования, используя быстрое преобразование Фурье для идентификации источника максимального вибрационного сигнала.

Проведенные краткий обзор методов, используемых для обнаружения неисправностей асинхронного двигателя как приводного элемента электромеханической системы, указывает на тенденцию использования визуализации акустико-вибрационных сигналов, наряду с методами термографии для широкого практического применения. Следовательно, исследования в данном направлении обладают актуальностью на современном технологическом уровне знаний в области диагностирования.

Известным фактом является то, что для диагностирования фактического состояния электромеханической системы высокой информативностью обладают именно переходные процессы, даже относительно такого инертного показателя как температура. Одним из таких переходных процессов, представляющим интерес для диагностики, является режим пуска электромеханической системы, однако его кратковременность ограничивает возможности проведения спектрального анализа токовых характеристик, поскольку это требует использования специальной аппаратуры и более длительного интервала измерений, анализа характера шума, поскольку его восприятие является всегда субъективным, измерений общего уровня вибраций с последующим его спектральным анализом, поскольку время обработки исходных данных ограничивается временем пуска электромеханической системы.

Использование метода быстрого преобразования Фурье, получившего наибольшую популярность при обработке вибрационного сигнала, требует проведения усреднения, что исключает обнаружение случайных, непериодических, ударных реализаций,

предшествующих появлению симптомов развитого повреждения. Для условий длительного режима работы данный недостаток компенсируется квалификацией специалистов и временем развития повреждений. В практике эксплуатации электромеханических систем оценка состояния на уровне «удовлетворительно» и «неудовлетворительно», имея объективные показатели вибрационного сигнала становится основанием для оперативного принятия решения наряду с использованием субъективных методов диагностирования. Это определяет актуальность задачи анализа временного сигнала виброускорения при реализации быстропротекающих процессов запуска без применения сложных алгоритмов обработки данных, это определяет первый уровень анализа вибрации, при постановке диагноза.

Исходя из вышесказанного целесообразной представляется фиксация временных реализаций виброускорения в режиме пуска электромеханической системы в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. В режиме эксплуатации установка специальных датчиков на корпус элементов электромеханической системы или в цепи управления будет реализована после перехода на полную цифровизацию, что потребует некоторого промежутка времени. В этом случае фиксация временных реализаций виброускорения может быть реализована с помощью смартфонов с приложением *AccelerometerMeter*, которое позволяют выполнить измерение виброускорения электромеханической системы в режиме пуска благодаря встроенным акселерометрам, что позволяет получить реальную картину изменения виброускорения в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях.

В производственных условиях эксплуатации электромеханических систем целесообразно использовать метод относительной оценки, ориентируясь на индикаторные возможности акселерометра, встроенного в смартфон, поэтому цель исследования заключается в разработке и экспериментальной верификации методики экспресс-оценки технического состояния электромеханической системы на основе анализа временных реализаций виброускорения, регистрируемых в переходном режиме пуска. В отличие от традиционных подходов, требующих применения специализированной виброизмерительной аппаратуры и спектрального анализа в установившихся режимах, предлагаемая методика ориентирована на решение бинарной задачи классификации («удовлетворительно» / «неудовлетворительно») с использованием индикаторных возможностей встроенного акселерометра мобильного устройства. Такой подход позволяет минимизировать количество точек контроля, сократить время принятия решения и реализовать двухуровневую систему мониторинга: оперативный скрининг с последующим углубленным приборным диагностированием.

Научная значимость исследования состоит в установлении и систематизации диагностических признаков проявления неисправностей электрической и механической частей электромеханической системы, выявляемых непосредственно по временным реализациям виброускорения в пусковом режиме без применения процедур частотного преобразования и усреднения сигнала. В отличие от известных работ, ориентированных на спектральный анализ установившихся режимов или применение сложных алгоритмов машинного обучения к акустико-вибрационным данным, в настоящем исследовании обоснована возможность использования трёх осевого акселерометра смартфона в качестве инструмента первичной диагностики при условии относительной и взаимной оценки измеренных сигналов

Практическая значимость исследования заключается в том, чтобы в условиях эксплуатации с помощью программного приложения к смартфону выявить признаки неудовлетворительного состояния электромеханической системы для ее вывода из эксплуатации и дальнейшего безразборного диагностирования более точными методами включая методологию вибрационного анализа прямых спектров, огибающей, кепстров и др. Фиксация удовлетворительного состояния позволяет продолжить эксплуатацию электромеханической системы с неизменным графиком технического обслуживания.

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

Экспериментальная верификация методики экспресс-оценки технического состояния электромеханической системы на основе анализа временных реализаций виброускорения выполнена на трех типах промышленных систем, которые отличаются между собой мощностью, частотой вращения и конструкцией. В качестве таких энерготехнических систем был выбран винтовой компрессор SAB-163, приводом которого является асинхронный электродвигатель мощностью 200 кВт и частотой вращения 2975 об/мин, дымососы ДН-21ГМ (ДН-3 и ДН-4) с приводными асинхронными электродвигателями мощностью 90 кВт и частотой вращения 590 об/мин, дымосос ДН-15 с приводным асинхронным электродвигателем мощностью 75 кВт и частотой вращения 1499 об/мин. Пуска компрессора SAB-163 осуществляется с переключением соединения обмоток статора со схемы «звезда» на схему «треугольник» с выдержкой по времени равной 12 секунд, пуск дымососа выполняется по схеме



прямого пуска без переключения схемы.

Выбор приведенных объектов диагностирования обусловлен необходимостью проведения апробации предложенной методики диагностирования на оборудовании с заведомо известным техническим состоянием, подтвержденным традиционными методами вибродиагностики и последующими визуальными осмотрами.

Осуществлять контроль состояния электромеханической системы в режиме пуска предлагается с помощью смартфона со встроенным акселерометром и мобильного приложения *AccelerometerMeter*, что позволит осуществить фиксацию показателей виброускорения по трем направлениям относительно корпуса электродвигателя (рис. 1): X – поперечное (горизонтальное); Y – продольное (осевое); Z – вертикальное. Сразу необходимо отметить, что предлагаемый метод диагностирования имеет строго индикаторный характер и может быть использован только для относительного, а не абсолютного сравнения с нормативными значениями виброускорения.



Рис. 1. Направления измерения вибрации относительно положения электродвигателя привода дымососа ДН-21ГМ

Fig. 1. Directions of vibration measurement relative to the position of the electric motor of the DN-21GM smoke pump drive

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

Для реализации предлагаемого метода диагностирования с помощью смартфона для каждой энерготехнической системы выполнялось не менее 2 последовательных пусков без изменения положения смартфона, закрепленного в стандартной точке (проекция переднего подшипника на корпус), при этом контролировались жёсткость крепления и отсутствие люфта. Также для каждого типа электромеханической системы выполнялось 3–5 пусков на заведомо исправном оборудовании после капитального ремонта или по результатам приборной диагностики. Далее полученные временные реализации виброускорения по трём осям обрабатывались на компьютере.

Основным отличием предлагаемого метода диагностирования от приведенных в источниках [17, 18] методов является отказ от использования сложного спектрального анализа, а также проведение анализа именно временной реализации виброускорения в пусковом режиме. Такой подход обусловлен кратковременностью режима пуска, поскольку при малых интервалах измерений переходного процесса усреднение теряет информативность о возникающих случайных ударных импульсах.

Анализ полученных временных реализаций виброускорения выполняется поэтапно и для каждого из трех направлений (X, Y, Z) фиксируется отношение размахов виброускорения в установившемся режиме работы или непосредственно сразу после выхода на номинальную частоту вращения. В качестве контролируемых критериев выступают: максимальный размах виброускорения в каждом периоде, наличие или отсутствие хаотичных высокоамплитудных выбросов и форма возникающих колебаний. В процессе обработки результатов выполняется сравнение как абсолютных значений, так и соотношений между осями относительно эталона.

На основе обработки полученных экспериментальных данных для 15 единиц оборудования эмпирически установлены следующие пороговые значения: превышение максимального размаха виброускорения относительно эталона более чем на 50 %; появление хаотичных выбросов, отсутствовавших в эталоне; увеличение длительности пуска более чем на 20 %. Решение о состоянии электромеханической системы «неудовлетворительно» выносится в случае выполнения любого из приведенных условий. В противном случае состояние классифицируется как «удовлетворительно».

### **Результаты (Results)**

Предварительный этап при проведении эксперимента включал наблюдение за состоянием подшипников двигателя компрессора SAB – 163 вибрационными методами в течение пяти лет. Основная цель – определение рационального времени замены подшипника с развитыми повреждениями без повреждения рядом расположенных

деталей была достигнута с использованием математического моделирования на основе фактических данных об уровне значений виброускорения. Наличие увеличенного радиального зазора в результате абразивного износа было подтверждено визуальным осмотром после разрезки наружного кольца снятого подшипника.

Перед заменой, подшипников двигателя, проведена фиксация временных реализаций виброускорения в режиме пуска винтового компрессора типа SAB-163. Запуск осуществлялся в штатном режиме в два этапа (рис. 2): на первом этапе при соединении обмоток статора приводного асинхронного электродвигателя по схеме «звезда», через 11 секунд происходило переключение на схему соединения обмоток статора в «треугольник». Для анализа определено наиболее информативное вертикальное направление (ось Z) – винтовой компрессор установлен на виброопорах.

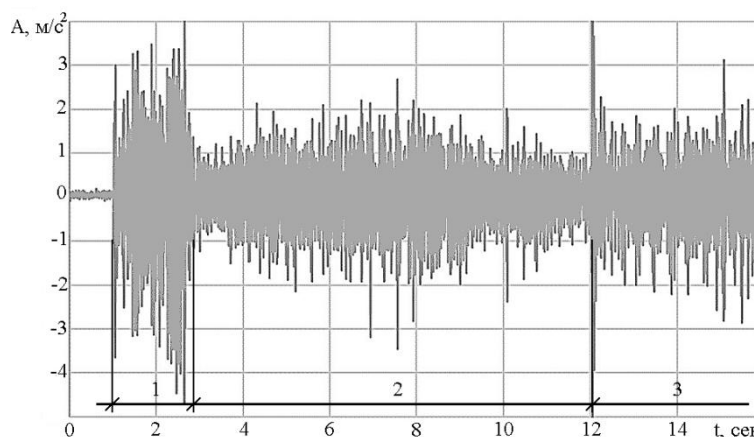


Рис. 2. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 при подшипниках, имеющих повреждения

Fig. 2. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor with damaged bearings

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

Достоинство временных реализаций – наглядность представления происходящих процессов, недостаток – сложность формализации изображения, что требует подготовки специалиста в области вибрационного анализа и динамики электрических машин. Для анализа выделены три периода: 1 – участок выхода на критическое скольжение; 2 – промежуточная работа по схеме «звезда»; 3 – длительная работа по схеме «треугольник». Фиксировались значения размаха виброускорения – минимальные и максимальные.

На рисунке 3 показано распределение выбранных периодов относительно механической характеристики асинхронного электродвигателя.

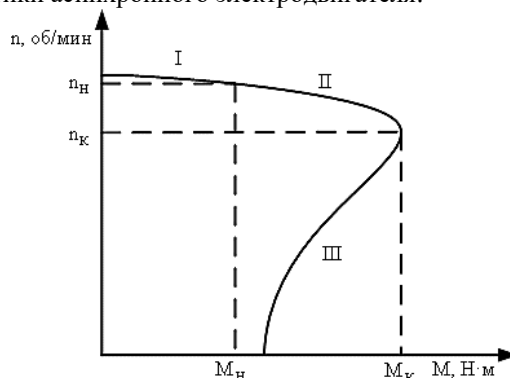


Рис.3. Распределение выбранных периодов относительно механической характеристики асинхронного электродвигателя

Fig.3. Distribution of the selected periods relative to the mechanical characteristics of an asynchronous electric motor

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

В момент пуска асинхронного электропривода в течение 2,7 с реализуется период 1 нестабильных колебаний виброускорения, связанный одновременно с воздействием электромагнитных полей и зазоров в подшипниках. Максимальный размах колебаний достигает  $9,0 \text{ м/с}^2$ , минимальный – около  $2,0 \text{ м/с}^2$ .

При работе асинхронного электродвигателя в режиме пуска со схемой соединения обмоток статора «звезда» (период 2) во временной реализации виброускорения возникают

не стабильные, негармонические колебания с последовательным нарастанием (до  $6,0 \text{ м/с}^2$ ) и постепенным снижением размаха (до  $2,0 \text{ м/с}^2$ ). Преобладающей частотой является  $100 \text{ Гц}$ , периодически снижающаяся до  $50 \text{ Гц}$  при взаимодействии с негармоническими колебаниями подшипниковых частот. Как отмечалось уже ранее, в отличие от традиционных подходов, использующих быстрое преобразование Фурье [17, 18], в настоящей работе анализ выполняется непосредственно по временным реализациям без частотного преобразования.

Начало периода 3 начинается с переключения схемы соединения обмоток статора приводного асинхронного электродвигателя на «треугольник», что сопровождается динамическим ударом с размахом  $10 \text{ м/с}^2$ . После перехода на схему соединения обмоток статора «треугольник» происходит снижение размаха колебаний до  $3,0...4,0 \text{ м/с}^2$ . Нестабильность колебаний, аналогична периоду 2, что подтверждает вывод о повреждениях подшипников.

Возникновение описанных симптомов характерно для возможных нарушений электромагнитных взаимодействий внутри асинхронного электродвигателя вследствие отклонений в кинематике и форме тел качения подшипника типа 6314. В результате проведенного анализа было принято решение о замене подшипников, что должно привести к снижению воздействия дополнительно возникающих сил.

Визуальный осмотр подшипника 6314 после разбора асинхронного электродвигателя позволил выявить причину возникновения повышенных значений виброускорения, которая заключается в наличии окисленной смазки, её коксовании при длительной остановке и нарушением режима смазывания, что выразилось в отсутствии отвода продуктов износа из зоны трения и последующего абразивного износа. Дополнительным фактором, влияющим на выход из строя подшипника, является отсутствие отверстий для выхода отработанной смазки, которые не были предусмотрены в конструкции подшипниковых узлов электродвигателя.

На рисунке 4 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска винтового компрессора типа SAB-163 после замены подшипников. Временные значения периодов остались без изменений.

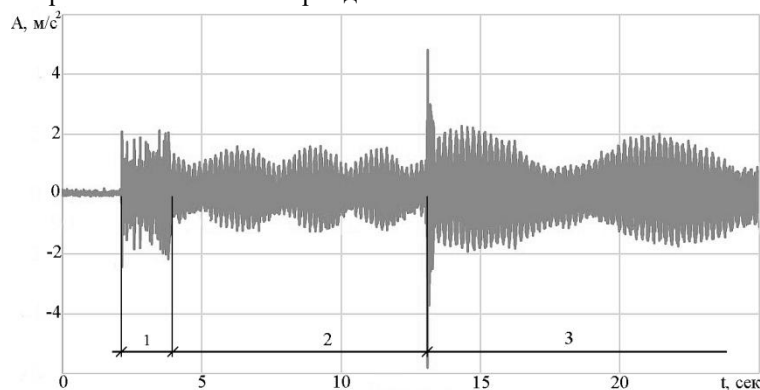


Рис. 4. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников

Fig. 4. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings

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

На рисунках 5–7 приведены масштабированные временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников по трем периодам соответственно.

Отметим произошедшие изменения. Максимальный размах на периоде 1 (рис. 5) снизился до  $4,2 \text{ м/с}^2$ , на периоде 2 (рис.6) – до  $1,0...3,0 \text{ м/с}^2$ , на периоде 3 (рис. 7) - до  $2,0...4,0 \text{ м/с}^2$ . Неизменным остался размах колебаний в момент переключения схемы обмоток статора асинхронного электродвигателя в режиме пуска со схемы «звезда» на «треугольник» -  $10 \text{ м/с}^2$ , что обусловлено электромагнитным взаимодействием магнитных полей статора и ротора. Время выхода в номинальный режим работы составило  $2,7 \text{ с}$ , что практически соответствует расчётному. На периодах 2 и 3 четко проявились гармонические колебания, связанные с оборотной частотой вращения ротора и возникновение биений, вызванных наличием двух источников гармонических колебаний с разностью частот  $5 \text{ Гц}$ . Стабильность колебаний на периодах 2 и 3, снижение уровня размаха виброускорения свидетельствует об удовлетворительном состоянии подшипников и правильности принятого решения.

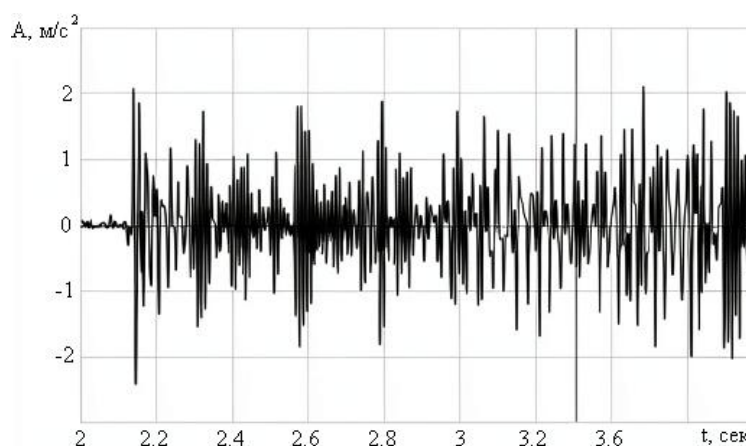


Рис. 5. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников на участке выхода на критическое скольжение (период 1)

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

Fig. 5. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings at the critical slip exit site (period 1)

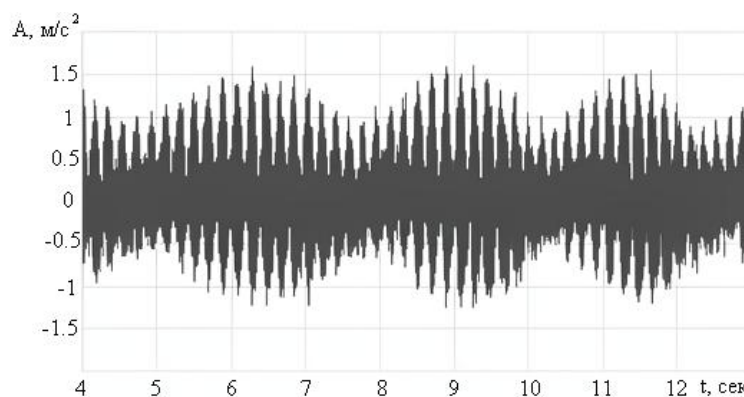


Рис. 6. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников при работе по схеме «звезда» (период 2)

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

Fig. 6. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings during operation according to the "star" scheme (period 2)

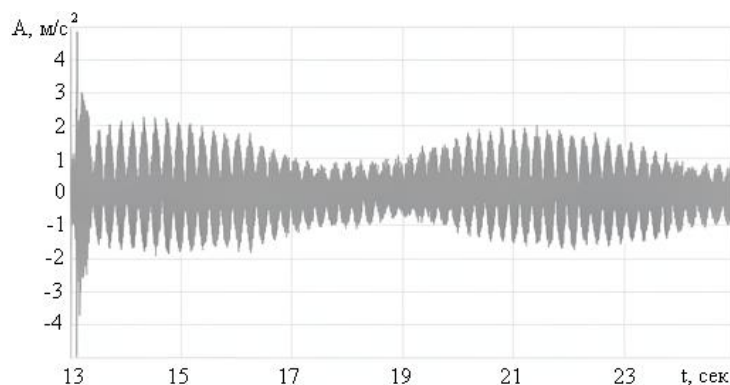


Рис. 7. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников при работе по схеме «треугольник» (период 3)

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

Fig. 7. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings when working according to the "triangle" scheme (period 3)

На втором этапе исследований проведена относительная оценка состояния двух полностью идентичных по конструкции, но различных по техническому состоянию, дымососов ДН-21ГМ - ДН-3 и ДН4 приводом которых являются асинхронные электродвигатели мощность 90 кВт с частотами вращения роторов равными 590 об/мин по результатам временной реализации виброускорения при пуске. Конструкция дымососа включает приводной двигатель, соединительную упруго-втулочную муфту, вал дымососа на подшипниках качения, установленных в отдельном корпусе с консольным расположением

рабочего колеса. Дымососы установлены на жёстком фундаменте. Фактическое состояние дымососов определено предварительно по результатам измерения параметров вибрации.

Измерения среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц проводились при работе оборудования в длительном режиме. Точки контроля: точка 1 – свободный подшипник двигателя; точка 2 – подшипник двигателя со стороны муфты; точка 3 – подшипник промежуточного вала со стороны муфты; точка 4 – подшипник промежуточного вала со стороны рабочего колеса.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики выполнено сопоставление полученных результатов вибродиагностики с помощью смартфона и с помощью анализатора спектра вибраций 795М.

Вибрационное обследование выполнено в полном соответствии с действующей нормативной базой: ГОСТ 24346-80. «Вибрация. Термины и определения»; ГОСТ ИСО 5348-2002. «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров»; ГОСТ ИСО 20816-3-2023. «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях».

Оценка технического состояния электромеханической системы проводилась путём измерения уровня вибрации и сравнения с нормативными значениями, которые регламентированы ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021 «Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство» и ГОСТ I EC 60034-14-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций». Значения виброскорости, определяющие границы состояний составляют: до 4,5 мм/с – функционирование без ограничения сроков; 4,5...7,1 мм/с – функционирование в ограниченном периоде времени; свыше 7,1 мм/с – возможны повреждения машины. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Значения параметров вибрации для контрольных точек дымососов

*Vibration parameter values for smoke extraction control points*

| Точка измерения | Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с), для направлений измерения, частотный диапазон 2...200 Гц |                |             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
|                 | Вертикальное                                                                                               | Горизонтальное | Осевое      |
| Дымосос ДН-3    |                                                                                                            |                |             |
| 1               | 3,0                                                                                                        | 7,0            | -           |
| 2               | 2,9                                                                                                        | 6,4            | 3,3         |
| 3               | 3,4                                                                                                        | <b>10,5</b>    | <b>9,0</b>  |
| 4               | <b>11,7</b>                                                                                                | <b>8,3</b>     | <b>16,1</b> |
| Дымосос ДН-4    |                                                                                                            |                |             |
| 1               | 1,5                                                                                                        | 1,8            | -           |
| 2               | 1,3                                                                                                        | 1,7            | 1,2         |
| 3               | 1,6                                                                                                        | 1,7            | 1,5         |
| 4               | 1,6                                                                                                        | 1,5            | 1,4         |

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

На основании полученных данных установлен диагноз относительно категорий технического состояния. Дымосос ДН-3 - возможны повреждения машины, эксплуатация не рекомендуется. Дымосос ДН-4 - функционирование без ограничения сроков. Во всех случаях классификация «удовлетворительно» / «неудовлетворительно», полученная по предлагаемой методике, совпала с выводами инструментального контроля.

Диагноз, поставленный относительно технического состояния электромеханической системы дымососов в целом, распространяется на их компоненты, в частности двигатели. Состояние приводного двигателя дымососа ДН-3 – «неудовлетворительное», двигателя привода дымососа ДН-4 – «удовлетворительное».

На рис. 8 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения пуска двух аналогичных дымососов. Одинаковые массогабаритные и силовые параметры, установка дымососов на жестких фундаментах, аналогичные системы управления дают повод использовать метод относительного сравнения при оценке технического состояния. Пример сравнительной оценки и формирования диагностических симптомов показан относительно вертикального направления (ось Z).

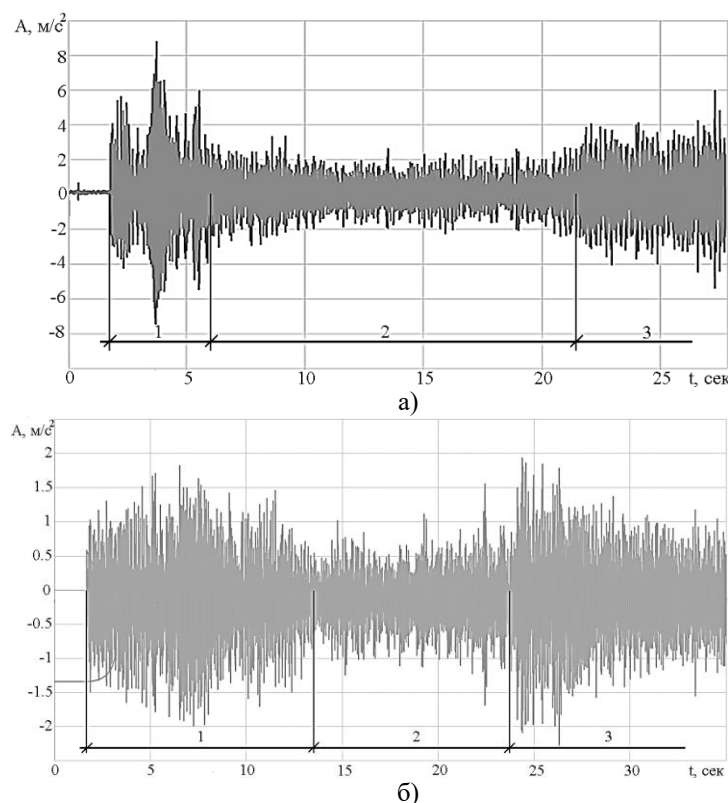


Рис. 8. Временные реализации виброускорения при запуске двигателей дымососов; а) ДН-3; б) ДН-4

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

Выбранный для анализа участок выхода на стабильный режим работы был разбит на три периода, одинаковых по функциональному назначению, но различных по индивидуальной реализации.

*Период первый* – зона нестабильных взаимодействий – фактически это время выхода частоты вращения двигателя на  $\omega_k$  ( $S_{ke}$ ). Практически невозможно выделить постепенное увеличение частоты вращения. Ротор разгоняется практически мгновенно. При этом взаимодействие электромагнитных полей с ротором и подшипниками преобразуется в различные конкретные реализации, отличающиеся временем, амплитудой и наличием динамических процессов (ударов). Запуск дымососа ДН-3 сопровождается тремя динамическими взаимодействиями, причины которых могут быть связаны с наличием зазоров и повышенной податливости в соединении статор-корпус.

*Период второй* – выход на номинальную частоту вращения, отслеживается по изменению периода оборотной частоты. В данном случае характеризуется снижением значений размаха вибрационных колебаний. Размах виброускорения на данном периоде ниже у дымососа ДН-4, что подтверждает ранее поставленный диагноз об «удовлетворительном» состоянии. Однако, отсутствуют четко выраженные гармонические колебания – проявление повреждений подшипниковых узлов.

*Период третий* – возникновение крутильных колебаний в зоне рабочих нагрузок при снижении инерционных сил при разгоне. Проявление торсионного эффекта определяется наличием зазоров в соединительной муфте, состоянием упругих элементов, соосностью валов двигателя и дымососа, степенью затяжки резьбовых соединений, податливостью основания и др. Далее вибрационный процесс может стабилизироваться или нарастать (как будет показано далее).

Выделение указанных диагностических симптомов позволяет обслуживающему персоналу, без загрузки данных в компьютер, непосредственно с экрана смартфона принять решение о продолжении эксплуатации, вызова диагностов для проведения приборного вибрационного контроля и постановке точного диагноза или необходимости срочной остановки механизма. Введение промежуточного уровня контроля расширяет количество объектов, по которым оценивается техническое состояние, повышается стабильность работы оборудования за счет своевременного проведения технического обслуживания и ремонта.

Третий этап исследований позволил установить некоторые особенности запуска приводного электродвигателя с частотой вращения 1499 об/мин и мощностью 75 кВт



дымососа ДН-15. Еще одним диагностическим параметром состояния электромеханических систем может служить время выхода системы в номинальный режим. В данном случае соотношение моментов инерции ротора двигателя и рабочего колеса дымососа и система управления реализуют длительный запуск. Как правило значения электромагнитного момента приводного электродвигателя и момент сопротивления приводимого механизма являются неизвестными, однако известно, что длительность времени пуска увеличивается при более высоких значениях момента сопротивления механизма и электромагнитного момента электродвигателя. На рис. 9 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-15.

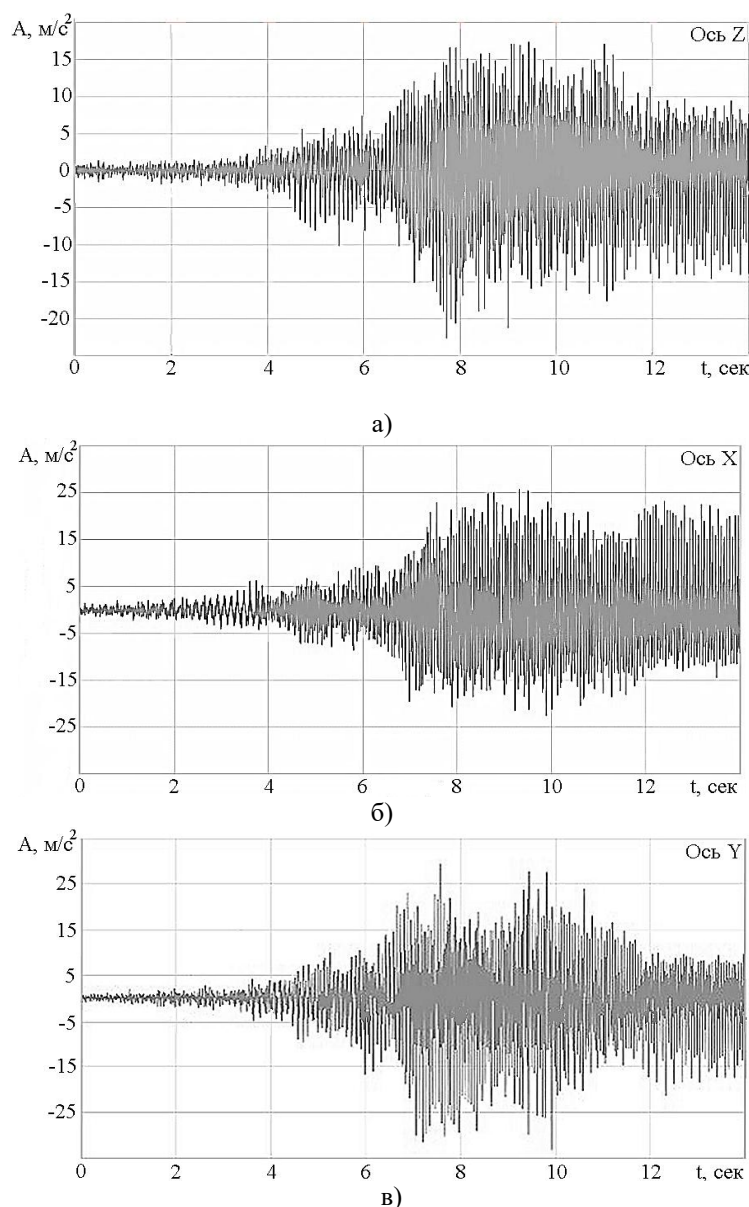


Рис. 9. Временные реализации виброускорения по трем осям в режиме пуска электродвигателя привода дымососа ДН-15: а) вертикальной – ось Z; б) горизонтальной (поперечной) – ось X; в) осевой – ось Y

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

Из временных реализаций виброускорения в режиме пуска электродвигателя привода дымососа ДН-15, приведенных на рис. 9 длительность пуска составила 11 секунд, в момент выхода в номинальный режим дымососа характеризуется стабилизацией значений размаха виброускорения на достаточно высоком уровне, равном  $40 \text{ м/с}^2$ . Неудовлетворительное состояние подтверждается нестабильностью размаха виброускорения по осям измерений. В данном случае причиной возникновения таких значений размаха виброускорения является податливое основание и дисбаланс рабочего колеса.

Несмотря на общие временные закономерности пуска, каждое из направлений имеет индивидуальные особенности, проявляющиеся в амплитудном значении максимального размаха виброускорения и тенденции после выхода на номинальный режим. В данном случае повышенные значения в вертикальном и осевом направлениях объясняется установкой дымососа на виброопорах с различной жесткостью, что является основной причиной неудовлетворительного состояния и вывода дымососа из эксплуатации.

Различия в реализациях сигнала виброускорения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях позволяет сформулировать диагностические правила на основе анализа классической математической модели колебательного процесса:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F,$$

где  $m$  – масса;  $\ddot{x}$  – ускорение;  $\dot{x}$  – скорость;  $x$  – перемещение;  $h$  – коэффициент демпфирования;  $c$  – жёсткость;  $F$  – действующая сила.

Преобладание значений в продольном (горизонтальном) направлении – ось  $X$  указывает на ослабление резьбовых соединений, поскольку происходит снижение жесткости  $c$  или увеличение силы  $F$  в этом направлении. Практически аналогичные значения в вертикальном направлении – ось  $Z$ , являются следствием податливого основания. Значения в осевом направлении – ось  $Y$  увеличиваются при отклонениях в соосности валов двигателя и дымососа. Результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-3, показывают, что происходит увеличение значения размаха виброускорения после выхода в номинальный режим, в осевом и вертикальном направлениях, что позволяет сделать обоснованный вывод о неудовлетворительном состоянии дымососа ДН-3.

Из результатов фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-4, видно, что величина размаха виброускорения составила не более  $4 \text{ м/с}^2$  и стабилизация показателей после выхода в рабочий указывает на удовлетворительное состояние дымососа ДН-4.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 8, позволяет проследить изменения между электромагнитным моментом электродвигателя и моментом сопротивления. Нестабильность электромагнитного момента электродвигателя определяется механической характеристикой и зависит от частоты вращения, которую определить не удалось из-за наличия дополнительных возмущений, частоты сети, подшипников качения, состояния исполнительного механизма и др. Различия между вибрацией электродвигателя, работающего самостоятельно и после присоединения исполнительного механизма позволяют оценить уровень дополнительных сил, действующих на элементы

Одним из признаков появления отклонений в работе механической системы асинхронного двигателя становится режим биений, приведенный на рисунке 10.

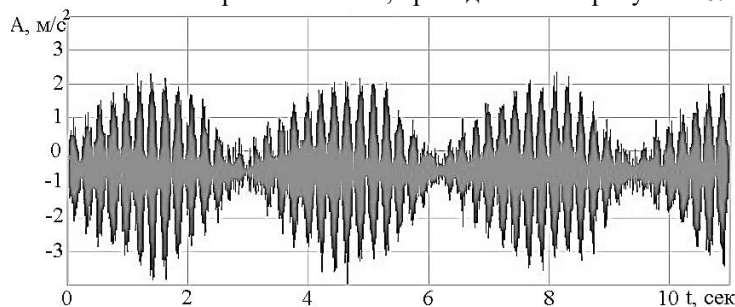


Рис. 10. Временные реализации виброускорения при возникновении биений

Fig. 10. Temporary realization of vibration acceleration in case of beats

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

Данный режим зафиксирован на асинхронном двигателе мощностью 300 кВт и частотой вращения 2975 об/мин после 28 лет эксплуатации. Проявляется повреждение в виде колебаний с частотой 5 Гц (период 0,2 с) и биений с периодичностью 3 с. Это позволяет предположить наличие ослабления посадочных мест подшипников и нарушения равномерности воздушного зазора между статором и ротором.

Таким образом, начато формирование словаря дефектов для анализа временного сигнала виброускорения при пуске асинхронного электродвигателя. Использование данного словаря предполагается по двум направлениям: применение выделенных характерных признаков повреждений для фиксации их наличия с экрана смартфона; последующая обработка реализаций в цифровой модели развития повреждений на основе диагностического симптома, объединяющего действие электромагнитных полей и состояния механической системы.

В первом случае практическое внедрение реализовано за счет обучения эксплуатационного персонала по краткому курсу использования встроенного в смартфон



трех координатного акселерометра и распознавания проявления диагностических признаков повреждения во временном сигнале виброускорения.

Второй случай является одним из направлений дальнейших исследований на основе математической модели с коррекцией по фактическим результатам пуска электродвигателя.

Предложенный подход расширяет количество объектов с контролируемым техническим состоянием при минимальных затратах средств и ресурсов и уже доказал свою эффективность в практике эксплуатации дымососов и вентиляторов предприятий.

#### **Выводы (Conclusions)**

1. Экспериментально подтверждено, что режим пуска электромеханической системы является высокоинформативным для диагностирования её фактического технического состояния. Анализ временных реализаций виброускорения в режиме пуска позволяет выявить скрытые дефекты, которые в установившемся режиме могут маскироваться или проявляться с малой амплитудой. Установлены характерные диагностические признаки для дефектов механической (ослабление креплений, дисбаланс, износ подшипников) и электрической (нарушение электромагнитной симметрии) частей системы, проявляющиеся в изменении амплитудно-временных характеристик, появлении биений и ударных импульсов в специфических пространственных направлениях.

2. Разработан и апробирован методический подход для экспресс-оценки технического состояния электромеханического оборудования на основе индикаторных измерений встроенным акселерометром смартфона. Доказана возможность использования мобильного устройства в качестве доступного средства первичной диагностики для классификации состояния на уровне «удовлетворительно» и «неудовлетворительно». Научная новизна подхода заключается в обосновании минимально необходимой конфигурации контроля (три взаимно перпендикулярных направления) и разработке метода относительной и взаимной оценки сигналов, позволяющего использовать индикаторные показания встроенного акселерометра для первичной классификации технического состояния при условии предварительной калибровки по эталонному оборудованию.

3. Сформирован и верифицирован на реальных промышленных объектах набор диагностических признаков для интерпретации вибросигналов в режиме пуска, что составляет основу для создания экспертного справочника симптомов. Установлены корреляции между преобладанием виброускорения в определенном направлении (осевом, поперечном, вертикальном) и типом потенциального дефекта (несоосность, дисбаланс, податливость фундамента). Полученные результаты создают основу для формализации знаний и последующей разработки алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации неисправностей.

#### **Литература**

1. Баннов Д. М. Метод диагностики обрывов стержней ротора в асинхронных электродвигателях на основе регрессионного анализа модуля результирующего вектора тока статора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. № 333(5). С.196-208.
2. Abdelhak G, Sid Ahmed B, Djekidel R. Fault diagnosis of induction motors rotor using current signature with different signal processing techniques.// Diagnostyka. 2022. Vol. 23(2). pp. 1 - 9.
3. Sudip Halder, Sunil Bhat, Daria Zychma, Pawel Sowa Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review.// Energies. 2022. Vol. 15. pp. 8569
4. Zafer Doğan Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis // Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. 2025. Vol.12(4). pp.357-363
5. Казыханов Р. Р. Повышение надежности методом диагностики подшипникового узла электрических машин по спектру потребляемого тока // Новая наука: от идеи к результату. 2025. № 5. С. 186-198.
6. K. Yatsugi, S. E. M. P. Kone and Y. Mizuno, "Faulty Class Diagnosis of Three Phase Induction Motor Bearing Using Stator Current Spectral Features and Machine Learning Algorithms," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan. 2022. pp. 112-117.
7. Сафиуллин Р. А., Янгиров И. Ф. Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021.

Т. 17, № 2. С. 41-54.

8. M. Marczak, K. Górny and W. Pietrowski, "Wavelet Based Vibration Analysis for Detection of Inter-Turn Faults in Induction Motors Using Pearson Correlation," 2025 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan. Poland. 2025. pp. 22-27.

9. Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций / А. В. Лукьянов, Д. П. Алейников, А. П. Хоменко, В. А. Налетов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4(84). С. 103-116.

10. Цвяк В. А., Жманков В. М., Штельмашенко О. С Вибрационная диагностика подшипников и центробежного насоса нефтегазового оборудования// Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XVII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 17 июня 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 33-35.

11. E. Irgat, E. Çinar and A. Ünsal, "The detection of bearing faults for induction motors by using vibration signals and machine learning," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas. TX. USA, 2021. pp. 447-453

12. N. Rajapaksha, S. Jayasinghe, H. Enshaei and N. Jayarathne, "Acoustic Analysis Based Condition Monitoring of Induction Motors: A Review," 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Kigali. Rwanda. 2021. pp. 1-10.

13. E. M. Mahani, A. Mirabadi, A. Rezazadeh and A. H. Karamali, "Acoustic Fault Diagnosis of Rolling Bearings in Induction Motors Using Time-Frequency Image Analysis," 2024 4th International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), Tehran, Iran, Islamic Republic. 2024. pp. 1-6

14. N. Yordanov, M. Zhilevski and M. Mikhov, "Fault Detection in Electric Motors using Acoustic Signals and Image Classification," 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova. Romania. 2024. pp. 1-6

15. E. Resendiz-Ochoa, J. M. Enriquez-Ugalde, J. J. Saucedo-Dorantes and L. A. Morales-Hernandez, "Broken Rotor Bar Failures Diagnosis with Supervised Learning and Infrared Thermography," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Dallas. TX. USA. 2021. pp. 499-504.

16. S. Kilickaya, C. Celebioglu, L. Eren and M. Askar, "Thermal Image-Based Fault Diagnosis in Induction Machines via Self-Organized Operational Neural Networks," 2025 IEEE Symposium on Computational Intelligence on Engineering/Cyber Physical Systems (CIES), Trondheim, Norway. 2025. pp. 1-7.

17. Ali A., El-Serafi K., A. K. Mostafa S., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. Journal of Sensor Technology. 2016. Vol. 6 (3).pp. 56-74.

18. Hafizh H., Ali M.N.N., Abdul Majeed A.P.P. Vibration Condition Monitoring of Rotating Machinery with IoT and Smartphone Sensors. In: Tan, A., et al. Advances in Intelligent Manufacturing and Robotics. ICIMR 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. 2024. Vol 845. pp. 421-431.

#### Авторы публикации

**Деркачёв Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник – руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение» Донецкого национального технического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>. Email: [sergey\\_derkachev@mail.ru](mailto:sergey_derkachev@mail.ru).

**Сидоров Владимир Анатольевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии» Донецкого национального технического университета ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6794-7838>. Email [sidorov\\_va58@mail.ru](mailto:sidorov_va58@mail.ru).

#### References

1. Bannov D. M. Metod diagnostiki obryvov sterzhnej rotora v asinxronny`x e`lektrodvigatelyax na osnove regressionnogo analiza modulya rezul'tiruyushhego vektora toka statora // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2022. № 333(5). S.196-208 (In Russ).

2. Abdelhak G, Sid Ahmed B, Djekidel R. Fault diagnosis of induction motors rotor using current signature with different signal processing techniques.// *Diagnostyka*. 2022. Vol. 23(2). pp. 1 - 9.
3. Sudip Halder, Sunil Bhat, Daria Zychma, Pawel Sowa Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review.// *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 8569
4. Zafer Doğan Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis // *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2025. Vol.12(4). pp.357-363
5. Kazy`xanov R. R. Povy`shenie nadezhnosti metodom diagnostiki podshipnikovogo uzla e`lektricheskix mashin po spektru potrebyaemogo toka // *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*. 2025. № 5. S. 186-198 (In Russ).
6. K. Yatsugi, S. E. M. P. Kone and Y. Mizuno, "Faulty Class Diagnosis of Three Phase Induction Motor Bearing Using Stator Current Spectral Features and Machine Learning Algorithms," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan. 2022. pp. 112-117.
7. Safiullin R. A., Yangirov I. F. Issledovanie vibracii asinxronnogo e`lektrovdigatelya // *E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы i sistemy`*. 2021. T. 17, № 2. S. 41-54 (In Russ).
8. M. Marczak, K. Górny and W. Pietrowski, "Wavelet Based Vibration Analysis for Detection of Inter-Turn Faults in Induction Motors Using Pearson Correlation," 2025 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan. Poland. 2025. pp. 22-27.
9. Vibrodiagnostika nasosnogo oborudovaniya teplovy`x e`lektrostancij / A. V. Luk`yanov, D. P. Alejnikov, A. P. Xomenko, V. A. Naletov // *Sovremennyy`e tekhnologii. Sistemny`j analiz. Modelirovanie*. 2024. № 4(84). S. 103-116 (In Russ).
10. Czvyak V. A., Zhmankov V. M., Shtel`mashenko O. S Vibracionnaya diagnostika podshipnikov i centrobezhnogo nasosa neftegazovogo oborudovaniya// *Rezul'taty` sovremennyy`x nauchny`x issledovaniy i razrabotok : sbornik statej XVII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Penza, 17 iyunya 2022 goda. – Penza: Nauka i Prosveshhenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2022. S. 33-35 (In Russ).
11. E. Irgat, E. Çınar and A. Ünsal, "The detection of bearing faults for induction motors by using vibration signals and machine learning," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas. TX. USA, 2021. pp. 447-453
12. N. Rajapaksha, S. Jayasinghe, H. Enshaei and N. Jayarathne, "Acoustic Analysis Based Condition Monitoring of Induction Motors: A Review," 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Kigali. Rwanda. 2021. pp. 1-10.
13. E. M. Mahani, A. Mirabadi, A. Rezazadeh and A. H. Karamali, "Acoustic Fault Diagnosis of Rolling Bearings in Induction Motors Using Time-Frequency Image Analysis," 2024 4th International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), Tehran, Iran, Islamic Republic. 2024. pp. 1-6
14. N. Yordanov, M. Zhilevski and M. Mikhov, "Fault Detection in Electric Motors using Acoustic Signals and Image Classification," 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova. Romania. 2024. pp. 1-6
15. E. Resendiz-Ochoa, J. M. Enriquez-Ugalde, J. J. Saucedo-Dorantes and L. A. Morales-Hernandez, "Broken Rotor Bar Failures Diagnosis with Supervised Learning and Infrared Thermography," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Dallas. TX. USA. 2021. pp. 499-504.
16. S. Kilickaya, C. Celebioglu, L. Eren and M. Askar, "Thermal Image-Based Fault Diagnosis in Induction Machines via Self-Organized Operational Neural Networks," 2025 IEEE Symposium on Computational Intelligence on Engineering/Cyber Physical Systems (CIES), Trondheim, Norway. 2025. pp. 1-7.
17. Ali A., El-Serafi K., A. K. Mostafa S., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. *Journal of Sensor Technology*. 2016. Vol. 6 (3).pp. 56-74.
18. Hafizh H., Ali M.N.N., Abdul Majeed A.P.P. Vibration Condition Monitoring of Rotating Machinery with IoT and Smartphone Sensors. In: Tan, A., et al. *Advances in Intelligent Manufacturing and Robotics. ICIMR 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. Vol 845. pp. 421-431.

**Authors of the publication**

**Sergey V. Derkachev** - Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>. *Email:* [sergey\\_derkachev@mail.ru](mailto:sergey_derkachev@mail.ru).

**Vladimir A. Sidorov** - Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0001-6794-7838>. *Email:* [sidorov\\_va58@mail.ru](mailto:sidorov_va58@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **19.01.2026 г.**

**Отредактировано** **23.04.2026 г.**

**Принято** **26.05.2026 г.**

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО СПЕКТРУ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Овсянников <sup>1</sup>А.Г., Жарич <sup>2</sup>Д.С., Швец <sup>1</sup>Н.А.

<sup>1</sup>Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия

shvepsnik@yandex.ru

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Непланные отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) обычно происходят из-за перекрытия линейной изоляции вследствие загрязнения и увлажнения. Предвестниками перекрытия могут служить мощные частичные разряды на поверхности изоляции (ПЧР). Их можно обнаружить различными, в том числе дистанционными методами: органолептическими (обнаружение разрядов визуальным осмотром и по звуку), акустическими (регистраторами ультразвуковых сигналов), электромагнитными (регистрация излучений в СВЧ и УВЧ диапазонах). Нарастает популярность внедрения оптических методов профилактического контроля оборудования, основанных на двух принципиально разных физических принципах. Тепловизионный контроль излучений оборудования в инфракрасной (ИК) области спектра выявляет локальные перегревы конструктивных элементов оборудования и наиболее эффективен для контроля дефектов токоведущих частей и контактных соединений, систем охлаждения и др. УФ-контроль (УФК) основан на обнаружении электрических разрядных процессов и наиболее эффективен в обнаружении различного рода дефектов арматуры и внешних изоляционных конструкций высоковольтного оборудования. Для реализации УФК перспективными считаются солнечно-слепые УФ-дефектоскопы. Однако применительно к оценке загрязнения внешней изоляции использование УФ-контроля пока ограничено из-за сложной интерпретации результатов контроля и недостаточного учета влияний внешних факторов и настроек аппаратуры. **ЦЕЛЬ.** Провести исследования изменений спектра излучения ПЧР с изменением проводимости слоя загрязнения при неизменном значении испытательного напряжения. По результатам исследований сформулировать принципы дистанционной качественной оценки степени загрязнения внешней изоляции линий электропередачи и подстанционного оборудования на основе количественной зависимости. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленных задач проводились высоковольтные испытания изоляторов с различной степенью с регистрацией ПЧР УФ-дефектоскопом «Филин 6» со специальным спектродиспергирующим фильтром на входном объективе. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложены конструкции спектродиспергирующих фильтров для линзового и зеркально-линзового объективов. Определены спектральные чувствительности системы регистрации при совместной работе спектродиспергирующего светофильтра и мультищелочного фотокатода электронно-оптического преобразователя. Предложены возможные изменения окон пропускания для случаев со специфическими загрязняющими веществами. После обработки картин излучения разрядов на полимерном опорном изоляторе получена эмпирическая зависимость между изменениями в спектре излучения ПЧР и проводимостью слоя загрязнения поверхности. Разработанная методика позволяет дистанционно не инвазивно проводить качественную оценку степени загрязнения высоковольтной внешней изоляции.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи; загрязнение и увлажнение изоляции; поверхностные частичные разряды; спектры излучения; спектродиспергирующий светофильтр, влияние настроек аппаратуры и внешних факторов.

**Для цитирования:** Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Оценка степени загрязнения изоляции по спектру излучения поверхностных частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 128-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-128-140.

## ASSESSMENT OF THE DEGREE OF CONTAMINATION OF INSULATION BY THE RADIATION SPECTRUM OF SURFACE PARTIAL DISCHARGES

Ovsyannikov A.G.<sup>1</sup>, Zharich D.S.<sup>2</sup>, Shvets N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> LLC "Sibenergodiagnostika"

shvepsnik@yandex.ru

**Abstract: RELEVANCE.** Unplanned overhead power line outages are typically associated with flashover of line insulation due to contamination and moisture. Powerful partial discharges on the insulation surface (SPD) can serve as a precursor to flashover. They can be detected by various remote methods: organoleptic (detection of discharges by visual and sound inspections), acoustic (ultrasonic signal recorders), electromagnetic (registration of emissions in the microwave and UHF ranges). The popularity of the introduction of optical methods of preventive control of equipment based on two fundamentally different physical principles is raising. Thermal imaging inspection of equipment radiation in the infrared (IR) region of the spectrum reveals local overheating of structural elements of equipment and is most effective for detecting defects in current-carrying parts and contact connections, cooling systems, etc. UV-inspection (UVI) is based on the detection of electrical discharge processes and it is most effective in detecting various kinds of defects in fittings and external insulating structures of high-voltage equipment. Solar-blind UV cameras are considered promising for the realization of UVI. However, the use of UV inspection for the assessment of external insulation contamination is still limited due to complex interpretation of inspection results and insufficient consideration of the influence of external factors and device settings. **PURPOSE.** To investigate the changes in the emission spectrum of the SPD with the change in the conductivity of the contamination layer at a constant value of the test voltage. Based on the research results, formulate principles for remote qualitative assessment of the contamination degree of external insulation of power lines and substation equipment based on a quantitative relationship. **METHODS.** High-voltage tests of insulators with different degrees of contamination in a fog chamber with registration of SPD by UV camera "Filin 6" with a special spectro-dispersing filter on the input lens were carried out to solve the set tasks. **RESULTS.** Designs of spectro-dispersing filters for lenticular and mirror-lens lenses are proposed. The spectral sensitivities of registration at joint operation of a spectro-dispersing light filter and a multi-alkaline photocathode of an electron-optical converter were determined. Possible changes in transmittance windows for specific pollutants are suggested. The empirical dependence between the changes in the SPD emission spectrum and the conductivity of the surface contamination layer was obtained after processing the discharge emission patterns on the polymer post insulator. The developed methodology enables remote non-invasive qualitative assessment of contamination levels on high-voltage external insulation.

**Keywords:** overhead transmission lines; contamination and moisture on the insulation; emission spectrum; surface partial discharges; spectro-dispersing light filter; influence of equipment settings and external factors.

**For citation:** Ovsyannikov A.G., Zharich D.S., Shvets N.A. Assessment of the degree of contamination of insulation by the radiation spectrum of surface partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 128-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-128-140.

### **Введение (Introduction)**

Одной из причин внеплановых отключений ВЛ в нормальном режиме является перекрытие внешней изоляции. Слой загрязнения, накапливающийся со временем на поверхности изолятора, обычно содержит солевые компоненты и нерастворимые материалы. Слой загрязнения становится токопроводящим при увлажнении в виде росы, тумана или осадков. Перекрытие изоляции под действием рабочего напряжения воздушных линий или внешней изоляции оборудования подстанций на воздушных распределительных устройствах происходит при максимальной проводимости слоя загрязнения, которая, в свою очередь, возникает при насыщении влагой всего объема слоя загрязнения.

Важным предвестником перекрытия являются поверхностные частичные разряды (ПЧР), возникающие и развивающиеся на поверхности изоляторов по увлажненному слою

загрязнения. Их обнаружение позволяет прогнозировать риск аварии и планировать профилактическую очистку. Современная диагностика активно развивается в сторону дистанционных, неинвазивных методов, которые не требуют отключения оборудования. Среди них выделяются оптические методы, такие как инфракрасная термография и ультрафиолетовый контроль (УФК).

Цель исследования заключается в установлении корреляционной связи между спектром излучения ПЧР и проводимостью слоя загрязнения. Установление этой связи позволит создать основу для дистанционной качественной оценки уровня загрязнения изоляции по данным УФК, что повысит точность оценки состояния высоковольтной внешней изоляции без вывода оборудования из работы.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Описанные выше механизмы перекрытия в результате загрязнения и увлажнения поверхности высоковольтной внешней изоляции изучались авторами [1]. Авторы [2] предложили математическую модель физических процессов, происходящих на поверхности загрязненной и увлажненной изоляции при воздействии рабочего напряжения. Результаты исследований по этой теме периодически обобщались рабочими группами CIGRE и IEEE по загрязнению изоляции, что отражено в [3] и [4] соответственно. Некоторые рекомендации даны в стандартах МЭК<sup>1</sup>. Автор [5] предлагает подходы к выбору изоляции на основе натурных исследований в зонах почвенных, морских и промышленных загрязнений, с целью повышения надежности энергоснабжения.

Исследования продолжаются и сегодня. Они направлены на выяснение причины отключений ВЛ в районах со слабым и умеренным загрязнением внешней изоляции на основе моделирования [6], а также сравнения полученного опыта разными странами [7]. Важным направлением исследований в этой области является углубленное компьютерное моделирование процесса перекрытия на основе динамических расчетов напряженности электрического поля и теории случайных блужданий с учетом геометрии поверхности изолятора и случайного расположения взвешенных частиц воды [8]. Основным требованием при выборе изоляции в загрязненных районах стала удельная длина пути утечки (УДПУ) (мм/кВ<sub>фазн.</sub>) [9].

Эксплуатация электроустановок в районах с загрязненной атмосферой предполагает контроль состояния внешней изоляции для оценки вероятности ее перекрытия под рабочим напряжением. В соответствии с требованиями СТО 56947007- 29.240.133-2012 (Изоляция электроустановок в районах с загрязненной атмосферой. Эксплуатация и техническое обслуживание) состояние изоляции оценивают по удельной поверхностной проводимости изоляторов  $\chi_{\text{пов}}$  и удельной объемной проводимости атмосферных осадков  $\chi_{\text{об}}$ . Значения  $\chi_{\text{пов}}$  определяются при искусственном или естественном увлажнении демонтированных изоляторов или изоляторов на месте установки при снятом напряжении. Затем на основании известных зависимостей напряжения перекрытия от проводимости слоя загрязнения прогнозируется напряжение перекрытия изоляторов [9].

Принимая во внимание большую трудоемкость перечисленных методов контроля, разработки дистанционных оценок степени загрязнения изоляции являются актуальными. Одними из первых дистанционных методов профилактического контроля линейной изоляции стали акустический и электромагнитный методы обнаружения электрических разрядов, генерируемых дефектами [10]. Надежность и эффективность обнаружения дефектов резко возрастают при синхронизированном применении обоих методов с «привязкой» измеряемых сигналов к мгновенным значениям напряжения [11] и формированием амплитудно-фазовых диаграмм (АФД). Такая форма представления результатов контроля позволяет использовать накопленные образы дефектов, называемые «отпечатками пальцев», в виде АФД электрических сигналов частичных разрядов и, тем самым, облегчить интерпретацию результатов контроля [12]. Дальнейший поиск маркеров загрязнения внешней изоляции в указанных методах можно связать со сменой механизма формирования ПЧР от лавинно-стримерного к дуговому за счет преобладания термоионизации.

Среди дистанционных методов профилактики ведущие позиции занимают оптические методы, прежде всего, инфракрасная термография [13], в том числе, дополненная регистрацией электромагнитного излучения [14]. Развивается и метод ультрафиолетового контроля оборудования высокого напряжения, основанный на

---

<sup>1</sup> IEC Publications 815 (1986); IEC 60507 (1991). Guide for Selection of Insulators Under Polluted Conditions, Artificial Pollution Test on HV Insulators. IEC Standards, 1991.

регистрации разрядных процессов, генерируемых различными дефектами, в том числе и загрязнением изоляции [15]. В частности, частичные разряды на поверхности (ПЧР) изоляции при повышенной влажности воздуха, тумане, росе или осадках являются достаточно надежными индикаторами загрязнения и предвестниками перекрытия под нормальным рабочим напряжением.

Приблизительную оценку степени загрязнения можно провести по интенсивности и цвету поверхностных частичных разрядов на изоляторах при увлажнении слоя загрязнения. В уже упомянутом выше стандарте организации предложены критерии оценки степени опасности загрязнения изоляции по количеству ребер изолятора, охватываемых дуговыми разрядами и изменению цвета разрядов от сине-фиолетового до светло-желтого при напряжениях, близких к перекрытию изоляции. На чистой изоляции ПЧР имеют сине-фиолетовые оттенки, а на загрязненной изоляции даже самые начальные разряды проявляются в виде желто-оранжево-красных дуг [16]. Это хорошо видно при испытаниях изоляторов на трекинг-эрозионную стойкость в камерах соленого тумана (рис. 1).

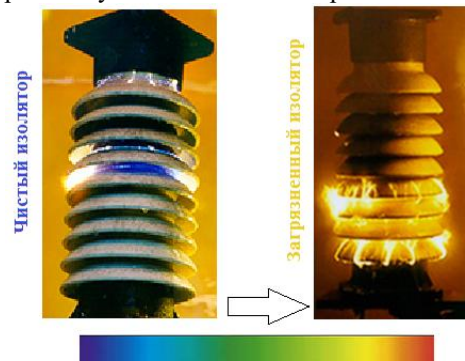


Рис. 1. Внешний вид разрядов на поверхности полимерного изолятора при проводимости слоя загрязнения 1 мкСм (слева) и более 8 мкСм (справа)

Fig. 1. External view of surface discharges on polymer insulator with a contamination layer conductivity of 1  $\mu\text{S}$  (left) and more than 8  $\mu\text{S}$  (right)

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

В сырую погоду можно наблюдать опасный уровень загрязнения изоляции по желто-красному цвету излучения ПЧР и на реальном оборудовании. В качестве примера на рисунке 2 показаны мощные дуги ПЧР преимущественно желто-красного цвета на внешней изоляции высоковольтного оборудования. Дело в том, что вблизи подстанции проходит довольно крупная автодорога. Ранней весной дорога была обработана наиболее эффективными противогололедными средствами. Унос этих веществ создал на внешних изоляционных поверхностях аппаратов слой загрязнений с критической удельной поверхностной проводимостью.



Рис. 2. Оборудование на открытом распределительном устройстве с опасным загрязнением внешней изоляции

Fig. 2. Equipment on an open switchgear with hazardous contamination of external insulation

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

Обстоятельная проверка связи уровня загрязнения с токами утечки, разрядной активностью, спектром излучения разрядов и температурой их каналов была проведена авторами [17]. Эксперименты проводились в камере искусственного климата при температуре 21–25 °С. Образцами служили опорные керамические изоляторы ZSW-10/4 высотой 210 мм. Слой загрязнения формировался диатомовой землей (NSDD) с эквивалентной плотностью соли (ESDD). Для имитации естественного загрязнения отношение ESDD / NSDD составляло 1:6. Для уровней загрязнения 2 и 3 ESDD составлял



0,1 и 0,2 мг/см<sup>2</sup>, а NSDD – 0,6 и 1,2 мг/см<sup>2</sup>. Загрязненные изоляторы увлажнялись до насыщения и испытывались напряжением около 8 кВ в течение 2–3 минут. Каждый образец повторно испытывался 3 раза. Температура разрядов определялась по интенсивностям линий излучения атомов Na (589 нм) в соли, а также Fe (~766 нм) и Ca (~336 нм) в нейтральном компоненте загрязнения.

В испытаниях наблюдались четыре типа разрядов при соответствующих диапазонах тока утечки. На изоляторах с уровнем загрязнения 1 ESDD  $\approx 0,01$  мг/см<sup>2</sup> наблюдались только коронные разряды. В первых двух уровнях загрязнения токи утечки были меньше 10 мА, а температура каналов разрядов была ниже 1400 К. В последних двух уровнях загрязнения токи утечки увеличились до 20 – 25 мА, и температура дуговых ПЧР увеличилась до 2000-2800 К. В итоге экспериментов было получено регрессионное уравнение, связывающее температуру с током утечки, четырьмя типами разрядной активности и с уровнем загрязнения изоляции. Основным признаком роста уровня загрязнения оказалось снижение интенсивности УФ-излучения при усилении интенсивности видимого света. Во время ПЧР PD1 на поверхности изоляторов появляется слабый фиолетовый коронный разряд. Разряды PD2, PD3 и PD4 являются дуговыми разрядами с желтым и оранжевым излучением, возникающим от компонентов NaCl и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Этот вывод подтверждает наши оценки изменения оттенков цвета излучения количественными оценками температуры. Заслуживает внимания и наблюдения повторяемости разрядов при неизменных условиях испытаний. Когда частота повторения PD3 и PD4 на месте составляет менее 0,04, то это оценивается как легкие загрязнения. Когда частота неисправностей PD3 и PD4 превышает 0,04, это идентифицируется как серьезная неисправность и требуется реализовать быструю очистку изолятора. По нашему мнению, зависимость типа разряда от времени отражает влияние процесса подсыхания и колебаний проводимости слоя загрязнения.

По обсуждаемой работе возникло несколько вопросов. Настораживает отсутствие в спектре излучения мощных линий УФ-спектра при сбросе возбуждения молекул азота. Измерения температуры по спектру излучения основаны на предположении о локальном термодинамическом равновесии в разрядах. Это допущение не вызывает сомнений для дуговых ПЧР типов PD3 и PD4 с температурой выше 2000 К. В коронных разрядах типа 1 с температурой до 1400 К есть только локальное термодинамическое равновесие энергий электронов. Температура молекул остается ниже 1000 К.

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

В исходном этапе исследований был использован первый отечественный электронно-оптический дефектоскоп «Филин-3» с серийным линзовым телеобъективом «Ю-21». Для него был разработан спектро-диспергирующий светофильтр (рис. 3), формировавший двойное изображение контролируемого изолятора и картины ПЧР в спектральных диапазонах  $\Delta\lambda_{\text{син}}$  («синий»)  $\approx 400\ldots 600$  нм и  $\Delta\lambda_{\text{ж-к}}$  («красный»)  $\approx 600\ldots 800$  нм. Электронно-оптический преобразователь усиливал эти картины и преобразовывал их в монохромные с яркостью, зависящей от спектра излучения ПЧР, который зависел от уровня загрязнения изоляции (рис. 4).



Рис. 3. Ход световых лучей на входе дефектоскопа

Fig. 3. The path of light rays at the entrance of the flaw detector

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

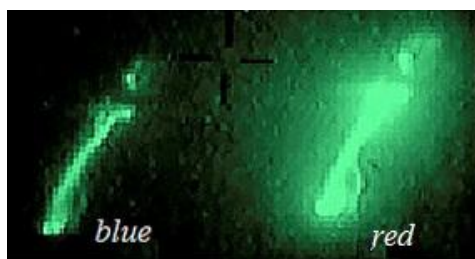


Рис. 4. Двойное изображение одиночной дужки на загрязненной и увлажненной поверхности изолятора ( $\chi \approx 15$  мкСм)

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

Для исследований зависимости спектра излучения ПЧР от удельной поверхностной проводимости на экран электронно-оптического преобразователя (рис. 5) в местах раздвоенного изображения ПЧР наклеивались два фотодиода ФД –256, которые с помощью электронного преобразовательного устройства обеспечивали электрические сигналы, пропорциональные излучению в обеих выбранных областях спектра. В результате электрические сигналы на выходе фотодиодов были пропорциональны излучению ПЧР в двух спектральных диапазонах. Экспериментальные результаты были получены в виде осциллограмм тока  $i$ , напряжения  $u$ , интенсивности синего  $J$  и красного  $J$  цвета.

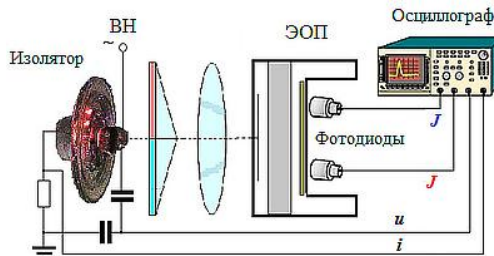


Рис. 5. Схема испытаний и измерений

Fig. 5. Scheme of the testing and measuring

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

Испытания проводились в камере тумана нормируемой плотности. В испытаниях использовались три партии по пять линейных изоляторов ПС-300К. В контрольной партии изоляторы оставались чистыми, в двух других партиях изоляторы были загрязнены цементом марки 400 по стандартной методике с плотностью загрязнения 1,5 и 7 мг/см<sup>2</sup>. Поверхность изоляторов смачивалась водой с удельной объемной проводимостью 160...180 мкСм/см до полного насыщения слоя загрязнения. Удельные поверхностные проводимости составили:  $\chi \leq 1$  мкСм для чистых изоляторов,  $\chi = 5...6$  мкСм для изоляторов с плотностью загрязнения 1,5 мг/см<sup>2</sup> и  $\chi = 15...16$  мкСм для изоляторов с плотностью загрязнения 7 мг/см<sup>2</sup>. Испытания проводились в камере тумана. На рисунке 6 в качестве примера приведены типичные осциллограммы регистрируемых сигналов.

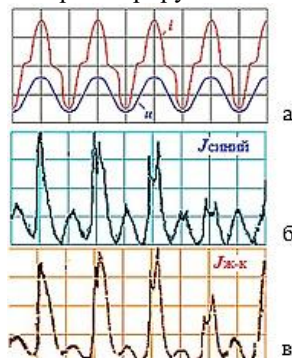


Рис. 6. Спектры излучения поверхностных разрядов при проводимости загрязненного слоя  $\chi = 15$  мкСм: а – ток утечки и напряжение на изоляторе (20 мА/дел. 60 кВ/дел.); б – интенсивность излучения ЧР в «синем» спектре (0,1 В/дел.); в – интенсивность свечения ЧР в красном спектре (1 В/дел.)

Fig. 6. Spectra of surface discharge irradiation at conductivity of contaminated layer  $\chi = 15$   $\mu$ S: а – leakage current and voltage applied to insulator (20 mA/div. 60 kV/div.); б – light intensity of surface PD in blue spectra (0,1 V/div.); в – light intensity of surface PD in red spectra (1 V/div.)

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

Обработка данных была направлена на выявление статистической связи между интенсивностью излучения ПЧР в двух участках спектра, амплитудой тока утечки и проводимостью слоя загрязнения поверхности. В качестве основной характеристики изменения спектра была выбран безразмерный коэффициент равный относительной доле красного цвета в сумме обеих интенсивностей излучения:

$$k_r = \frac{J_r}{J_{bl} + J_r} \quad (1)$$

Обработка данных показала очень низкое значение коэффициента корреляции  $R$  между  $k_r$  и током утечки:  $R(k_r \leftrightarrow I_{ут}) = 0,43$ . Напротив, коэффициент корреляции со степенью загрязнения указывал на почти детерминированную связь:  $R(k_r \leftrightarrow \chi) = 0,92$ . Минимальную дисперсию имела линейная регрессия:

$$\chi \approx 21(2k_r - 1), \quad (2)$$

где  $k_r$  выражен в процентах, а  $\chi$  в микросименсах.

Перед началом следующего этапа исследований для дефектоскопа «Филин 6» был разработан спектро-диспергирующий светофильтр, который совместно с зеркально-линзовым объективом формирует двойные изображения контролируемого изолятора и излучения ПЧР в синей и желтой частях спектра. Ход лучей в светофильтре и объективе приведен на рис. 7. Деление спектра в фильтре производится двумя цветными стеклами, вставленными в круглые отверстия непрозрачного корпуса светофильтра. Чтобы разнести цветные изображения на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП) на некоторое расстояние друг от друга, цветные стекла сошлифованы под определенным углом так, что сечение стекол имеет форму усеченной призмы. Марка одного из стекол – СС8 (синее стекло номер 8), марка второго стекла в базовом комплекте дефектоскопа – ОС12 (оранжевое стекло номер 12). По желанию покупателя второе стекло может иметь марку ЖЗС1 (желто-зеленое стекло номер 1). На рис. 8 приведены спектральные характеристики дефектоскопа, в которых спектральная чувствительность фотокатода скорректирована на спектральные коэффициенты пропускания цветных стекол, приведенные в ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. Видно, что применение стекла ЖЗС1 снижает чувствительность в желто-красном диапазоне. Его применение более предпочтительно в условиях проведения УФК при повышенных фоновых засветках (свыше 0,2 Лк), как правило, имеющих спектр в данном диапазоне и снижающих контраст двух изображений ПЧР.

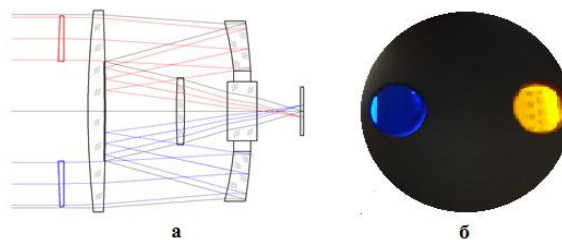


Рис. 7. Ход световых лучей в фильтре-диспергаторе и объективе дефектоскопа «Филин-6» (а) и внешний вид фильтра (б)

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

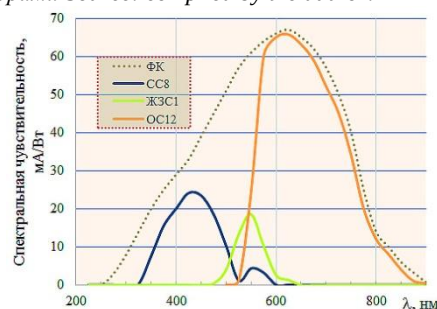


Рис. 8. Спектральные чувствительности УФ-дефектоскопа «Филин 6» в полосах пропускания цветных стекол разных марок в спектро-делителе

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

В основной части исследований были проведены испытания опорного полимерного изолятора ОСК-8-35-2 УХЛ1 с коэффициентом формы  $K_f = 5,617$  (рис. 9). Предварительно изолятор был загрязнен водной суспензией каолина и соли, (концентрация каолина 250 г/л, соли – 2 г/л). В соответствии с ГОСТ 10390-2015: удельная поверхностная электрическая проводимость слоя загрязнения  $\chi$ , мкСм, определяется как:

$$\chi = k_f / R, \quad (3)$$

где  $k_f$  - коэффициент формы, а  $R$  - измеренное значение сопротивления загрязненного изолятора.

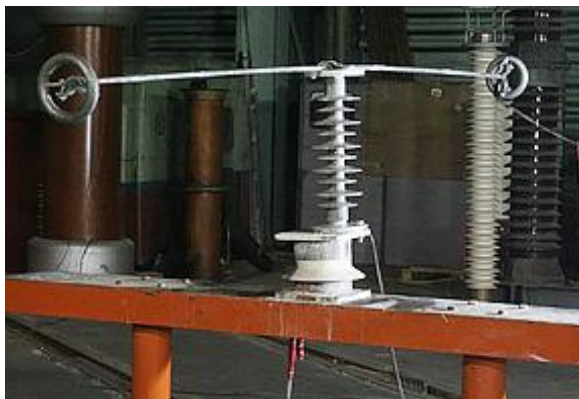


Рис. 9. Фото испытуемого изолятора с макетом провода

Fig. 9. Photo of the tested insulator with a wire model

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

Увеличение удельной проводимости проводилось нанесением дополнительных слоев загрязнения напылением приготовленного раствора пульверизатором. В ходе испытаний к образцу толчком прикладывалось испытательное напряжение 35 кВ. По осциллограммам тока утечки рассчитывалось сопротивление слоя загрязнения и по (3) вычислялась поверхностная проводимость. Атмосферные условия при проведении испытаний:  $t=14^\circ\text{C}$ ,  $\gamma=16\%$ ,  $P=750\text{мм рт. ст.}$

На рисунке 10 приведены несколько типичных изображений ПЧР, полученных в испытаниях изолятора при изменении уровня загрязнения его поверхности.

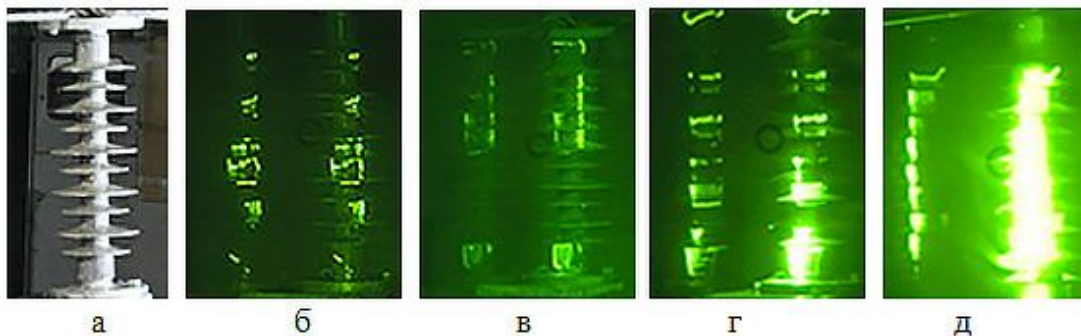


Рис. 10. Фрагменты испытаний изолятора ОСК-8-35-2 (а) с проводимостью слоя загрязнения 6,9 (б), 12 (в); 20 (г) и 28,6 (д) мкСм. Испытательное напряжение 35 кВ<sub>эфф</sub>.

Fig. 10. Fragments of HV tests of the OSK-8-35-2 insulator (a) with a contamination layer conductivity of 6.9 (b), 12 (c); 20 (d) and 28.6 (d)  $\mu\text{S}$ . Test voltage – 35 kV<sub>rms</sub>

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

В каждом изображении с экрана ЭОП (эпограмме) слева расположено изображение ПЧР в «синем» участке спектра (стекло СС8), а в правой части – изображение ПЧР в «оранжевом» участке спектра (стекло ОС12). Исходные эпограммы были подвергнуты обработке, включающей перевод в черно-белый вид и бинаризацию правого и левого изображения ПЧР в программе Photoshop (преобразование в оттенки серого производилось методом взвешенного суммирования каналов, затем полученные полутоновые изображения были бинаризованы с использованием порога, определенного на основе взвешенного усреднения). В заключение с помощью оригинальной программы проводился подсчет количества белых пикселей раздельно в обоих изображениях. Пример обработки приведен на рисунке 11.



Далее по каждому опыту по бинарным изображениям ПЧР рассчитывались отношения количества белых пикселей на «оранжевом» изображении ( $N_{orange}^{pixel}$ ) к таковому на «синем» изображении ( $N_{blue}^{pixel}$ ). Полученное таким образом отношение можно назвать «коэффициентом цветности»

$$K_{color} = N_{orange}^{pixel} / N_{blue}^{pixel} \quad (4)$$

Результаты всех испытаний приведены на рис. 12 в виде точек частных значений. Для наглядности на графике выделены цветами светофора участки, в которых удельная проводимость слоя загрязнения соответствует зонам загрязнения атмосферы 2 СЗ –  $\chi = 10 \pm 2$  мкСм; 3 СЗ  $\chi = 20 \pm 3$  мкСм и 4 СЗ –  $30 \pm 5$  мкСм. По частным значениям  $K_{color}$  построена линейная линия тренда и выведено уравнение регрессии, которое и является итогом исследований

$$K_{color} = 0,0652\chi + 0,0714 \text{ или } \chi \approx \frac{K_{color}}{0,065} - 1,1 \quad (5)$$

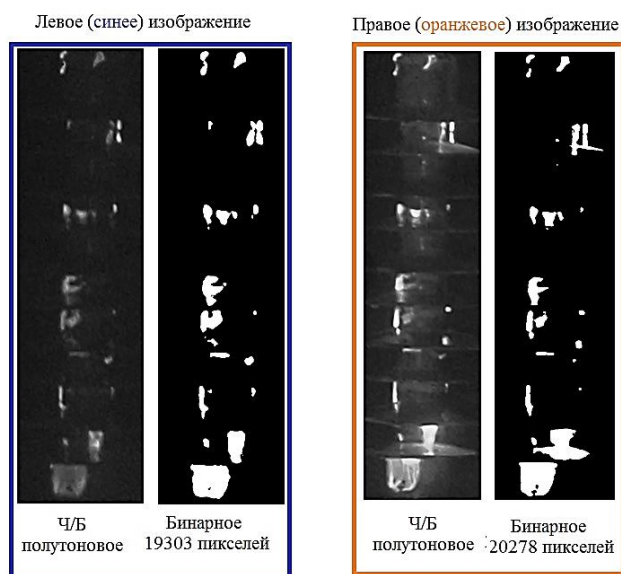


Рис. 11. Пример обработки изображений поверхностных разрядов, полученных при испытаниях изолятора с  $\chi \approx 17$  мкСм

Fig. 11. Example of processing images of surface discharges obtained during testing of an insulator with  $\chi \approx 17 \mu\text{S}$

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

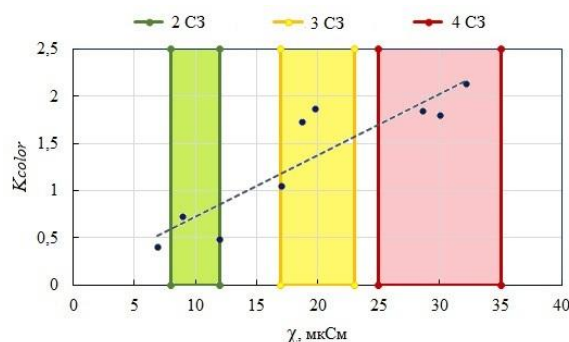


Рис. 12. Зависимость коэффициента цветности поверхностных частичных разрядов от удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения полимерного опорного изолятора

Fig. 12. The color coefficient of surface partial discharges vs the specific surface conductivity of the contamination layer on the polymer support insulator

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

### Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Прежде всего повторимся, что целью исследований была приближенная, но дистанционная, неинвазивная и малозатратная оценка уровня загрязнения внешней изоляции. Конечным результатом применения метода в полевых инспекциях электроустановок, мы считаем вывод о необходимости действий в соответствии с

требованиями стандартов: измерений удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения, чистка или обмыв, усиление, нанесение гидрофобных покрытий, замена изоляции. В такой формулировке цель можно считать достигнутой, по крайней мере, для данного вида загрязнения и типа изоляции и при учете влияющих факторов в УФК реальных объектов.

Самыми значимыми и не подлежащими управлению факторами влияния надо признать динамические изменения проводимости слоя загрязнения от увлажнения. Имеются ввиду и поступления влаги из воздуха в слой загрязнения [18] и ее потери при испарении от нагрева токами проводимости и дуговыми разрядами. Кроме того, на спектр излучения ПЧР может влиять состав загрязняющих веществ. Например, в испытаниях полимерных изоляторов на трекинго-эрозионную стойкость, загрязнение создается гидрохлоридом кальция (ГОСТ Р 52082-2003 Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6-220 кВ. Общие технические условия). Линии излучения при сбросе возбуждения атомов кальция лежат в фиолетовой области спектра, что потребует определенной корректировки найденной корреляционной связи коэффициента цветности с уровнем загрязнения. Погрешность определения коэффициента цветности может возникать при насыщении люминофорного экрана в одном изображении, что можно контролировать уже в процессе УФК.

Разрабатываемая методика оценки уровня загрязнения по спектру излучения, по-видимому, должна включать следующие действия:

- выбор оптимальных метеоусловий и допустимой фоновой освещенности;
- регистрация видеозаписи излучения ПЧР на изоляции оборудования с помощью УФД «Филин - 6» с фильтром спектро-делителем в течение не менее 2 минут (из-за нестабильности ПЧР);
- камеральный анализ видеозаписи и выборка кадров с максимальными интенсивностями ПЧР;
- обработка выбранных видеок кадров, определение коэффициента цветности и уровня загрязнения.

Критерий опасности загрязнения можно в первом приближении сформулировать так: если кадров с критическими уровнями загрязнения больше 5% (статистика отказов электрооборудования по вине загрязненной изоляции приведена в [19]) от общего числа кадров, то требуются мероприятия по СТО 56947007- 29.240.133-2012. Изоляция электроустановок в районах с загрязненной атмосферой. Эксплуатация и техническое обслуживание.

#### **Заключение (Conclusions)**

Главным достоинством метода является сравнение изображений, пропущенных через практически один и тот же оптический тракт, причем оба изображения относятся к одной и той же вспышке разряда. Необходимо отметить, что полное увлажнение слоя загрязнения на изоляторах достигается только при воздействии тумана или сильной мороси, что, конечно же, ограничивает применение метода при проведении УФК. Тем не менее, в зонах с сильно загрязнённой атмосферой, например, вблизи алюминиевых, медеплавильных и цементных заводов, химических комбинатов и на железных дорогах применение описанной методики поможет выявить проблемные изоляционные конструкции.

Перспективным направлением для дальнейшей работы является выявление зависимостей проводимости слоя загрязнения от спектра ПЧР для других типов изоляторов и видов загрязнений для расширения базы данных зависимостей.

Применение данной методики при обследовании высоковольтной внешней изоляции на ВЛ и подстанциях посредством ультрафиолетового контроля позволит качественно определить уровень загрязнения изоляции и принять предупредительные меры для избегания аварийных режимов.

Как показывает практика, многие профильные организации уже имеют в своем хозяйстве ультрафиолетовые камеры, тепловизоры и акустические приборы различных производителей. При использовании предложенного в статье метода совместно с другими повысит точность определения степени загрязнения. Например, комбинированное применение тепловизионного контроля и ультрафиолетовой ночной камеры удобно, поскольку оба метода, при определении уровня загрязнения изоляции, требуют одинаковых погодных условий и времени суток.

#### **Признательность (Gratitude)**

Авторы выражают глубокую признательность конструкторской группе

разработчиков оптических систем во главе с А.С. Кандауровым.

### Литература

1. Hampton, B. F. (1964). Flashover mechanism of polluted insulation. 111(5), 985–990. <https://doi.org/10.1049/PIEE.1964.0155>
2. Rizk, F.A.M. (1981) Mathematical Models for Pollution Flashover. *Electra*, 78, 71-103.
3. CIGRE Task Force 33.04.01 (2000). Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge. CIGRE Publication, No. 158.
4. IEEE Working Group on Insulator Contamination, Lightning and Insulator Subcommittee (1979). Application of Insulators in Contaminated Environment. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98(5), 1676–1695.
5. Владимирский, Л. Л. Основы выбора внешней изоляции воздушных линий электропередачи по результатам натурных исследований в районах с почвенными, морскими и промышленными загрязнениями / Л. Л. Владимирский // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2025. – № 1(92). – С. 121-140. – EDN KMDOER.
6. Salem A. A. *et al.*, "Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37800-37812, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
7. Maraaba, L.; Al-Soufi, K.; Sennoga, T.; Memon, A.M.; Worku, M.Y.; Alhems, L.M. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. *Energies* 2022, 15, 7656. <https://doi.org/10.3390/en15207656J>.
8. He and R. S. Gorur, "Flashover of insulators in a wet environment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 1038-1044, April 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.005795
9. Владимирский, Л.Л., Соломоник, Е.А. Развитие методов выбора внешней изоляции электроустановок высокого напряжения // Электрические станции. 2015. 12. С. 23 – 36.
10. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Марданов Г.Д., Калимуллин Р.И., Иванов Д.А. Генерация критических акустических импульсов в высоковольтных изоляторах посредством индуцированных полей частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.
11. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(2):117-127. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>
12. Ivanov, D.A.; Sadykov, M.F.; Yaroslavsky, D.A.; Golenishchev-Kutuzov, A.V.; Galieva, T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation. *Energies* 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>
13. Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П., Миронова Е.А., Насибуллин Р.А. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 5-19. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19
14. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(5):20-29. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>
15. Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Сравнительный анализ метода контроля состояния изоляции по ультрафиолетовому излучению поверхностных частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.
16. P. Blackmore and D. Birtwhistle, "Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4, no. 2, pp. 210-217, April 1997, doi: 10.1109/94.595248.
17. L. Jin, D. Ma, Z. Yuan, G. Zhou and S. Han, "Evaluation of Surface Discharge of Polluted Insulator Based on Optical Emission Spectroscopy Measurements," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2023.3300258.
18. A. Ovsyannikov, V. Borovitsky. Possible reasons of transmission line unexplained

outages. Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltages, Seoul, Korea. Paper PG-08, 2295--2298.

19. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов ЛЭП напряжением 110-750 кВ в 1997-2007 гг. // Энергия единой сети. — 2012. — № 5(5). — [С. 32-41].

#### Авторы публикации

**Овсянников Александр Георгиевич** - д.т.н., профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, Email: oag@nspsb.ru.

**Жарич Дмитрий Сергеевич** - заместитель начальника ЭТЛ, ООО «Сибэнергодиагностика», Email: jds@sibenedia.ru.

**Швец Николай Андреевич** - ведущий инженер филиала АО «Россети Научно-технический центр» - СибНИИЭ, аспирант Новосибирского государственного технического университета, Email: shvepsnik@yandex.ru.

#### References

1. Hampton, B. F. (1964). Flashover mechanism of polluted insulation. 111(5), 985–990. <https://doi.org/10.1049/PIEE.1964.0155>
2. Rizk, F.A.M. (1981) Mathematical Models for Pollution Flashover. Electra, 78, 71-103.
3. CIGRE Task Force 33.04.01 (2000). Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge. CIGRE Publication, No. 158.
4. IEEE Working Group on Insulator Contamination, Lightning and Insulator Subcommittee (1979). Application of Insulators in Contaminated Environment. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98(5), 1676--1695.
5. Vladimirovskii L.L. Fundamentals of the choice of external insulation of overhead power transmission lines based on the results of field studies in areas with soil, marine and industrial pollution // Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemy. – 2025. – № 1(92). – С. 121-140. – EDN KMDOER.
6. Salem A. A. *et al.*, "Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37800-37812, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
7. Maraaba, L.; Al-Soufi, K.; Sennoga, T.; Memon, A.M.; Worku, M.Y.; Alhems, L.M. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. *Energies* 2022, 15, 7656. <https://doi.org/10.3390/en15207656>.
8. J. He and R. S. Gorur, "Flashover of insulators in a wet environment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 1038-1044, April 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.005795
9. Vladimirovskiy, L. L., & Solomonik, E. A. (2015). Development of Methods for Selecting External Insulation for High-Voltage Installations. *Electric Stations*, 12, 23--36.
10. Golenishchev-Kutuzov VA, Golenishchev-Kutuzov AV., Semenikov AV, Mardanov GD., Kalimullin RI., Ivanov DA. Generation of critical acoustic pulses in high-voltage insulators due to induced fields of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (1): 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.
11. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R., Ivanov D.A., Semennikov A.V., Mardanov G.D. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):117-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>
12. Ivanov, D.A.; Sadykov, M.F.; Yaroslavsky, D.A.; Golenishchev-Kutuzov, A.V.; Galieva, T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation. *Energies* 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>
13. Zaripov D.K., Zakirov D.F., Tarasov B.P., Mironova E.A., Nasibullin R.A. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 5-19. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19
14. Zaripov D.K., Nasibullin R.A., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination. *Power engineering: research,*



equipment, technology. 2023;25(5):20-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>

15. Ovsyannikov A.G., Zharich D.S., Shvets N.A. Comparative analysis of the method of insulation condition monitoring by ultraviolet radiation of surface partial discharges. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (4): 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.

16. P. Blackmore and D. Birtwhistle, "Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 2, pp. 210-217, April 1997, doi:10.1109/94.595248.

17. L. Jin, D. Ma, Z. Yuan, G. Zhou and S. Han, "Evaluation of Surface Discharge of Polluted Insulator Based on Optical Emission Spectroscopy Measurements," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 31, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2023.3300258.

18. A. Ovsyannikov, V. Borovitsky. Possible reasons of transmission line unexplained outages. Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltages, Seoul, Korea. Paper PG-08, 2295--2298.

19. Efimov E.N., Timashova L.V., Yasinskaya N.V. Causes and Nature of Damage to Components of 110-750 kV Overhead Transmission Lines in 1997-2007 // Energy of the Unified Grid. — 2012. — № 5(5). — P. 32-41.

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

**Alexander G. Ovsyannikov** - Novosibirsk State Technical University, Email: [oag@nspsb.ru](mailto:oag@nspsb.ru) .

**Dmitry S. Zharich** - LLC "Sibenergodiagnostika", Email: [jds@sibenedia.ru](mailto:jds@sibenedia.ru).

**Nikolay A. Shvets** - Novosibirsk State Technical University. Email: [shvepsnik@yandex.ru](mailto:shvepsnik@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика*

**Получено** **11.01.2026 г.**

**Отредактировано** **26.05.2026 г.**

**Принято** **10.06.2026 г.**

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРА И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
annaannaaver@gmail.com

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Теплообменные аппараты (ТОА) используются во многих сферах промышленности: энергетика, нефтегазовая, химическая, фармацевтическая, металлургическая отрасль. Их значительная доля участия в технологических процессах диктует необходимость тщательного контроля технического состояния во избежание создания аварийных ситуаций. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблемы, которые возникают при эксплуатации ТОА. Провести анализ существующих методов диагностики, выявить их плюсы и минусы. Предложить комплексный метод диагностики ТОА, заключающийся в совместном анализе тепловых и гидравлических характеристик для выявления коррозионных отложений, утечек теплоносителя и его перетечек в другой контур. Определить влияние наличия отложений, утечек теплоносителя и его перетечек в другой контур на температурный напор и гидравлическое сопротивление ТОА. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи использовался метод NTU (Number of Transfer Units), формула Дарси-Вейсбаха, а также программа Aspen Exchanger Design & Rating V12. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Составленная математическая модель и проведенные расчеты в Aspen Exchanger Design & Rating V12 показали, что наличие отложений увеличивает температурный напор и гидравлическое сопротивление, а наличие утечки теплоносителя или его перетечки в другой контур уменьшают температурный напор и гидравлическое сопротивление. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Совокупный анализ характеристик температуры и давления в процессе эксплуатации ТОА позволит диагностировать его техническое состояние, а полученные математические модели послужат алгоритмической базой для создания программно-аппаратного комплекса мониторинга в реальном времени. Мониторинг теплогидравлических параметров позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования.

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат; гидравлическое сопротивление; температурный напор; контроль; диагностика.

**Благодарности:** Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям, договор № 3169ГССС15-L/100111 от 07.10.2024 г.

**Для цитирования:** Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В. Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов по изменению температурного напора и гидравлического сопротивления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 141-150. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150.

## DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT BY CHANGES IN TEMPERATURE PRESSURE AND HYDRAULIC RESISTANCE

Litvinenko A.A., Vankov Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
annaannaaver@gmail.com

**Abstract:** *RELEVANCE.* Industries such as power, oil and gas, chemical, pharmaceutical, and metallurgy use heat exchangers (HE). Their significant role in technological processes necessitates careful monitoring of their technical condition to prevent emergency situations. *THE PURPOSE.* To examine the problems that arise during HE operation. To analyze existing diagnostic methods and identify their pros and cons. To propose a comprehensive HE diagnostic method that utilizes a combined analysis of thermal and hydraulic characteristics to detect corrosion deposits, coolant leaks, and transfers to another circuit. To determine the impact of deposits, coolant leaks, and transfers to another circuit on the temperature difference and hydraulic resistance of HE. *METHODS.* To solve this problem, the Number of Transfer Units (NTU) method, the Darcy-Weisbach formula, and the Aspen Exchanger Design & Rating V12 software were used. *RESULTS.* The developed mathematical model and calculations performed in Aspen Exchanger Design & Rating V12 showed that the presence of deposits increases the temperature difference and hydraulic resistance, while coolant leaks or transfers to another circuit reduce the temperature difference and hydraulic resistance. *CONCLUSION.* A comprehensive analysis of the temperature and pressure characteristics during the operation of the thermal hydraulic system will enable diagnostics of its technical condition, and the resulting mathematical models will serve as an algorithmic basis for the creation of a real-time monitoring software and hardware system. Monitoring thermal hydraulic parameters will enable a transition from scheduled preventive maintenance to condition-based repairs, minimizing the risk of unexpected production shutdowns, reducing operating costs, and extending the equipment's service life.

**Keywords:** heat exchanger; hydraulic resistance; temperature head; control; diagnostics.

**Acknowledgments:** the work on which this article is based was supported by a grant from the Innovation Support Fund, contract No. 3169GSSS15-L/100111 dated 07.10.2024.

**For citation:** Litvinenko A.A., Vankov Y.V. Diagnostics of the technical condition of heat exchange equipment by changes in temperature pressure and hydraulic resistance. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 141-150. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150.

### **Введение (Introduction)**

Эффективное использование энергетических ресурсов является одной из ключевых задач современной промышленности. Важнейшую роль в решении этой задачи играют теплообменные аппараты (ТОА), которые представляют собой устройства для передачи тепла между двумя или более средами. Они находят широчайшее применение в различных отраслях народного хозяйства, таких как энергетика (в котлах, турбинах, системах охлаждения), химическая и нефтехимическая промышленность (в реакторах, ректификационных колоннах, системах конденсации и испарения), жилищно-коммунальное хозяйство (в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения), а также в пищевой, металлургической и многих других отраслях.

Конструктивное разнообразие теплообменных аппаратов обусловлено спецификой технологических процессов, в которых они задействованы. Наиболее распространенными типами ТОА являются [1]:

– *Кожухотрубные (кожухотрубчатые) теплообменники* – отличаются высокой надежностью и универсальностью, применяются для работы при высоких давлениях и температурах.

– *Пластинчатые теплообменники* – характеризуются компактностью и высоким коэффициентом теплопередачи благодаря развитой поверхности теплообмена, что делает их чрезвычайно эффективными.

– *Теплообменники типа «труба в трубе»* – представляют собой конструкцию, состоящую из двух труб разного диаметра, вмонтированных одна в другую, применяются при небольших расходах теплоносителей.

– *Спиральные теплообменники* – эффективны для работы с вязкими и загрязненными средами.

Независимо от типа и сферы применения, поддержание теплообменного оборудования в исправном техническом состоянии является критически важным для обеспечения бесперебойной и экономичной работы всего технологического комплекса. В процессе эксплуатации ТОА подвергаются различным процессам, таким как образование отложений, зарастание рабочих каналов, коррозия и эрозия материалов, а также механические повреждения [1, 2]. Эти факторы приводят к значительному снижению коэффициента теплопередачи, росту гидравлического сопротивления, перерасходу энергоресурсов и, в конечном счете, к снижению производительности и выходу аппарата из строя [3, 4].

В этой связи актуальной научно-практической задачей является разработка и совершенствование методов и средств оперативной диагностики технического состояния теплообменных аппаратов. Своевременное выявление дефектов позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования. Таким образом, эффективная диагностика представляет собой не только инструмент технического обслуживания, но и значительный экономический резерв для промышленных предприятий.

Для количественной оценки эффективности и технического состояния теплообменного аппарата в процессе эксплуатации предлагается использовать два фундаментальных критерия: *температурный напор* и *гидравлическое сопротивление*. Эти параметры являются характеристиками, позволяющими судить о протекающих внутри аппарата тепловых и гидродинамических процессах.

*Температурный напор*, являясь движущей силой процесса теплопередачи, напрямую определяет производительность аппарата. Для проектного расхода теплоносителей и их начальных температур расчетное значение температурного напора является фиксированной величиной. Однако в реальных условиях эксплуатации его фактическая величина может изменяться. Снижение температурного напора при сохранении постоянных расходов и входных температур свидетельствует о возникновении дополнительного термического сопротивления. Наиболее частой причиной этого является загрязнение теплообменных поверхностей, которое выступает в роли изолятора, ухудшающего теплопередачу [5].

*Гидравлическое сопротивление* — это второй ключевой диагностический параметр. Его значение для данного типа аппарата и режима работы также определяется проектом. Отклонение фактического гидравлического сопротивления от паспортного или базового значения является важным индикатором проблем. Рост гидравлического сопротивления на одном из контуров (при неизменном расходе) однозначно указывает на ухудшение проходного сечения каналов. Это может быть вызвано теми же отложениями, частичным засорением трубок или межпластинчатых зазоров посторонними предметами, шламом или продуктами коррозии. Напротив, падение гидравлического сопротивления может сигнализировать о более опасных дефектах, таких как обход потоков через поврежденные уплотнения в пластинчатых теплообменниках или течи в трубной системе, когда часть теплоносителя уходит из контура.

*Цель исследования* заключается в определении влияния отложений, наличия утечек из-за нарушения герметичности уплотнений и наличия утечек вследствие коррозионного или эрозионного износа на температурный напор и гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата.

*Научная значимость* данного исследования заключается в развитии методологии оценки технического состояния теплообменных аппаратов на основе комплексного анализа их рабочих параметров. В работе предлагается системная модель, устанавливающая взаимосвязь между изменением температурного напора и гидравлического сопротивления с одной стороны, и конкретными видами процессов (загрязнение, коррозия, утечка теплоносителя) — с другой.

*Практическая значимость* настоящего исследования заключается в непосредственном применении полученных результатов для создания средств технического диагностирования и автоматизации управления теплообменным

оборудованием. Полученные зависимости послужат алгоритмической базой для создания программно-аппаратного комплекса мониторинга в реальном времени. Эта система будет осуществлять непрерывный сбор данных с штатных датчиков температуры и давления, автоматически рассчитывать текущие значения температурного напора и гидравлического сопротивления и сравнивать их с эталонными (чистыми) характеристиками [6].

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Для проведения диагностики технического состояния ТОА наибольшее практическое применение нашли методы диагностики тепловых характеристик. В работах В.С. Орбис-Дияса [7] предлагают измерять температуры на входе и выходе греющей и нагреваемой среды и рассчитывать мощность теплового потока, коэффициент теплопередачи, объемные расходы холодного и горячего теплоносителей, а далее сравнивать опытные характеристики пластинчатого теплообменного аппарата с паспортными данными. Способ позволяет установить наличие отложений в аппаратах, отклонение тепловых режимов от расчетных, разработать технические решения по оптимизации режимов и модернизации теплотехнических схем. В работах Демина А.М. [8] для контроля теплообменной поверхности на предмет отложений предлагают устанавливать датчики температуры всех входящих и выходящих потоков и сравнивать разность температур потоков на горячей стороне теплообменника в текущий момент времени и в момент, когда поверхность теплообмена была чистой. Применение программы мониторинга теплообменных аппаратов в режиме реального времени позволяет подбирать оптимальный срок чистки трубных пучков с точки зрения сопоставимости затрат на дополнительно потребляемое топливо и на чистку. В работе Ефимова А.Н. [9] предлагается вести анализ наличия отложений по контролю температур на входе и выходе греющей и нагреваемой среды. Автоматическая система управления (АСУ) рассчитывает температурный напор при первом вводе в эксплуатацию ТОА или после проведения технического обслуживания и принимает его за эталонное значение, затем в процессе эксплуатации АСУ рассчитывает текущие значения температурного напора и сравнивает их с эталонными. Система предупредит оператора о необходимости очистки, если отклонение превысит допустимое значение. В работе Бударина П.А. [10] наличие отложений и их толщину предлагают определять по перепаду давления, устанавливая датчики давления на входе и выходе ТОА.

Вышеуказанные работы предлагают анализировать или тепловые, или гидравлические характеристики, а диагностика ТОА направлена только на обнаружение наличия отложений на теплообменной поверхности. Но, кроме отложений существуют и другие проблемы, возникающие в ходе эксплуатации ТОА: утечки теплоносителя и его перетечки из одного контура в другой. Существующие методы либо не чувствительны к таким дефектам, либо для их выявления требуются сложные, дорогостоящие и часто локальные процедуры (например, ультразвуковой контроль, течеискание при остановке оборудования), которые не позволяют вести мониторинг в режиме реального времени. На данный момент имеются работы только по оценке влияния отложений на коэффициент теплопередачи [11], температурный напор [12,13] и гидравлическое сопротивление [14,15].

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

Проанализируем влияние на температурный напор и гидравлическое сопротивление наиболее часто встречающиеся случаи при эксплуатации ТОА:

- наличие отложений на теплообменной поверхности (накипь, коррозионные отложения, биологические отложения, механические загрязнения);
- утечка теплоносителя во внешнюю среду. Причиной нарушения герметичности соединений, приводящие к утечке теплоносителя становятся: механические повреждения, термическое старение и износ при превышении рабочих температур теплоносителя, химическая деградация под воздействием коррозионно-активных сред.
- перетечка теплоносителя из одного контура в другой. Причиной взаимного перетока теплоносителей между контурами, приводящего к смешению рабочих сред становятся: некорректный монтаж уплотнительных прокладок (в случае пластинчатых теплообменников), сквозная коррозия разделительных поверхностей.

#### ***Наличие отложений на теплообменной поверхности.***

Коэффициент теплопередачи для чистой теплообменной поверхности определяется:

$$K_q = \left( \frac{1}{\alpha_1} + R_{ст} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи греющей среды Вт/(м<sup>2</sup>·°C),  $R_{ст}$  – термическое сопротивление стенки, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи нагреваемой среды Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

При расчете коэффициента теплопередачи в процессе эксплуатации в формулу (1) добавляется термическое сопротивление накипи  $R_n$ :

$$K_n = \left( \frac{1}{\alpha_1} + R_{ст} + R_n + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

Из сравнения коэффициента теплопередачи с чистой поверхностью (1) и поверхностью с отложениями (2) получается, что  $K_q > K_n$ .

Из уравнения теплопередачи (3) следует, что если количество теплоты  $Q$  и площадь поверхности теплопередачи  $F$  остаются неизменными, а коэффициент теплопередачи падает до  $K_n$ , то для сохранения прежнего теплового потока требуется увеличить разность температур между теплоносителями:

$$Q = K_q F \Delta T_q = K_n F \Delta T_n \quad (3)$$

Так как  $K_q > K_n$ , то  $\frac{K_q}{K_n} > 1$ , а значит  $\Delta T_n > \Delta T_q$ .

Гидравлическое сопротивление  $\Delta P$  определяется по формуле Дарси-Вейсбаха (4):

$$\Delta P = \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{G^2}{2\rho S^2} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8G^2}{\rho\pi^2} \quad (4)$$

где,  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения,  $L$  — длина участка, м,  $D$  — внутренний диаметр трубы, м,  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>,  $G$  — расход теплоносителя, кг/с,  $S$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

Отложения, образующиеся на стенках канала, уменьшают эффективное сечение канала, сужая диаметр для прохождения среды, т.е.  $D_{с.отлож.} < D_{без.отлож.}$ ; увеличивают коэффициент гидравлического трения, т.е.  $\lambda_{с.отлож.} > \lambda_{без.отлож.}$ ; уменьшают площадь поперечного сечения, т.е.  $S_{с.отлож.} < S_{без.отлож.}$ ;

Зная, что  $\frac{\lambda_{с.отлож.}}{\lambda_{без.отлож.}} > 1$ ,  $\frac{D_{без.отлож.}}{D_{с.отлож.}} > 1$ ,  $\frac{S_{без.отлож.}}{S_{с.отлож.}} > 1$ , то получим,  $\frac{\Delta P_{с.отлож.}}{\Delta P_{без.отлож.}} > 1$ , а

следовательно гидравлическое сопротивление контура с отложениями больше гидравлического сопротивления контура без отложений  $\Delta P_{с.отлож.} > \Delta P_{без.отлож.}$ .

*Утечка теплоносителя во внешнюю среду.*

Влияние утечки теплоносителя на гидравлическое сопротивление, также выразим через формулу Дарси-Вейсбаха (4), запишем формулу гидравлического сопротивления для случая теплообменного аппарата без утечки  $\Delta P_{без.ут.}$  (5) и в случае утечки  $\Delta P_{с.ут.}$  (6):

$$\Delta P_{без.ут.} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8G^2}{\rho\pi^2} \quad (5)$$

$$\Delta P_{с.ут.} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8(G_{вх} - g_{ут})^2}{\rho\pi^2} \quad (6)$$

где,  $G_{вх}$  — расход теплоносителя на входе в контур, кг/с,  $g_{ут}$  — расход утечки, кг/с. Произведя над уравнениями (5) и (6) математические операции деления и сокращения

одинаковых множителей, получим, что  $\frac{\Delta P_{с.ут.}}{\Delta P_{без.ут.}} < 1$ , а следовательно гидравлическое

сопротивление контура в котором происходит утечка теплоносителя меньше гидравлического сопротивления без утечки  $\Delta P_{с.ут.} < \Delta P_{без.ут.}$ .

Для анализа влияния утечки теплоносителя во внешнюю среду на температурный напор применим метод *NTU*. Метод *Number of Transfer Units (NTU)* позволяет анализировать эффективность теплообменника через безразмерные параметры. Число единиц переноса *NTU* определяется как:

$$NTU = \frac{UF}{C_{\min}} \quad (7)$$

где,  $U$  – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C),  $F$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>,  $C_{\min}$  – минимальная потоковая теплоемкость, Вт/°C,  $C_{\min} = \min(C_1; C_2)$ ,  $C_{\max} = \max(C_1; C_2)$ . Потоковая теплоемкость горячего  $C_1$  и холодного  $C_2$  теплоносителя:  $C_1 = G_1 c_{p1}$ ,  $C_2 = G_2 c_{p2}$ , где  $G_1, G_2$  – расход горячего и холодного теплоносителя, кг/с,  $c_{p1}, c_{p2}$  – удельная теплоемкость горячего и холодного потока, кДж/(кг·°C).

Температурный напор определяется:

$$\Delta T = \frac{Q}{UF} = \frac{\varepsilon C_{\min} \Delta T_{\max}}{UF} = \frac{\varepsilon}{NTU} \Delta T_{\max} \quad (8)$$

где,  $\varepsilon$  – эффективность ТОА,  $\Delta T_{\max} = T_1^{ex} - T_2^{ex}$  – максимально возможная разность температур.

При анализе обоих возможных случаев (первый случай – потоковая теплоемкость холодной среды изначально была больше, второй случай – потоковая теплоемкость горячей среды изначально была больше), получим, что при наличии утечки теплоносителя во внешнюю среду температурный напор уменьшается.

*Перетечка теплоносителя из одного контур в другой.*

Аналогично формулам (5) и (6), введя новые переменные для случая перетечки теплоносителя из одного контура в другой  $\Delta P_{\text{без пер.}}$  и  $\Delta P_{\text{с пер.}}$ , получим, что  $\frac{\Delta P_{\text{с пер.}}}{\Delta P_{\text{без пер.}}} < 1$ ,

т.е. гидравлическое сопротивление контура в котором происходит перетечка уменьшается, а гидравлическое сопротивления контура в который происходит перетечка – увеличивается.

Аналогично формулам (7) и (8), анализируя изменение расходов теплоносителей в горячем и холодном контурах, теплоемкости потоков, получим, что при наличии перетечки теплоносителя из одного контур в другой, температурный напор ТОА уменьшается.

Смоделируем вышеуказанные случаи в программе *Aspen Exchanger Design & Rating V12 (Aspen EDR)* в режиме *Simulator*. Для расчетов примем теплообменный аппарат ТТР-27-10, соответственно, использованы его геометрические исходные данные, для расчета принят программный пакет «STEAMNBS», греющий и нагреваемый теплоноситель – вода.

*Наличие отложений на теплообменной поверхности.*

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от термического сопротивления отложений (толщины), в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей среды  $T_1$ , нагреваемой среды  $T_3$  и расход теплоносителей, а *Aspen EDR* рассчитает температуры на выходе  $T_2, T_4$  и температурный напор  $\Delta T$ . Рассмотрим два случая: 1 – отложения образуются только со стороны греющего теплоносителя, 2 – отложения образуются с обеих сторон теплоносителей. Термическое сопротивление отложений со стороны греющего теплоносителя  $R_1$  и нагреваемого  $R_2$  будем задавать в диапазоне от 0 до 0,01 м<sup>2</sup>·°C/Вт.

Полученные значения температур на выходе греющей и нагреваемой среды и температурный напор занесены в таблицу 1.

Таблица 1

Table 1

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии отложений на теплообменной поверхности  
Calculation of the outlet temperature of the heating and heated media and the temperature pressure in the presence of deposits on the heat exchange surface

| $R_1, \text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ | $R_2, \text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ | $T_1, \text{°C}$ | $T_2, \text{°C}$ | $T_3, \text{°C}$ | $T_4, \text{°C}$ | $\Delta T, \text{°C}$ |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 0                                    | 0                                    | 47,5             | 45,8             | 42,63            | 44,34            | 3,17                  |
| 0,0001                               | 0                                    | 47,5             | 45,97            | 42,63            | 44,16            | 3,34                  |
| 0,0001                               | 0,0001                               | 47,5             | 46,12            | 42,63            | 44,02            | 3,485                 |
| 0,0005                               | 0                                    | 47,5             | 46,42            | 42,63            | 43,72            | 3,785                 |
| 0,0005                               | 0,0005                               | 47,5             | 46,7             | 42,63            | 43,43            | 4,07                  |
| 0,001                                | 0                                    | 47,5             | 46,7             | 42,63            | 43,43            | 4,07                  |

|       |       |      |       |       |       |      |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 0,001 | 0,001 | 47,5 | 46,98 | 42,63 | 43,15 | 4,35 |
| 0,005 | 0     | 47,5 | 47,25 | 42,63 | 42,89 | 4,61 |
| 0,005 | 0,005 | 47,5 | 47,63 | 42,63 | 42,77 | 4,73 |
| 0,01  | 0     | 47,5 | 47,36 | 42,63 | 42,77 | 4,73 |
| 0,01  | 0,01  | 47,5 | 47,73 | 42,63 | 42,7  | 4,8  |

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

Утечка теплоносителя во внешнюю среду.

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от величины утечки теплоносителя, в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей  $T_1$  и нагреваемой среды  $T_3$ , а Aspen EDR рассчитает температуры на выходе  $T_2$ ,  $T_4$  и температурный напор  $\Delta T$ . Изменяемые параметры – расход греющей  $G_1$  и нагреваемой  $G_2$  среды.

Строка 1 таблицы 2 – утечка отсутствует, строка 2 – утечка горячего теплоносителя составляет 0,05 кг/с, строка 3 – утечка горячего теплоносителя составляет 0,08 кг/с, строка 4 – утечка холодного теплоносителя 0,05 кг/с, строка 5 – утечка холодного теплоносителя 0,08 кг/с.

Таблица 2

Table 2

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии утечки теплоносителя во внешнюю среду

Calculation of the outlet temperature of the heating and heated medium and the temperature pressure in the presence of leakage of the coolant into the external environment

| № п/п | $G_1$ , кг/с | $G_2$ , кг/с | $T_1$ , °C | $T_2$ , °C | $T_3$ , °C | $T_4$ , °C | $\Delta T$ , °C |
|-------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|
| 1     | 0,25         | 0,25         | 47,5       | 45,8       | 42,63      | 44,34      | 3,17            |
| 2     | 0,2          | 0,25         | 47,5       | 45,57      | 42,63      | 44,18      | 3,12            |
| 3     | 0,17         | 0,25         | 47,5       | 45,39      | 42,63      | 44,07      | 3,09            |
| 4     | 0,25         | 0,2          | 47,5       | 45,95      | 42,63      | 44,57      | 3,12            |
| 5     | 0,25         | 0,17         | 47,5       | 46,07      | 42,63      | 44,75      | 3,08            |

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

Перетечка теплоносителя из одного контура в другой

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от величины перетечки теплоносителя из одного контура в другой, в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей  $T_1$  и нагреваемой среды  $T_3$ , а Aspen EDR рассчитает температуры на выходе  $T_2$ ,  $T_4$  и температурный напор  $\Delta T$ . Изменяемые параметры – расход греющей  $G_1$  и нагреваемой  $G_2$  среды.

Строка 1 таблицы 3 – перетечка отсутствует, строка 2 – перетечка горячего теплоносителя в холодный составляет 0,03 кг/с, строка 3 – перетечка горячего теплоносителя в холодный составляет 0,05 кг/с, строка 4 – перетечка холодного теплоносителя в горячий составляет 0,03 кг/с, строка 5 – перетечка холодного теплоносителя в горячий составляет 0,05 кг/с.

Таблица 3

Table 3

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии перетечки теплоносителя в другой контур

Calculation of the temperature at the outlet of the heating and heated medium and the temperature pressure in the presence of a coolant overflow into another circuit

| № п/п | $G_1$ , кг/с | $G_2$ , кг/с | $T_1$ , °C | $T_2$ , °C | $T_3$ , °C | $T_4$ , °C | $\Delta T$ , °C |
|-------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|
| 1     | 0,25         | 0,25         | 47,5       | 45,8       | 42,63      | 44,34      | 3,17            |
| 2     | 0,22         | 0,28         | 47,5       | 45,59      | 42,63      | 44,14      | 3,16            |
| 3     | 0,2          | 0,3          | 47,5       | 45,45      | 42,63      | 44         | 3,14            |
| 4     | 0,28         | 0,22         | 47,5       | 46         | 42,63      | 44,55      | 3,15            |
| 5     | 0,3          | 0,2          | 47,5       | 46,13      | 42,63      | 44,7       | 3,14            |

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



### **Результаты и Обсуждение (Results and Discussions)**

В ходе исследования был проведен анализ влияния трех эксплуатационных дефектов на теплогидравлические характеристики теплообменного аппарата: 1) образование отложений на теплообменных поверхностях; 2) утечка теплоносителя во внешнюю среду; 3) перетечка теплоносителя между контурами. Влияние на тепловые характеристики были описаны через уравнение теплопередачи и метод  $NTU$ , а влияние на гидравлические характеристики описано через формулу Дарси-Вейсбаха. Для проверки достоверности выявленных математических зависимостей были проведены расчеты в *Aspen Exchanger Design & Rating*.

Исходя из анализа Таблицы 1 можно сделать вывод, что наличие слоя отложений снижает тепловую эффективность и увеличивает гидравлическое сопротивление. Образование накипи создает дополнительное термическое сопротивление, что напрямую снижает коэффициент теплопередачи. Для сохранения требуемой тепловой мощности при постоянном расходе теплоносителей системе необходимо компенсировать падение коэффициента теплопередачи увеличением среднелогарифмического температурного напора. Параллельно с этим, отложения, уменьшая живое сечение каналов и повышая их шероховатость, вызывают рост гидравлического сопротивления аппарата. В случае постоянного массового расхода рост сопротивления описывается уравнением 4, вытекающим из формулы Дарси-Вейсбаха, где потери давления обратно пропорциональны диаметру канала в пятой степени.

Анализируя таблицы 2, 3, уравнения 5, 6 получим, что наличие утечки теплоносителя во внешнюю среду приводит к снижению расхода потока через аппарат, уменьшение расхода ведет к снижению коэффициента теплопередачи и температурного напора. Гидравлическое сопротивление контура в котором происходит утечка уменьшается, т.к. оно пропорционально квадрату расхода, гидравлическое сопротивление второго контура остается неизменным. Наличие перетечки теплоносителя из одного контура в другой приводит к нарушению теплового и материального баланса, из-за дисбаланса расходов уменьшается температурный напор. Гидравлическое сопротивление контура в котором происходит перетечка уменьшается, гидравлическое сопротивление второго контура увеличивается.

Установлено, что процессы загрязнения теплообменных поверхностей и утечки/перетечки теплоносителя оказывают разнонаправленное влияние на рабочие параметры: загрязнения увеличивают температурный напор и гидравлическое сопротивление, в то время как утечки и перетечки приводят к их снижению. Выявленная зависимость послужит алгоритмической базой для программирования автоматической системы диагностики технического состояния ТОА [6]. Принцип функционирования системы заключается в непрерывном диагностировании технического состояния ТОА. На этапе первичного запуска, после проведения технического обслуживания или ремонта, система фиксирует эталонные значения температурного напора и гидравлического сопротивления. В дальнейшем, в режиме реального времени, осуществляется расчет текущих значений указанных параметров и их сравнение с эталонными. Если разница между текущими и эталонными значениями превысит заданный порог, то система отправит оператору аварийное сообщение с описанием неисправности ТОА.

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

Совокупный анализ характеристик температуры и давления в процессе эксплуатации ТОА позволит диагностировать его техническое состояние, как на наличие отложений на теплообменной поверхности, так и разного рода утечки теплоносителя, вызванные механическими повреждениями, сквозной коррозией, термическим старением уплотнительных прокладок или их неправильной установкой.

Мониторинг теплогидравлических параметров позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования.

### **Литература**

1. Litvinenko A.A., Vankov Y.V., Timershin A.R., Sharafiev D.E., Ponomarev R.A. The Method of Obtaining Deposits on the Heat Exchange Surface of Heat Exchangers. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2025. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970875
2. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях

теплообменного оборудования методом свободных колебаний. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>

3. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>

4. Корнеев С.В., Демин А.М., Демин М.А., Сорокин В.Н., Кабаков А.Н. Повышение эффективности работы теплообменников компрессорного и технологического оборудования / Вестник СибАДИ, выпуск 3 (25), 2012. – С. 18-21

5. Интернет-ресурс: <https://teploobmennik.ridan.ru/articles/protechki-vteploobmennike-vidy-prichiny-diagnostika/>

6. Пат. №2808982, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа», №2808982, опубл. 05.12.2023

7. Орбис-Дияс В.С., Адамова В.А. К диагностике технического состояния теплообменных аппаратов по параметрам эксплуатации // Энергосбережение, №2, 2005. – С. 24.

8. Демин А.М., Наumenко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив / Омский научный вестник, №4, 2019. – с. 85

9. Пат. 2771269, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики состояния рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург», № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022

10. Бударин П.А. Основные концепции в параметрическом диагностировании теплообменных аппаратов на наличие в них загрязнений / Бударин П.А., Бубликов И.А., Кравец С.Б. // Вестник АГТУ, №6, 2007. – С. 79-82.

11. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017)

12. Elistratova, Yulia & Seminenko, Artem & Uvarov, Valeriy & Minko, Vsevolod. (2023). Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers. *Vestnik MGSU*. 737-746. 10.22227/1997-0935.2023.5.737-74

13. Anipko, Oleh & Kots, Ivan & Snisarchuk, Dmytro. (2025). ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEPOSITS ON HEAT EXCHANGE SURFACES ON HEAT EXCHANGE EFFICIENCY. *Modern technology, materials and design in construction*. 37. 171-180. 10.31649/2311-1429-2024-2-171-180.

14. Антипов А.И., Голубев Л.Г., Мухтаров Я.С. Влияние отложений в теплообменной аппаратуре на термические сопротивления и энергетические затраты на объектах промышленной подготовки нефти. *Проблемы энергетики*, 2003, №5-6. – С.28-35.

15. Интернет ресурс: <https://ateks38.ru/tpost/lc28ld4rmo-plastinchatie-apparati-delonkoe-chast>

#### Авторы публикации

**Литвиненко Анна Алексеевна** – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), Email: [annaannaaver@gmail.com](mailto:annaannaaver@gmail.com).

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), Email: [yvankov@mail.ru](mailto:yvankov@mail.ru).

#### References

1. Litvinenko A.A., Vankov Y.V., Timershin A.R., Sharafiev D.E., Ponomarev R.A. The Method of Obtaining Deposits on the Heat Exchange Surface of Heat Exchangers. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2025. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970875

2. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the

method of free oscillations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(4):55-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>

3. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):106-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>

4. Korneev S.V., Demin A.M., Demin M.A., Sorokin V.N., Kabakov A.N. Improving the efficiency of heat exchangers of compressor and process equipment / Bulletin of SibADI, issue 3 (25), 2012. – P. 18-21

5. Internet resource: <https://teploobmennik.ridan.ru/articles/protechki-vteploobmennike-vidy-prichiny-dagnostika/>

6. Patent No. 2808982, Russian Federation, Method for Automatic Diagnosis of the Presence of Deposits on the Walls of a Recuperative Heat Exchanger / A. A. Averianova, JSC V. B. Shnepp Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors, No. 2808982, published December 5, 2023

7. Orbis-Diyas V.S., Adamova V.A. On diagnostics of the technical condition of heat exchangers based on operating parameters // Energy Saving, No. 2, 2005. – P. 24.

8. Demin A.M., Naumenko A.P. Diagnostics of heat exchange equipment based on the operating parameters of a diesel fuel hydrotreating unit / Omsk Scientific Bulletin, No. 4, 2019. – p. 85

9. Patent 2771269, Russian Federation, Method for Automatic Diagnostics of the State of Recuperative Heat Exchangers in Low-Temperature Gas Separation Units Operated in the North of the Russian Federation / Efimov A.N. Patent Holder Gazprom Dobycha Yamburg Limited Liability Company, No. 2021107549, filed March 22, 2021, published April 29, 2022

10. Budarin P.A. Basic concepts in parametric diagnostics of heat exchangers for the presence of contaminants in them / Budarin P.A., Bublikov I.A., Kravets S.B. // Bulletin of ASTU, No. 6, 2007. – pp. 79-82.

11. Galkovsky V.A., Chupova M.V. Analysis of the reduction in the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination // Internet journal "SCIENCE STUDY" Vol. 9, No. 2 (2017)

12. Elistratova, Yulia & Seminenko, Artem & Uvarov, Valeriy & Minko, Vsevolod. (2023). Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers. *Vestnik MGSU*. 737-746. 10.22227/1997-0935.2023.5.737-74

13. Anipko, Oleh & Kots, Ivan & Snisarchuk, Dmytro. (2025). ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEPOSITS ON HEAT EXCHANGE SURFACES ON HEAT EXCHANGE EFFICIENCY. *Modern technology, materials and design in construction*. 37. 171-180. 10.31649/2311-1429-2024-2-171-180.

14. Antipov, A.I., Golubev, L.G., and Mukhtarov, Ya.S. "The Effect of Deposits in Heat-Exchange Equipment on Thermal Resistances and Energy Consumption at Oil Field Treatment Facilities." *Problemy Energetiki*, 2003, nos. 5–6, pp. 28–35.

15. Internet resource: <https://ateks38.ru/tpost/lc28ld4rmo-plastinchatie-apparati-delon-tonkoe-chast>

#### Authors of the publication

**Litvinenko Anna Alekseevna** – Kazan State Power Engineering University, Email: [annaannaaver@gmail.com](mailto:annaannaaver@gmail.com).

**Vankov Yuri Vitalievich** – Kazan State Power Engineering University, Email: [yvankov@mail.ru](mailto:yvankov@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.*

**Получено** 26.10.2025 г.

**Отредактировано** 02.02.2026 г.

**Принято** 03.02.2026 г.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ТРИГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Шайтор Н.М.

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

littie@mail.ru

**Резюме:** В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты применения систем тригенерации, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии, предназначенных для энергоснабжения центров обработки данных и других вычислительных комплексов. Цель исследования - обоснование технической, энергетической и экономической целесообразности применения солнечных тригенерационных систем для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов. На примере автономного объекта в Крыму демонстрируется возможность одновременной генерации электроэнергии, тепла и холода с использованием солнечных фотоэлектрических панелей, вакуумных гелиоколлекторов и абсорбционной холодильной машины. Задачи исследования: разработка математической модели тригенерационной системы; оценка энергетического баланса с учётом сезонной изменчивости; определение оптимальной конфигурации оборудования; технико-экономический анализ. Методы исследования: моделирование фотоэлектрической подсистемы, вакуумных гелиоколлекторов, абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины на основе уравнений баланса энергетических потоков; расчёт срока окупаемости, внутренней нормы доходности, капитальных и эксплуатационных затрат. Статья обосновывает целесообразность внедрения подобных систем в южных регионах России и других территориях с высоким уровнем солнечной инсоляции. Ключевым преимуществом описанного подхода является синергетический эффект. Избыточная электроэнергия от фотоэлектрических панелей направляется на абсорбционную машину, производящую холод для кондиционирования серверных залов, что критически важно для их работы. Тепловая энергия от гелиоколлекторов используется для покрытия бытовых нужд и поддержания температурного режима в межсезонье. Интеллектуальная система управления обеспечивает приоритетное использование «зелёной» энергии, а резервирование за счёт традиционных сетей минимизировано. Это позволяет не только достичь высокой степени энергонезависимости, но и значительно снизить углеродный след объекта. Полученные результаты: интеграция солнечных установок с абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной позволила сократить потери тепловой энергии на 66,1%, вырабатывать 8,2 МВт·ч холода в год, повысить автономность объекта с 68% до 89%, достичь срока окупаемости 4,3 года и внутренней нормы доходности 18,5%. Таким образом, предлагаемое решение является технологически и экономически эффективным, способствуя устойчивому развитию энергоёмких цифровых инфраструктур.

**Ключевые слова:** тригенерация; энергоэффективность; центр обработки данных; солнечная энергия; фотоэлектрическая станция; вакуумный гелиоколлектор; абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина; автономное энергоснабжение.

**Для цитирования:** Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Шайтор Н.М. Использование систем тригенерации для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 151-163. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-151-163.

## USING TRIGENERATION SYSTEMS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY OF COMPUTING COMPLEXES

Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Shaitor N.M.

Sevastopol state university, Sevastopol, Russia  
littie@mail.ru

**Abstract:** The article discusses the theoretical and practical aspects of the application of trigeneration systems integrated with renewable energy sources intended for the power supply of data centers and other computing complexes. The purpose of the study is to substantiate the technical, energy and economic feasibility of using solar trigeneration systems to increase energy efficiency and sustainability of computing complexes. Using the example of an autonomous facility in Crimea, the possibility of simultaneous generation of electricity, heat and cold using solar photovoltaic panels, vacuum solar collectors and an absorption refrigerating machine is demonstrated. Research objectives: development of a mathematical model of a trigeneration system; assessment of the energy balance taking into account seasonal variability; determination of the optimal configuration of equipment; technical and economic analysis. Research methods: modeling of a photovoltaic subsystem, vacuum solar collectors, absorption bromolithium refrigerating machine based on energy flow balance equations; calculation of payback period, internal rate of return, capital and operating costs. The article substantiates the expediency of introducing such systems in the southern regions of Russia and other territories with high levels of solar insolation. The key advantage of the described approach is the synergetic effect. The excess electricity from the photovoltaic panels is directed to an absorption machine that produces cold for air conditioning server rooms, which is critical for their operation. Thermal energy from solar collectors is used to cover household needs and maintain temperature conditions during the off-season. The intelligent control system ensures the priority use of "green" energy, and redundancy due to traditional networks is minimized. This allows not only to achieve a high degree of energy independence, but also to significantly reduce the carbon footprint of the facility. The results obtained: the integration of solar installations with an absorption lithium bromide refrigerating machine made it possible to reduce thermal energy losses by 66.1%, generate 8.2 MWh of cold per year, increase the autonomy of the facility from 68% to 89%, achieve a payback period of 4.3 years and an internal rate of return of 18.5%. Thus, the proposed solution is technologically and economically efficient, contributing to the sustainable development of energy-intensive digital infrastructures.

**Keywords:** trigeneration; energy efficiency; data processing center; solar energy; photovoltaic plant; vacuum solar collector; absorption bromolithium refrigerating machine; autonomous power supply.

**For citation:** Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Shaitor N.M. Using trigeneration systems to increase energy efficiency and sustainability of computing complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 151-163. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-151-163.

### **Введение (Introduction)**

Введение. Современные вычислительные комплексы (ВК), в особенности центры обработки данных (ЦОД), представляют собой критически важные объекты с высокой и непрерывной нагрузкой на энергосистему. ВК являются критической инфраструктурой цифровой экономики, однако их развитие сдерживается растущими энергозатратами. На их долю уже сегодня приходится несколько процентов мирового потребления электроэнергии, при этом лишь 30-50% этой энергии расходуется непосредственно на вычисления, а остальное – на системы электропитания и охлаждения [1]. Энергопотребление таких комплексов складывается из двух основных компонентов: питания собственно вычислительного оборудования (ИТ-нагрузка) и обеспечения функционирования инженерных систем, среди которых системы охлаждения и кондиционирования воздуха, которое могут занимать до 40% и более от общего энергобаланса.

Традиционная схема энергоснабжения вычислительного комплекса подразумевает

закупку электроэнергии из централизованной сети с последующим преобразованием и распределением, а также производство холода с помощью парокомпрессионных чиллеров, потребляющих значительное количество электроэнергии. Это делает объект уязвимым с точки зрения надёжности электроснабжения и ведёт к увеличению эксплуатационных расходов [2].

В контексте глобальных трендов на декарбонизацию, цифровизацию и повышение устойчивости инфраструктуры актуальной задачей становится поиск инновационных, ресурсоэффективных решений для энергоснабжения ЦОД. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение систем тригенерации, то есть комбинированного производства трёх видов энергии (электричество, тепло, холод) из единого первичного источника или группы согласованных источников. При интеграции с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), в частности с солнечной, такие системы позволяют не только повысить общий коэффициент полезного действия энергокомплекса до 80–90%, но и обеспечить высокую степень автономности, снизить затраты на энергоносители и минимизировать экологическое воздействие [3].

Целью данной статьи является комплексное обоснование технической, энергетической и экономической возможности применения солнечных тригенерационных систем для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов. Исследование выполнено на примере модели автономного объекта, с частичным электроснабжением от сети, расположенного в регионе с высоким солнечным потенциалом – Крыму. В работе решаются задачи по разработке математической модели системы, определению оптимальной конфигурации оборудования, оценке энергетического баланса в условиях сезонной изменчивости и проведению детального технико-экономического анализа.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

В публикациях [1-2] акцентируется внимание на растущем энергопотреблении дата-центров и связанных с этими вызовами для отрасли. Автор подчёркивает необходимость: внедрения энергоэффективных систем охлаждения; использования возобновляемых источников энергии; оптимизации топологии и нагрузки ЦОД; предлагаются конкретные решения по устойчивому охлаждению дата-центров, включая: применение жидкостного охлаждения; использование естественного холода (*free cooling*); интеграцию тепловых насосов для утилизации сбросного тепла.

В публикациях [3, 4, 15, 16, 18] тригенерация (совместная выработка электроэнергии, тепла и холода) рассматривается как перспективный метод повышения энергоэффективности. Авторы раскрывают принцип работы и условия применения тригенерационных установок, подчёркивая их эффективность в условиях переменной нагрузки; анализируют тригенерацию в бинарных комплексах, демонстрируя рост КПД за счёт утилизации вторичных энергоресурсов; доказывают экономическую целесообразность внедрения тригенерационных установок в энергосистемах; рассматривают тригенерацию как инструмент повышения энергетической эффективности на примере промышленных объектов; исследуют интеграцию тригенерации с ВИЭ в южных регионах России, предлагая модели оптимизации для климатических условий.

В публикациях [5, 6, 10] проведены исследования в области солнечной энергетики; проведен анализ характеристики фотоэлектрических панелей, включая зависимость КПД от температуры и освещённости; проведена оценка эффективности солнечных коллекторов для горячего водоснабжения; приведен практический кейс использования солнечной энергии в Казани, доказывая рентабельность в умеренном климате.

В работе [17] автор Волков Э. П. и Шишкин А. Н. обсуждают перспективы модернизации электроэнергетики России, выделяя роль распределённых генераций.

Представленный корпус источников охватывает ключевые направления современной энергетики: развитие дата-центров, тригенерацию, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), аккумулирование энергии и модернизацию энергосистем.

#### ***Схемы интеграции с инфраструктурой вычислительного комплекса (Integration schemes with the computing complex infrastructure)***

Интеграция тригенерации может осуществляться по нескольким схемам [4]:

1. Базовая схема - тригенерационная установка покрывает базовую нагрузку по электроэнергии и охлаждению, пиковые нагрузки обеспечиваются сетью и традиционными чиллерами.

2. Схема с приоритетом по холоду - мощность первичного двигателя выбирается

исходя из потребности в тепле для выработки необходимого количества холода, что часто является оптимальным для ВК.

3. Гибридная схема - использование гибридной системы охлаждения, где абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (АБХМ) работают в тандеме с электрическими чиллерами, оптимизируя работу в зависимости от температуры наружного воздуха и стоимости энергоносителей.

## Методология и модель тригенерационной системы

## 1. Конфигурация и состав системы тригенерации

В основе исследования лежит гибридная энергосистема тригенерационного типа, содержащая солнечные установки и спроектированная для автономного энергоснабжения вычислительного комплекса с возможностью электроснабжения от сети. Система интегрирует в единый комплекс ключевые компоненты для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода.

На рисунке 1 показана тепловентиляционная схема ЦОД, содержащая солнечную тепловую подсистему, подсистему рекуперации и аккумулирования тепла, и холодильную подсистему.

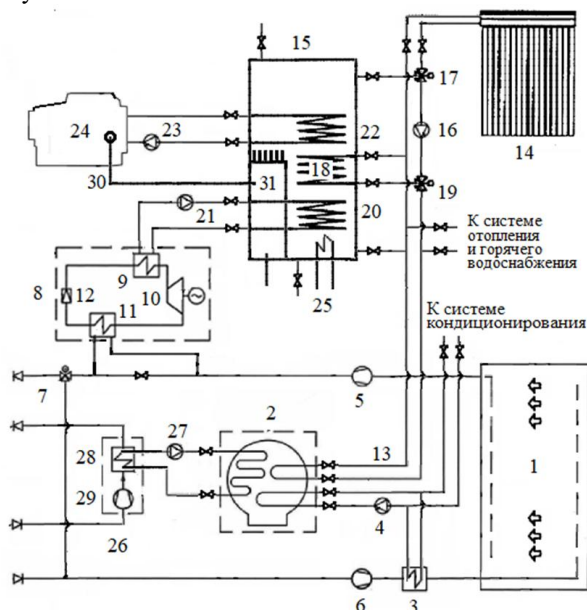


Рис. 1. Тепловентиляционная схема ЦОД: 1 - Центр обработки данных (ЦОД); 2 - Абсорбционная холодильная машина (АБХМ); 3, 28 - Теплообменник; 4, 16, 21, 23, 27 - Насос циркуляционный; 5 - Вытяжной вентилятор; 6 - Приточный вентилятор; 7 - Трехходовая вентиляционная заслонка; 8 - Тепловой насос воздух-вода (ТНВВ); 9 - Теплообменник-конденсатор; 10 - Фреоновый компрессор; 11 - Теплообменник-испаритель; 12 - Дросселирующее устройство; 13 - Рабочий контур АБХМ; 14 - Гелиоколлектор; 15 - Бак-аккумулятор; 17, 19 - Трёхходовой кран; 18, 20, 22 - Теплообменник бака-аккумулятора; 24 - Дизельгенераторная установка (ДГУ); 25 - Электрический нагревательный элемент; 26 - Градирня; 29 - Вентилятор; 30 - Выхлопная труба; 31 - Нагревательная камера

Fig. 1. Thermal ventilation scheme of the DPC: 1 - Data processing center (DPC); 2 - Absorption refrigerating machine (ABCM); 3, 28 - Heat exchanger; 4, 16, 21, 23, 27 - Circulation pump; 5 - Exhaust fan; 6 - Supply air fan; 7 - Three-way ventilation flap; 8 - Air-water heat pump (HVAC); 9 - Heat exchanger-condenser; 10 - Freon compressor; 11 - Heat exchanger-evaporator; 12 - Throttling device; 13 - ABHM working circuit; 14 - Solar collector; 15 - Battery tank; 17, 19 - Three-way valve; 18, 20, 22 - Heat exchanger of the accumulator tank; 24 - Diesel generator set (DGU); 25 - Electric heating element; 26 - Cooling Tower; 29 - The fan; 30 - Exhaust pipe; 31- Heating chamber

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

Солнечная тепловая подсистема выполнена на основе вакуумных гелиоколлекторов (ВГК): модель «Дача Люкс» XFS-II) для генерации тепловой энергии. Это тепло может быть направлено на отопление объекта, горячее водоснабжение (ГВС) или использовано в качестве источника энергии для производства холода с помощью абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ), работающей на горячей воде.

Подсистема рекуперации и аккумулирования тепла содержит систему подготовки горячей воды, включающая: рекуперативный тепловой насос (ТН) «воздух-вода» (Hitachi RASM-2VRE), интегрированный в систему вытяжной вентиляции, который

утилизует низкопотенциальное тепло от IT-оборудования; бак-аккумулятор (стратификационного типа) объемом 600 л (Aqua Systems AQS-T1B-600), предназначенный для накопления тепла от ТН и ВСК, сглаживания суточной неравномерности солнечной генерации и обеспечения работы АБХМ в ночное время; электрический нагреватель (УМТ Сангай ТЭНБ-П-9, 9 кВт, с регулировкой), выполняющий роль резервного источника тепла для догрева теплоносителя до температуры, необходимой для запуска АБХМ (питание ТЭНа осуществляется в приоритетном порядке от избытков электроэнергии ФЭС).

Холодильная подсистема выполнена на основе АБХМ серии «Thermax», которая служит для преобразования избыточной низкопотенциальной тепловой энергии (65–95°C) от тепловой подсистемы в холод для систем кондиционирования серверных помещений.

На рисунке 2 показана функциональная схема электроснабжения нагрузки ЦОД. Фотоэлектрическая подсистема выполнена в виде фотоэлектрической станции (ФЭС), интегрированной в традиционную систему электроснабжения ЦОД от трансформаторной подстанции (ТП) и резервной дизельгенераторной установки (ДГУ). ДГУ используется при отсутствии электроснабжения от ТП, а также в качестве долговременного резерва для периодов экстремально низкой солнечной активности.

ФЭС содержит высокоэффективные монокристаллические кремниевые панели (модель DELTA NXT 500-66/2 M10 HC с КПД 21,3%). Данная подсистема предназначена для преобразования солнечной радиации в электрическую энергию, которая идёт на питание IT-оборудования, систем освещения, управления, инженерных и вспомогательных устройств.

Системы аккумулирования и резервирования электроэнергии содержат электрические аккумуляторные батареи (АБ) для сглаживания суточной неравномерности выработки и потребления электроэнергии. Гибридный инвертор (ГИ) предназначен для передачи электрической энергии из цепей постоянного в цепи переменного тока и обратно путём выполнения функций выпрямления и инвертирования тока, с возможностью отдачи излишков энергии в сеть.

Алгоритм мониторинга параметров и управления режимами электроснабжения ФЭС и сети показан на рисунке 3.

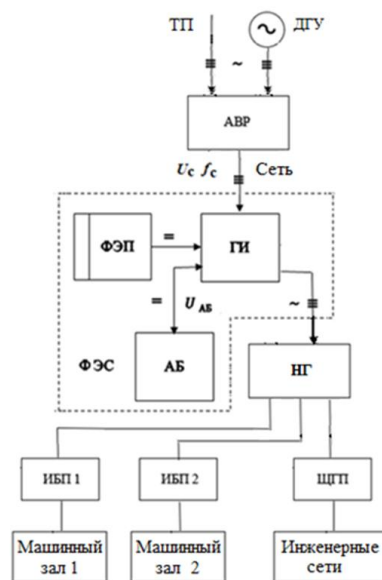


Рис. 2. Функциональная схема электроснабжения нагрузки ЦОД

ТП - Трансформаторная подстанция; ДГУ - Дизельгенераторная установка; АВР - Автоматическое включение резерва; ФЭС - Фотоэлектрическая станция; ФЭП - Фотоэлектрические панели; ГИ - Гибридный инвертор; АБ - Аккумуляторная батарея; НГ - Шины нагрузки; ИБП - Источник бесперебойного питания; ЩГП - Щит гарантированного питания

Fig. 2. Functional diagram of the power supply to the DPC

TP - Transformer substation; DGU - Diesel generator set; AVR - Automatic switching on of the reserve; FES - Photovoltaic station; FEP - Photovoltaic panels; GI - Hybrid inverter; AB - Rechargeable battery; NG - Load buses; UPS - Uninterruptible power supply; SHGP - Shield of guaranteed power supply

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



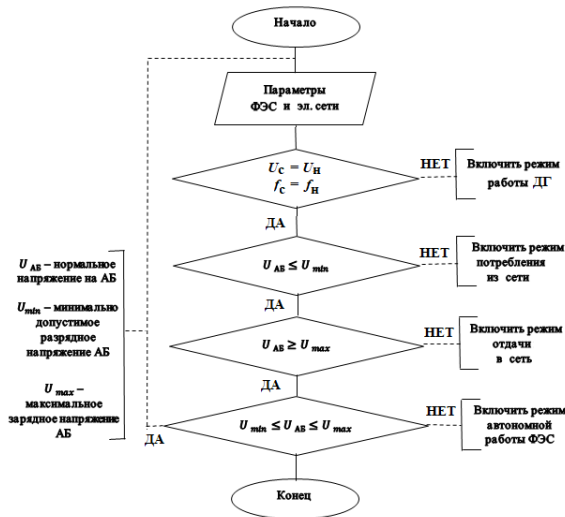


Рис. 3. Алгоритм мониторинга параметров и управления режимами электроснабжения

Fig. 3. An algorithm for monitoring parameters and controlling power supply modes

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

## 2. Математическая модель и метод оценки эффективности

Для анализа и проектирования системы разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, описывающих каждый компонент:

- модель фотоэлектрических панелей основана на модифицированной модели Хоттеля-Вилльера, учитывающей зависимость выходной мощности от интенсивности солнечной радиации и температуры фотоэлементов [5]:

$$P_{pv(t)} = P_{stc} \times \left( \frac{G(t)}{G_{stc}} \right) \times [1 + \gamma \times (T_{cell(t)} - T_{stc})] \times k_{degr} \quad (1)$$

где:  $P_{pv(t)}$  - выходная мощность в момент времени  $t$ , Вт;

$P_{stc}$  - номинальная мощность при стандартных условиях, Вт;

$G(t)$  - интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$G_{stc}$  - стандартная интенсивность радиации (1000 Вт/м<sup>2</sup>);

$\gamma$  - температурный коэффициент мощности, %/°C;

$T_{cell(t)}$  - температура фотоэлемента, °C;

$T_{stc}$  - стандартная температура (25°C);

- модель вакуумного гелиоколлектора использует уравнение эффективности коллектора, учитывающее оптический КПД и коэффициенты тепловых потерь [6, 7]:

$$Q_{th(t)} = A_c \times [\eta_0 \times G(t) - a_1 \times (T_{m(t)} - T_{amb(t)}) - a_2 \times (T_{m(t)} - T_{amb(t)})^2] \quad (2)$$

где:  $Q_{th(t)}$  - полезная тепловая мощность, Вт;

$A_c$  - апертурная площадь коллектора, м<sup>2</sup>;

$\eta_0$  - оптический КПД;

$a_1, a_2$  - коэффициенты тепловых потерь, Вт/(м<sup>2</sup>·°C) и Вт/(м<sup>2</sup>·°C<sup>2</sup>);

$T_{m(t)}$  - средняя температура теплоносителя, °C.

- модели накопителей энергии (электрических и тепловых) построены на уравнениях баланса энергии и учёта потерь.

Емкость аккумуляторной батареи описывается уравнением состояния заряда [7]:

$$SOC_{(t+1)} = SOC_{(t)} + [P_{ch(t)} \times \eta_{ch} - P_{dis(t)} / \eta_{dis}] \times \Delta t / C_{nom} \quad (3)$$

где:  $SOC_{(t)}$  - уровень заряда в момент  $t$ , кВт·ч;

$P_{ch(t)}, P_{dis(t)}$  - мощность заряда и разряда, кВт;

$\eta_{ch}, \eta_{dis}$  - КПД заряда и разряда (0,95);

$C_{nom}$  - номинальная емкость, кВт·ч

Тепловой аккумулятор моделируется уравнением [7]:

$$Q_{stor(t+1)} = Q_{stor(t)} + [Q_{in(t)} - Q_{out(t)} - Q_{loss(t)}] \times \Delta t \quad (4)$$

$$Q_{loss(t)} = U \times A \times (T_{stor(t)} - T_{amb(t)}) \quad (5)$$

- модель абсорбционной холодильной машины описывает холодопроизводительность как функцию подведённого тепла и коэффициента преобразования (COP), который зависит от температурных уровней [8]:

$$Q_{cool(t)} = Q_{heat(t)} \times COP_{ab} \quad (6)$$

$$COP_{ab} = 0,7 \times [1 - 0,005 \times (T_{heat(t)} - 85)] \times [1,015 \times (T_{cool(t)} - 7)]$$

где:  $Q_{cool(t)}$  - холодопроизводительность, кВт;

$Q_{heat(t)}$  - тепловая мощность на входе, кВт;

$COP_{ab}$  - коэффициент преобразования;

$T_{heat(t)}$  - температура теплоносителя на входе, °C;

$T_{cool(t)}$  - температура охлаждаемой среды, °C.

- модель рекуперативной установки на базе теплового насоса: Тепловой насос «воздух-вода», интегрированный в систему вентиляции, работает в непрерывном режиме, рекуперирова тепло вытяжного воздуха. Его полезная тепловая мощность на выходе (нагрев теплоносителя-воды) определяется по базовому уравнению [9]:

$$Q_{hp(t)} = Q_{vent(t)} + P_{el\ hp(t)} \quad (7)$$

где:  $Q_{hp(t)}$  - полезная тепловая мощность на выходе ТН (нагрев теплоносителя), кВт;

$Q_{vent(t)}$  - тепловая мощность, извлекаемая из вытяжного воздуха, кВт;

$P_{el\ hp(t)}$  - электрическая мощность, потребляемая компрессором ТН, кВт;

Электропитание компрессора ТН осуществляется от гибридного источника фотоэлектрической станции и системы аккумулирования электрической энергии (САЭЭ). Логика управления питанием описывается выражением [10]:

$$P_{el\ hp(t)} = \min(P_{hp\ nom}, P_{PV\ avail(t)} + P_{bat\ dis(t)}^{hp}) \quad (8)$$

где:  $P_{hp\ nom}$  - номинальная электрическая мощность компрессора ТН, кВт;

$P_{PV\ avail(t)}$  - электрическая мощность, доступная от ФЭП для питания ТН в момент времени  $t$ , кВт;

$P_{bat\ dis(t)}^{hp}$  - мощность разряда САЭЭ, выделенная для питания ТН, кВт.

- балансные уравнения системы связывают генерацию, потребление, аккумулирование и потери для электрического и теплового контуров.

Электрический баланс [11]:

$$\sum P_{pvi(t)} + P_{grid(t)} = P_{load(t)} + P_{ch(t)} + P_{aux(t)} \quad (9)$$

Тепловой баланс [12]:

$$\sum Q_{th\ j(t)} + Q_{aux(t)} = Q_{heat\ load(t)} + Q_{ab\ input(t)} + Q_{stor\ ch(t)} \quad (10)$$

Для интегральной оценки эффективности такой многопродуктовой системы предложен оригинальный Комплексный коэффициент эффективности тригенерационной системы (КЭТС). Его научная новизна заключается в способности количественно объединять в единый показатель разнородные составляющие:

$$КЭТС = \alpha \cdot \left( \frac{E_{собств}}{E_{потр}} \right) + \beta \cdot \left( \frac{Q_{полез}}{Q_{общ}} \right) + \gamma \cdot \left( \frac{C_{выраб}}{C_{потр}} \right) + \delta \cdot \left( 1 - \left| \frac{G_{изб}}{G_{общ}} \right| \right) \quad (11)$$

где:  $\frac{E_{собств}}{E_{потр}}$  - коэффициент автономности по электроэнергии;

$\frac{Q_{полез}}{Q_{общ}}$  - коэффициент полезного использования тепловой энергии;

$\frac{C_{выраб}}{C_{потр}}$  - коэффициент покрытия холодильной нагрузки;

$\frac{G_{изб}}{G_{общ}}$  - относительная величина избыточной генерации;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  - весовые коэффициенты, определяемые методом анализа иерархий.

### 3. Объект и условия моделирования

Моделирование выполнено для автономного объекта — сегмента центра обработки данных площадью 30 м<sup>2</sup>, расположенного в климатических условиях Крыма. Регион характеризуется высоким среднегодовым уровнем солнечной инсоляции (1400–1500 кВт·ч/м<sup>2</sup>) и выраженной сезонной динамикой температур [13]. Рассматривались два варианта объекта: базовый (без дополнительной термоизоляции и энергоэффективный (с применением современных теплоизоляционных материалов). Анализ проводился на основе почасовых и месячных данных о солнечной радиации, температуре воздуха и графиках энергопотребления объекта.

#### Анализ эффективности и технико-экономическое обоснование

##### 1. Анализ энергетического баланса и сезонного дисбаланса

Исследование раздельной работы компонентов (ФЭС и ВГК) выявило фундаментальную проблему, характерную для солнечной энергетики: сезонный дисбаланс между выработкой и потреблением [14].

Летний период (май–сентябрь): Выработка электроэнергии ФЭС и тепла ВГК максимальна. Однако потребность в тепле для отопления минимальна, что приводит к образованию значительного избытка тепловой энергии (до 35% от общей выработки), который в раздельной схеме без АБХМ теряется. При этом электрическая нагрузка из-за работы систем охлаждения остаётся высокой.

Зимний период (ноябрь–февраль): Потребность в тепле для отопления достигает пика (до 90% от общего энергопотребления), а выработка как электричества, так и тепла от ВИЭ минимальна из-за низкой инсоляции, что приводит к дефициту энергии.

## 2. Преимущества тригенерационной схемы

Внедрение контура АБХМ позволило преодолеть этот дисбаланс, трансформируя летний избыток тепла в полезный продукт — холод для кондиционирования [15]. Результаты моделирования показали качественный скачок в эффективности:

- утилизация тепла - полезное использование тепловой энергии увеличилось на 35,4%;
- сокращение потерь - потери тепловой энергии снизились на 66,1% (с 12,7 до 4,3 МВт·ч в год);
- генерация холода - обеспечена выработка 8,2 МВт·ч холода в год, что покрывает 85–90% летней нагрузки на кондиционирование и позволяет заместить энергоёмкие компрессионные чиллеры;
- рост использования ВИЭ - годовой коэффициент использования потенциала возобновляемых источников вырос с 58,3% до 78,9%;
- повышение автономности - энергетическая автономность объекта (доля потребности, покрываемая собственной генерацией) возросла с 68% до 89%. Количество полностью автономных суток в году увеличилось со 215 до 298.

## 3. Определение оптимальной конфигурации

Проведён сравнительный анализ семи вариантов компоновки системы при фиксированном общем количестве модулей (60 шт.) для сопоставимости капитальных затрат. Были рассмотрены автономные объекты как с термоизоляцией, так и без термоизоляций.

Наилучший годовой энергобаланс и максимальное значение КЭТС были достигнуты при конфигурации 40 фотоэлектрических панелей и 20 вакуумных гелиоколлекторов, дополненных одной АБХМ (см. рисунок 4, 5).

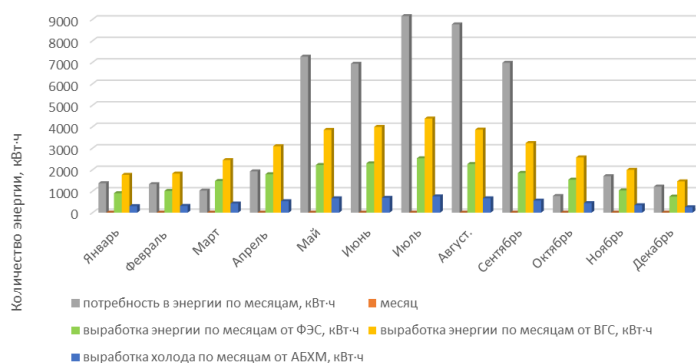


Рис. 4. График показателей электропотребления и выработки энергии от тригенерационного комплекса для объекта без термоизоляции

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

Fig. 4. Graph of indicators of electricity consumption and energy generation from a trigeneration complex for an object without thermal insulation

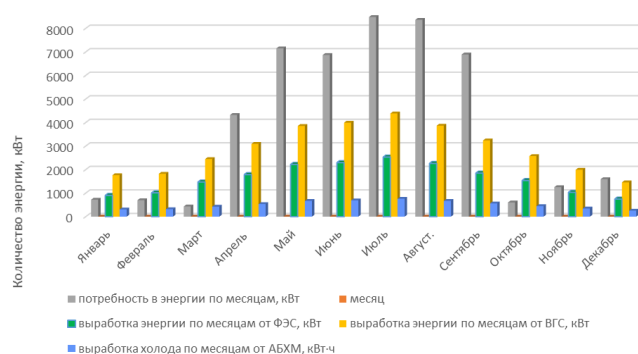


Рис. 5. График показателей электропотребления и выработки энергии от тригенерационного комплекса для объекта с термоизоляцией

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

Fig. 5. Graph of indicators of electricity consumption and energy generation from a trigeneration complex for an object with thermal insulation

Вариант с термоизоляцией автономного объекта обеспечивает:

- достаточную выработку электроэнергии для покрытия базовой и летней пиковой нагрузки;
- эффективное использование тепла зимой для отопления и ГВС, а летом — для привода АБХМ;
- сбалансированное использование солнечного ресурса в течение всего года.

#### 4. Техничко-экономическое обоснование аванпроекта тригенерации

На основе оптимальной конфигурации выполнен расчёт ключевых технико-экономических показателей [16]:

- прямые капитальные вложения

$$K_{\text{прямые}} = K_{\text{оборуд}} + K_{\text{монтаж}} + K_{\text{пусконал}} \quad (10)$$

- косвенные капитальные затраты

$$K_{\text{косвен}} = K_{\text{проект}} + K_{\text{обуч}} + K_{\text{резерв}} \quad (11)$$

- общие капитальные вложения

$$K_{\text{общ}} = K_{\text{прямые}} + K_{\text{косвен}} \quad (12)$$

- годовые эксплуатационные затраты:

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{амортиз}} + C_{\text{обслужив}} + C_{\text{ремонт}} + C_{\text{проч}} \quad (13)$$

- срок окупаемости:

$$PP = K_{\text{общ}} / (\Delta_{\text{год}} + A) \quad (14)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу.

Таблица  
Table

Ключевые технико-экономические показатели тригенерационной системы энергоснабжения ЦОД

*Key technical and economic indicators of the trigeneration power supply system of the DPC*

| Показатель                           | Значения, (руб.) |
|--------------------------------------|------------------|
| Прямые капитальные вложения          | 2 771 080        |
| Косвенные капитальные затраты        | 450 000          |
| Общие капитальные вложения           | 3 221 080        |
| Годовые эксплуатационные затраты     | 198 441          |
| Годовая экономия на энергоносителях: |                  |
| - электроэнергия                     | 337 288          |
| - тепловая энергия                   | 259 392          |
| - холод                              | 21 864           |
| Срок окупаемости                     | 4,27 года        |

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

- Капитальные затраты (CAPEX) составили 3,22 млн руб., включая стоимость оборудования, монтаж, пусконаладку, проектирование и резервный фонд.

- Эксплуатационные расходы (OPEX) оцениваются в ~198 тыс. руб. в год (обслуживание, ремонт, амортизация).

- Годовой экономический эффект сформирован за счёт замещения покупки электроэнергии, выработка тепла и холода и составляет ~618,5 тыс. руб. в год.

- Показатели эффективности: срок окупаемости (PP) - 4,27 года; внутренняя норма доходности (IRR) ~18,5%, что существенно превышает средневзвешенную стоимость капитала и свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности; стоимость комплексной энергии: ~5,2 руб./кВт·ч, что на 15–25% ниже действующих сетевых тарифов для автономных потребителей в регионе.

Анализ чувствительности инвестиционного проекта показал, что проект наиболее уязвим к снижению тарифов на энергоносители и росту первоначальных капитальных затрат. Однако даже при негативных сценариях (например, снижение тарифов на 10%) проект сохраняет положительную чистую приведённую стоимость (NPV>0). Государственные меры поддержки (субсидии, льготные кредиты, «зелёные» тарифы) способны сократить срок окупаемости на 15–20% и значительно повысить экономическую привлекательность.

Внедрение тригенерации дает комплекс преимуществ:

- повышение общей энергоэффективности;

- снижение эксплуатационных затрат (замена дорогой сетевой электроэнергии на более дешёвую);
- повышение надёжности и автономности (обеспечение независимого источника электроэнергии и холода, что критически важно для ВК);
- снижение нагрузки на электрические сети (разгрузка распределительных сетей, особенно в условиях высокой концентрации ВК);

Экологические преимущества (снижение выбросов CO<sub>2</sub> за счёт высокой эффективности и возможности использования возобновляемого топлива (биогаз)) [17].

Несмотря на преимущества, существуют барьеры для внедрения [18]:

- высокие капитальные затраты (стоимость тригенерационной установки значительно выше, чем традиционных систем);
- зависимость от экономики (рентабельность сильно зависит от соотношения цен на природный газ и электроэнергию);
- требования к тепловой нагрузке (эффективность системы требует постоянной и достаточно высокой тепловой нагрузки для работы АБХМ, что оптимально для крупных и средних ВК);
- сложность управления (необходимость внедрения систем автоматизированного управления для оптимизации режимов работы в условиях меняющейся нагрузки).

#### **Заключение (Conclusions)**

Концепция развития электроэнергетики России, рассмотренная через призму теории энергетических укладов, демонстрирует, что отечественный топливно-энергетический комплекс находится в состоянии сложного межукладного перехода. С одной стороны, сохраняется доминирование устоявшегося углеводородного уклада, основанного на централизованной генерации на ископаемом топливе и масштабных сетевых инфраструктурах. С другой стороны, формируются контуры нового экологического уклада, характеризующегося декарбонизацией, цифровизацией, распределённой генерацией, активной ролью потребителя и интеграцией новых видов нагрузки [19]. Системы тригенерации представляют собой технологически зрелое и экономически обоснованное решение для повышения энергоэффективности и устойчивости современных вычислительных комплексов. Ключевым фактором успеха является тщательное предпроектное моделирование нагрузок и разработка оптимальной схемы интеграции с учётом климатических условий и локальных цен на энергоносители [20, 21].

Проведённое исследование показывает, что применение солнечных тригенерационных систем энергоснабжения для автономных объектов, таких как вычислительные комплексы является технически осуществимым, энергетически эффективным и экономически целесообразным решением, особенно для регионов с высоким уровнем солнечной инсоляции, таких как Крым, Краснодарский край и другие южные территории России.

Интеграция ФЭП, ВГК и АБХМ в единую систему управления позволяет преодолеть ключевой недостаток солнечной энергетики — сезонный дисбаланс — и достичь высокой степени энергетической автономности объекта. Тригенерационная схема обеспечивает рост общего КПД использования солнечного ресурса за счёт утилизации избыточного тепла для производства холода [22], сокращая потери на 66,1%. При сроке окупаемости около 4,3 года и внутренней норме доходности (IRR) ~18,5% аванпроект демонстрирует высокую инвестиционную привлекательность.

Разработанная методика, включающая авторскую комплексную модель тригенерации и Комплексный коэффициент эффективности тригенерационной системы, позволяет проводить оценку целесообразности внедрения подобных систем в других климатических зонах, обосновывая дифференцированный подход в зависимости от местного солнечного потенциала и тарифной политики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием интеллектуальных систем управления на основе искусственного интеллекта для прогнозирования нагрузок и оптимизации режимов в реальном времени, интеграцией дополнительных ВИЭ в тригенерационные схемы, а также углублённым анализом жизненного цикла системы и экологического эффекта от её массового внедрения.

Применение подобных автономных и гибридных тригенерационных систем способствует повышению надёжности и устойчивости критически важной ИТ-инфраструктуры, снижению нагрузки на региональные энергосети и выполнению стратегических задач по переходу к низкоуглеродной и ресурсоэффективной энергетике.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку

интеллектуальных систем управления гибридными энергокомплексами, включающими тригенерацию, возобновляемые источники и системы аккумулирования энергии, для создания полностью автономных «зеленых» дата-центров.

### Литература

1. Тыбинь А. Будущее дата-центров: рост энергопотребления и вызовы для отрасли // *Коммерсантъ: электрон. газ.* — 2024. — 15 июля.
2. Smith J. R. Sustainable Cooling Solutions for Data Centres / J. R. Smith, L. M. Brown // *Energy Efficiency Journal.* — 2021. — Vol. 14, No. 5. — P. 412–425.
3. Какушина Е. Г. Комплексный анализ региональных энергосистем с применением систем тригенерации и возобновляемых источников энергии / Е. Г. Какушина, Н. М. Шайтор, Б. А. Якимович // *Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей.* — Нижний Новгород, 2025. — С. 271–282.
4. Литовка М. А. Тригенерация. Принцип работы и условия применения / М. А. Литовка // *Технические и математические науки. Студенческий научный форум: сборник статей по материалам XLVI студенческой международной научно-практической конференции.* — Москва, 2022. — С. 30–32.
5. Ильичев В.Ю., Кусачева С.А., Лыков И.Н. Исследование характеристик фотоэлектрических солнечных панелей // *Экология урбанизированных территорий.* 2022. № 2. С. 34–39. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-34-39.
6. Бекиров Э. А., Велияев С. М. Определение эффективности работы солнечного коллектора // *Агротехника и энергообеспечение.* — 2021. — № 4 (33). — С. 8–15.
7. Галузин Т. А., Джамалов Н. К. Обзор методов определения ёмкости и уровня заряда аккумуляторов // *Проблемы науки.* — 2020. — № 4 (52). — С. 21–24.
8. Кадочникова А. С., Чигирев А. В. Расчёт абсорбционной холодильной машины // *XIV Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных «Россия молодая».* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва, 2022. С. 021208.1–021208.3
9. Мереуца Е. В., Сухих А. А. Анализ энергетической эффективности включения теплонасосной установки и солнечных коллекторов в состав абсорбционных холодильных машин в системах централизованного кондиционирования // *Вестник Международной академии холода.* — 2017. — №2. — С. 43–49.
10. Вишневский Е. П. Рекуперация тепловой энергии в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // *С. О. К.* — 2004. — №11. — С. 90–101.
11. Соснина Е. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А., Кечкин А. Ю., Ворошилов А. А. Повышение эффективности децентрализованных систем электроснабжения // *Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева.* 2018. №3 (122). С. 81–91.
12. Юсупов Р.Д., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О., Базукова Э.Р. «Применение солнечной энергии для нужд горячего водоснабжения в городе Казань» // *Вестник Казанского государственного энергетического университета.* 2022. Т. 14. № 2 (54). С. 48–58.
13. Якимович Б. А. Перспективы развития распределённой энергетики в условиях полуострова Крым / Б. А. Якимович, Е. Г. Малюк, Е. Г. Какушина // *Энергетические установки и технологии.* — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 91–98.
14. Какушина Е. Г. Системы тригенерации юных регионов России с использованием возобновляемых источников энергии / Е. Г. Какушина, Б. А. Якимович, Н. М. Шайтор // *Электроника, фотоника и киберфизические системы.* — 2025. — Т. 5, № S3. — С. 66–82.
15. Какушина Е. Г. Инновационные методы генерирования и преобразования энергии / Е. Г. Какушина // *Энергетические установки и технологии.* — 2023. — Т. 9, № 3. — С. 54–57.
16. Нуралиев С. У., Маилян Д. А. Экономика и финансы энергетики: учебник для вузов / С. У. Нуралиев, Д. А. Маилян. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 424 с.
17. Ефремова С. А. Внедрение тригенерационных установок как способ повышения эффективности энергосистем / С. А. Ефремова, А. Н. Зацепина // *Молодой учёный.* — 2021. — № 20 (362). — С. 80–83.
18. Маларев В. И. Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии / В. И. Маларев, И. А. Богданов, А. В. Турышева // *Промышленная энергетика.* — 2020. — № 3. — С. 21–27.

19. Волков Э. П. Перспективы развития и модернизация электроэнергетики России / Э. П. Волков, А. Н. Шишкин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 4. – С. 3–17
20. Панцырная Т. В., Парабин В. А., Дьяков А. В. «Тригенерация как способ повышения энергетической эффективности» // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2013. №6. С. 82–87.
21. Томаров Г. В. Использование критериально-параметрического подхода при выборе оборудования когенерационных установок в инвестиционных энергетических проектах / Г. В. Томаров, А. А. Шипков, В. А. Буданов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2 (58). – С. 13–16.
22. Пехова Е. А. Концепция развития электроэнергетики России на основе теории энергетических укладов / Е. А. Пехова, Е. В. Сухарева // Вопросы экономики и права. – 2024. – № 3 (189). – С. 72–76.

#### Авторы публикации

**Какушина Елена Геннадьевна** – старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-9243-6490>. Email: [litte@mail.ru](mailto:litte@mail.ru).

**Якимович Борис Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-7363-1071>. Email: [bayakimovich@sevsu.ru](mailto:bayakimovich@sevsu.ru).

**Шайтор Николай Михайлович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0004-1968-7807>. Email: [n.m.shaitor@sevsu.ru](mailto:n.m.shaitor@sevsu.ru).

#### References

1. Tybin A. The future of data centers: growth of energy consumption and challenges for the industry // Kommersant: electron. gaz. — 2024. — July 15th.
2. Smith J. R. Sustainable Cooling Solutions for Data Centres / J. R. Smith, L. M. Brown // Energy Efficiency Journal. — 2021. — Vol. 14, No. 5. — P. 412-425.
3. Kakushina E. G. Comprehensive analysis of regional energy systems using trigeneration systems and renewable energy sources / E. G. Kakushina, N. M. Shaitor, B. A. Yakimovich // Actual problems of the electric power industry: a collection of scientific and technical articles. Nizhny Novgorod, 2025. pp. 271-282.
4. Litovka M. A. Trigeneneration. The principle of operation and conditions of use / M. A. Litovka // Technical and mathematical sciences. Student Scientific Forum: a collection of articles based on the materials of the XLVI Student International Scientific and practical conference. — Moscow, 2022. pp. 30-32.
5. Ilyichev V. Yu., Kusacheva S. A., Lykov I. N. Investigation of the characteristics of photovoltaic solar panels // Ecology of urbanized territories. 2022. No. 2. pp. 34-39. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-34-39.
6. Bekirov E. A., Velilyaev S. M. Determination of the efficiency of a solar collector // Agrotechnics and energy supply. — 2021. — No. 4 (33). — pp. 8-15.
7. Galuzin T. A., Jamalov N. K. Overview of methods for determining battery capacity and charge level // Problems of science. — 2020. — No. 4 (52). pp. 21-24.
8. Kadochnikova A. S., Chigirev A. V. Calculation of an absorption refrigerating machine // XIV All-Russian Scientific and practical Conference of young scientists "Young Russia". Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, 2022. pp. 021208.1–021208.3
9. Mereutsa E. V., Sukhov A. A. Analysis of the energy efficiency of including a heat pump unit and solar collectors in absorption refrigerating machines in centralized air conditioning systems // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. - 2017. — No. 2. — pp. 43-49.
10. Vishnevsky E. P. Heat energy recovery in ventilation and air conditioning systems // S. O. K. — 2004. — No. 11. — pp. 90-101.
11. Sosnina E. N., Shalukho A. V., Lipuzhin I. A., Kechkin A. Yu., Voroshilov A. A. Improving the efficiency of decentralized power supply systems // Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev. 2018. No. 3 (122). pp. 81-91.

12. Yusupov R.D., Ziganshin Sh.G., Politova T.O., Bazukova E.R. "Application of solar energy for the needs of hot water supply in the city of Kazan" // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14. No. 2 (54). pp. 48-58.
13. Yakimovich B. A. Prospects for the development of distributed energy in the conditions of the Crimean Peninsula / B. A. Yakimovich, E. G. Malyuk, E. G. Kakushina // Energy installations and technologies. — 2023. — Vol. 9, No. 1. — pp. 91-98.
14. Kakushina E. G. Trigeneration systems of young regions of Russia using renewable energy sources / E. G. Kakushina, B. A. Yakimovich, N. M. Shaitor // Electronics, photonics, and cyberphysical systems. — 2025. — Vol. 5, No. S3. — pp. 66-82.
15. Kakushina E. G. Innovative methods of energy generation and conversion / E. G. Kakushina // Energy installations and technologies. — 2023. — Vol. 9, No. 3. — pp. 54-57.
16. Nuraliev S. U., Mailyan D. A. Economics and Finance of energy: a textbook for universities / S. U. Nuraliev, D. A. Mailyan. Moscow: MEI Publishing House, 2015. 424 p.
17. Efremova S. A. Introduction of trigeneration plants as a way to increase the efficiency of power systems / S. A. Efremova, A. N. Zatsepina // Young Scientist. — 2021. — № 20 (362). — Pp. 80-83.
18. Malarev V. I. Trigeneration system as a means of increasing the efficiency of binary complexes for the production of electric and thermal energy / V. I. Malarev, I. A. Bogdanov, A.V. Turyshcheva // Industrial Power engineering. 2020. No. 3. pp. 21-27.
19. Volkov E. P. Prospects for the development and modernization of the Russian electric power industry / E. P. Volkov, A. N. Shishkin // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. - 2012. - No. 4. - pp. 3-17
20. Pansyrnaya T. V., Parabin V. A., Dyakov A.V. "Trigeneration as a way to increase energy efficiency" // Strategic decisions and risk management. 2013. No. 6. pp. 82-87.
21. Tomarov G. V. The use of a criterion-parametric approach when choosing equipment for cogeneration plants in investment energy projects / G. V. Tomarov, A. A. Shipkov, V. A. Budanov // Energy saving and water treatment. – 2009. – № 2 (58). – Pp. 13-16.
22. Pekhova E. A. Concept of development of the Russian electric power industry based on the theory of energy patterns / E. A. Pekhova, E. V. Sukhareva // Issues of economics and law. – 2024. – № 3 (189). – Pp. 72-76.

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

**Elena G. Kakushina** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-9243-6490>. Email: [litte@mail.ru](mailto:litte@mail.ru).

**Boris A. Yakimovich** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-7363-1071>. Email: [bayakimovich@sevsu.ru](mailto:bayakimovich@sevsu.ru).

**Nikolay M. Shaito** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0004-1968-7807>. Email: [n.m.shaitor@sevsu.ru](mailto:n.m.shaitor@sevsu.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **29.01.2026 г.**

**Отредактировано** **14.04.2026 г.**

**Принято** **26.05.2026 г.**



# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 622.691.4.052.012 + 004.94

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-164-177

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Захаров <sup>1</sup>А.С., Аетов <sup>1</sup>А.У., Салыхов <sup>2</sup>Р.Х., Гильмутдинов <sup>1</sup>И.М.

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Россия

<sup>2</sup>ООО «Газпром трансгаз Казань», г. Казань, Россия  
alexanderzaharo@yandex.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена необходимостью снижения высоких энергозатрат на перекачку природного газа по магистральным газопроводам, значительная часть которых связана с преодолением гидравлического сопротивления в технологическом оборудовании компрессорных станций (КС), в частности, в установках охлаждения газа (УОГ). ЦЕЛЬ. Провести моделирование и оценку эффективности энергосберегающего технологического решения - обхода УОГ по байпасной линии - для снижения потребления топливного газа на привод газоперекачивающего агрегата. МЕТОДЫ. Моделирование технологического потока природного газа на типовой компрессорной станции выполнено в программном комплексе для моделирования технологических процессов. В основу модели легли реальные режимные параметры и компонентный состав газа, предоставленные ООО «Газпром трансгаз Казань». Для термодинамических расчётов использовано уравнение состояния Пенга-Робинсона. Сравнивались две технологические схемы: базовая (с прохождением газа через УОГ) и альтернативная (с байпасированием УОГ). РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты моделирования показали, что байпасирование УОГ при заданных температурных условиях позволяет снизить требуемое давление на выходе компрессора на 19 кПа. Это приводит к снижению требуемой мощности на привод компрессора с 11,93 МВт до 11,80 МВт. Соответственно, массовый расход топливного газа снижается примерно на 0,00266 кг/с, что эквивалентно экономии около 230 кг (или ~323 м<sup>3</sup>) топливного газа в сутки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано, что даже небольшое снижение энергопотребления за счёт оптимизации гидравлического режима может давать заметный экономический эффект при длительной работе КС. Практическая реализация решения требует разработки регламентов эксплуатации с учётом допустимых диапазонов температур и расходов газа, а также возможной модернизации запорной арматуры и средств автоматизации.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод; компрессорная станция; энергосбережение; гидравлическое сопротивление; моделирование; байпасная линия; топливный газ.

**Для цитирования:** Захаров А.С., Аетов А.У., Салыхов Р.Х., Гильмутдинов И.М. Моделирование энергосберегающего режима работы компрессорной станции магистрального газопровода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 164-177. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-164-177.

## MODELING OF ENERGY-SAVING OPERATING MODE OF A COMPRESSOR STATION OF A MAIN GAS PIPELINE

Zakharov <sup>1</sup>A.S., Aetov <sup>1</sup>A.U., Salyakhov <sup>2</sup>R.Kh., Gilmutdinov <sup>1</sup>I.M.

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Gazprom Transgaz Kazan LLC, Kazan, Russia  
alexanderzaharo@yandex.ru

**Abstract:** RELEVANCE of the study is determined by the need to reduce the high energy costs of pumping natural gas through main gas pipelines, a significant portion of which is associated with overcoming hydraulic resistance in the process equipment of compressor stations (CS), in particular, in gas cooling units. PURPOSE. To model and evaluate the efficiency of an energy-saving technological solution - bypassing the gas cooling units using a bypass line - in order to reduce fuel gas consumption to drive the gas pumping unit. METHODS. The process flow of natural gas at a typical compressor station was simulated using a software package for modeling technological processes. The model is based on the actual operating parameters and component composition of the gas provided by Gazprom Transgaz Kazan LLC. The Peng-Robinson equation of state was used for thermodynamic calculations. Two process flow diagrams were compared: the basic one (with gas passing through the GCU) and the alternative one (with gas cooling units bypassing). RESULTS. The simulation results showed that bypassing the gas cooling units under given temperature conditions reduces the required compressor outlet pressure by 19 kPa. This leads to a reduction in the required compressor drive power from 11.93 MW to 11.80 MW. Accordingly, the fuel gas mass flow rate decreases by approximately 0.00266 kg/s, which is equivalent to a savings of approximately 230 kg (or  $\sim 323 \text{ m}^3$ ) of fuel gas per day. CONCLUSION. It has been shown that even a small reduction in energy consumption due to hydraulic optimization can yield a significant economic benefit during long-term compressor station operation. Practical implementation of this solution requires the development of operating regulations taking into account permissible temperature ranges and gas flow rates, as well as the possible modernization of shut-off valves and automation equipment.

**Keywords:** main gas pipeline; compressor station; energy saving; hydraulic resistance; modeling; bypass line; fuel gas.

**For citation:** Zakharov A.S., Aetov A.U., Salyakhov R.Kh., Gilmutdinov I.M. Modeling of energy-saving operating mode of a compressor station of a main gas pipeline. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 164-177. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-164-177.

### **Введение (Introduction)**

На компрессорных станциях для охлаждения технологического газа применяют установку охлаждения газа (УОГ), которая, как правило, состоит из нескольких аппаратов воздушного охлаждения газа (АВОг) [1]. Охлаждение газа после сжатия в компрессоре необходимо для увеличения пропускной способности магистрального газопровода и для предотвращения прогрева грунта в районах вечной мерзлоты [2]. Для перекачки значительных объёмов газа необходимо затрачивать большое количество энергии, которая частично теряется на преодоление сил трения в газопровode и в виде теплопередачи окружающей среде [3]. В контексте растущих требований к энергоэффективности и экологической устойчивости газотранспортной системы, минимизация этих потерь становится ключевой научно-технической задачей. Одно из перспективных решений по снижению материальных и энергетических затрат – оптимизация пути движения газа за счёт уменьшения гидравлического сопротивления. В частности, предлагается при определённых режимных параметрах пропускать газ, минуя УОГ, обладающую значительным гидравлическим сопротивлением. Данная мера особенно актуальна при определённых погодных условиях, когда УОГ, предназначенная для охлаждения, может фактически выполнять роль нагревателя потока. В таком случае прямой отвод тепла в грунт по магистральному газопроводу может оказаться эффективнее, чем принудительный теплообмен с воздухом в АВОг [1]. В данной статье представлено моделирование и расчёт данного технологического решения на основе реальных данных, полученных в ООО «Газпром трансгаз Казань», с использованием программного комплекса для моделирования технологических процессов. Это исследование направлено на количественную оценку потенциала энергосбережения при внедрении адаптивного, интеллектуального управления работой компрессорной станции, которое учитывает как текущие технологические параметры (давление, температура, расход), так и переменные внешние условия.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Моделирование технологических процессов в газовой отрасли давно и прочно опирается на методы компьютерного инжиниринга, позволяющие с высокой точностью

прогнозировать поведение сложных систем. Ведущую роль в этом играет программное обеспечение для стационарного и динамического моделирования, которое базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, а также на современных уравнениях состояния, адекватно описывающих поведение реальных газовых смесей в широком диапазоне давлений и температур [1, 5]. Использование, например, уравнения Пенга-Робинсона позволяет корректно работать со сверхкритическими состояниями природного газа, характерными для магистрального транспорта [1, 6]. Применение подобных инструментов для анализа работы компрессорной станции демонстрирует, что даже локальная оптимизация, направленная на снижение гидравлических потерь, может давать значительный экономический эффект. Так, моделирование обхода установки охлаждения газа через байпасную линию показало, что уменьшение перепада давления на 19 кПа способно привести к экономии топливного газа на привод компрессора, которая в суточном исчислении составляет около 323 м<sup>3</sup>, несмотря на кажущуюся незначительность секундного расхода [1]. Этот пример иллюстрирует важность детального учета гидравлики каждого узла КС при поиске резервов энергосбережения. Однако эффективность работы системы в целом определяется не только конфигурацией оборудования, но и свойствами самого транспортируемого вещества. Многочисленные исследования посвящены влиянию состава природного газа на его транспортные характеристики. Показано, что наличие неуглеводородных примесей, таких как азот, диоксид углерода или сероводород, существенно изменяет критические параметры смеси, ее плотность и вязкость, что напрямую сказывается на потерях давления в трубопроводах [2, 7]. Например, увеличение содержания азота до 10% может привести к росту перепада давления более чем на 8% по сравнению с эталонной смесью [2]. Эти данные подчеркивают необходимость учета реального, а не усредненного состава газа при проектировании и оптимизации режимов работы КС, так как колебания состава могут нивелировать ожидаемый эффект от организационных мероприятий.

Параллельно с анализом стационарных режимов активно развивается направление динамического моделирования газотранспортных систем, без которого невозможно исследование реакции сети на изменение потребления, плановые переключения или аварийные ситуации. Традиционные методы, решающие системы дифференциальных уравнений в частных производных, являются вычислительно затратными, особенно для крупных сетей [3, 8]. Это стимулирует поиск альтернативных подходов. Одним из перспективных направлений является использование методов машинного обучения для создания быстрых и точных моделей-заменителей. В частности, предлагается применять авторегрессионные нейронные сети с внешним входом, которые обучаются на данных, полученных от детальных моделей, а затем способны с высокой скоростью имитировать динамическое поведение отдельных трубопроводов и целых сетей [3]. Такие модели открывают возможности для оперативного прогнозирования и оптимизации в реальном времени. Динамические аспекты также тесно связаны с вопросами безопасности и надежности. Исследуется влияние периодических колебаний потребления на формирование волн давления в сети, которые создают циклическую нагрузку на материал трубопровода [4, 9]. Особый интерес в контексте энергоперехода представляет моделирование транспортировки водородосодержащих смесей по существующей газотранспортной инфраструктуре. Работы показывают, что добавление водорода изменяет физические свойства потока и может приводить к увеличению амплитуды колебаний давления в переходных режимах, что требует оценки дополнительных механических нагрузок и потенциальных рисков, связанных с водородным охрупчиванием [4, 10]. Это направление исследований становится все более востребованным в свете планов по декарбонизации энергетики.

Наряду с оптимизацией непосредственно транспорта газа, значительный потенциал энергосбережения и повышения рентабельности заложен в совершенствовании смежных технологических процессов на объектах газовой инфраструктуры. Ярким примером является малотоннажное сжижение природного газа, где актуальна задача предварительного извлечения тяжелых углеводородов. Проведенные исследования демонстрируют, что выделение пропан-бутановой фракции на газораспределительной станции перед сжижением не только повышает качество получаемого сжиженного природного газа, но и создает дополнительный коммерческий продукт, улучшая экономику всего проекта [5, 11]. Этот подход отражает общую тенденцию к комплексной оптимизации технологических цепочек, когда повышение эффективности одного процесса достигается за счет синергии с другим. Отдельного

внимания заслуживают вопросы, связанные с влиянием эксплуатационных факторов на эффективность теплообменного оборудования, которое является сердцем как установок охлаждения, так и сжижения. Обнаружено, что тип и свойства турбинного масла, используемого в детандер-компрессорных агрегатах, могут негативно влиять на работу криогенных теплообменников из-за конденсации и полимеризации его паров на стенках трубок, что приводит к росту гидравлического сопротивления и снижению холодопроизводительности [5]. Подобные практические наблюдения, полученные на действующих объектах, крайне ценны для верификации и корректировки расчетных моделей, делая их более адекватными реальности.

Анализ современной научной литературы свидетельствует о многоаспектности проблемы энергосбережения на компрессорных станциях. Существующие исследования охватывают широкий спектр вопросов: от фундаментального моделирования термодинамических и гидравлических процессов с помощью профессионального ПО [1, 6, 12] до анализа влияния переменного состава газа [2, 7, 13] и динамических нагрузок [3, 4, 9]; от оптимизации смежных процессов, таких как сжижение [5, 11, 14], до учета практических эксплуатационных факторов [5, 15]. Однако часто эти направления развиваются изолированно. В частности, задача оперативного выбора энергосберегающего режима работы КС, предусматривающего, например, управляемое байпасирование УОГ на основе комплексного анализа текущих технологических параметров (давление, температура, состав газа), наружных климатических условий и данных о состоянии оборудования, с использованием возможностей доступной расчетной среды, требует более глубокой интеграции перечисленных аспектов. Недостаточно изучен вопрос создания целостной цифровой модели КС, которая служила бы не только для анализа, но и для обоснования конкретных управляющих воздействий в режиме, близком к реальному времени, с четко оцененным экономическим эффектом. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела путем разработки и апробации такой комплексной модели на конкретном примере.

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

Процесс сжатия и охлаждения газа на компрессорной станции был исследован на основе типовой технологической схемы, представленной на рисунке 1 [4].

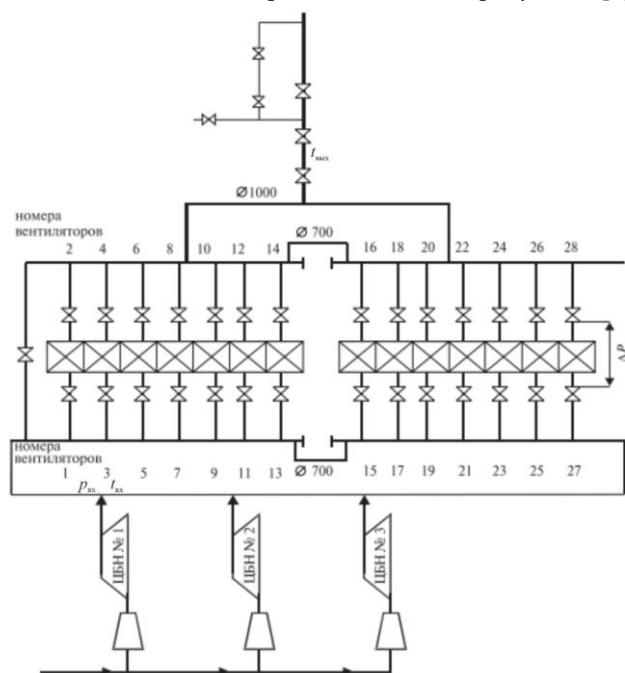


Рис. 1. Технологическая схема сжатия и охлаждения газа на компрессорной станции:

ЦБН № 1, 2, 3 – центробежный нагнетатель с электрическим приводом или ДВС;  $t_{вх}$  – температура газа на входе в УОГ;  $t_{вых}$  – температура газа на выходе из УОГ;  $p_{вх}$  – давление газа на входе в УОГ;  $\Delta p$  – потери давления в АВОГ

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

Fig. 1. Flow chart of gas compression and cooling at a compressor station: CBN No. 1, 2, 3 – centrifugal supercharger with electric drive or internal combustion engine;  $t_{in}$  – gas temperature at the inlet of the gas cooling unit (GCU);  $t_{out}$  – gas temperature at the outlet of the GCU;  $p_{in}$  – gas pressure at the inlet of the GCU;  $\Delta p$  – pressure loss in the GCU

Для проведения численного моделирования данного технологического процесса в программном обеспечении для симуляции и оптимизации технологических процессов была разработана детализированная схема (рисунок 2).

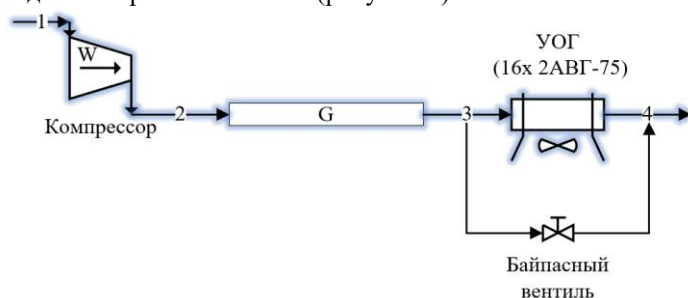


Рис. 2. Моделируемая схема сжатия и охлаждения газа: 1 – вход компрессора; 2 – нагнетательная линия; W – энергия, подводимая к приводу компрессора; G – газопровод, соединяющий компрессорный цех и УОГ; 3 – линия, подводимая к УОГ; УОГ (16x 2АВГ-75) – установка охлаждения газа, состоящая из 16 АВОг типа 2АВГ-75; 4 – линия, отходящая к узлу подключения к магистральному газопроводу

Fig. 2. Simulated gas compression and cooling system: 1 – compressor inlet; 2 – discharge line; W – energy supplied to the compressor drive; G – gas pipeline connecting the compressor shop and the gas cooling units; 3 – line supplied to the gas cooling units; gas cooling units (16x 2AVG-75) – gas cooling unit consisting of 16 AVOg type 2AVG-75; 4 – line branching off to the connection unit to the main gas pipeline

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

**Рабочее тело и термодинамическая модель.** В качестве рабочего тела был принят природный газ со специфическим компонентным составом, соответствующим паспортным данным для исследуемого объекта (см. табл. 1) [5]. Поскольку предварительная оценка, выполненная в программном комплексе для моделирования технологических процессов, показала, что газ при рабочих параметрах находится в сверхкритическом состоянии, для точного расчёта термодинамических свойств был выбран "пакет флюида" на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона. Данный выбор обусловлен его широкой признанностью для моделирования углеводородных систем, особенно в сверхкритической области [1, 6]. Критические параметры моделируемой газовой смеси, рассчитанные программой, приведены в таблице 2.

Таблица 1  
Table 1

Состав природного горючего газа  
The composition of natural combustible gas

| №  | Компонент                     | Мольная доля |
|----|-------------------------------|--------------|
| 1  | Метан                         | 94,32        |
| 2  | Этан                          | 3,37         |
| 3  | Пропан                        | 1,00         |
| 4  | Изо-бутан                     | 0,138        |
| 5  | Норм-бутан                    | 0,139        |
| 6  | Нео-пентан                    | 0,0014       |
| 7  | Изо-пентан                    | 0,0256       |
| 8  | Норм-пентан                   | 0,0184       |
| 9  | Гексаны + высшие углеводороды | 0,0141       |
| 10 | Гелий                         | 0,0103       |
| 11 | Водород                       | 0,0198       |
| 12 | Кислород                      | 0,0054       |
| 13 | Азот                          | 0,618        |
| 14 | Углекислый газ                | 0,322        |

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

Таблица 2  
Table 2

Критические свойства природного газа  
Critical properties of natural gas

| Критический параметр                             | Значение             |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| Температура ( $t_k$ ), °C                        | -69,27               |
| Давление, ( $p_k$ ), кПа                         | 5724                 |
| Удельный объём, ( $v_k$ ), м <sup>3</sup> /кмоль | $9,09 \cdot 10^{-2}$ |
| Фактор сжимаемости, ( $z_k$ )                    | 0,3069               |

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

*Исходные данные и постановка задачи.* В модели были заданы фактические режимные параметры, полученные в ходе инструментального обследования объекта. Данные о давлении и температуре газа в ключевых точках технологической схемы (вход компрессора, нагнетание, вход и выход УОГ) сведены в таблицу 3. Анализ этих данных подтверждает, что при рабочих давлениях (~7 МПа) и температурах (~30–35 °С) поток находится в сверхкритическом состоянии (давление выше критического  $p_k = 5,7$  МПа) [5].

Таблица 3

Table 3

Параметры состояния газа на разных участках КС  
Parameters of the gas condition in different sections of the CS

| Технологический участок | Параметр                       | Значение |
|-------------------------|--------------------------------|----------|
| Вход компрессора        | Давление ( $p_{вс}$ ), кПа     | 5509     |
|                         | Температура ( $t_{вс}$ ), °С   | 12-15*   |
| Нагнетательная линия    | Давление ( $p_{нагн}$ ), кПа   | 7070     |
|                         | Температура ( $t_{нагн}$ ), °С | 33-36*   |
| Вход в УОГ              | Давление ( $p_{вх}$ ), кПа     | 7057     |
|                         | Температура ( $t_{вх}$ ), °С   | 32       |
| Выход из УОГ            | Давление ( $p_{вых}$ ), кПа    | 7038     |
|                         | Температура ( $t_{вых}$ ), °С  | 30,6-33* |

\* – расхождение вызвано разными показателями замеров температуры, а именно меньшее значение – с пульта управления, большее – показания тепловизора.

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

Проведённый анализ выявил, что общие потери давления в системе от нагнетания компрессора до выхода в магистраль составляют 21 кПа, из которых около 20 кПа приходится на УОГ. Таким образом, было сформулировано предположение, что повышение давления, необходимое для компенсации этих потерь, требует дополнительного расхода топливного газа на привод компрессора. Хотя секундные затраты могут казаться незначительными, их масштабирование на продолжительные периоды работы (часы, сутки) потенциально может привести к существенному перерасходу энергоресурсов. Данное наблюдение легло в основу задачи исследования: смоделировать альтернативный режим работы с обходом УОГ через байпасную линию и оценить потенциальную экономию энергии, исключив гидравлическое сопротивление установок охлаждения.

*Моделирование в стационарной постановке.* Расчетная среда формирует и решает систему нелинейных алгебраических уравнений, включающую материальные и энергетические балансы, уравнение состояния (УС) для расчёта свойств реального газа и модели отдельных аппаратов (компрессора, трубопроводов, клапана и аппарата воздушного охлаждения газа). Свойства смеси (плотность, энтальпия, теплоёмкость, коэффициент сжимаемости и др.) вычисляются термодинамическим пакетом на базе выбранного уравнения состояния (в данной работе – уравнение состояния Пенга-Робинсона). Решение системы выполняется итерационными методами с проверкой сходимости по расходам, давлениям и энергетическим невязкам [20].

Теплофизические свойства природного газа рассчитываются по кубическому уравнению состояния Пенга-Робинсона, применяемому для многокомпонентных углеводородных смесей при повышенных давлениях [17, 18]. В общем виде УС записывается:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v^2 + 2bv - b^2}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление, Па,  $T$  – абсолютная температура, К,  $v$  – удельный молярный объём, м<sup>3</sup>/моль,  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К),  $a(T)$  и  $b$  – параметры УС (для смеси используются правила смешения) [17, 18]. На основе решения УС вычисляются коэффициент сжимаемости  $z$ , плотность  $\rho$ , энтальпия  $H$ , энтропия  $S$ , теплоёмкости и др. как функции  $T$  и  $p$ . Это обеспечивает корректный учёт реального газа в диапазоне давлений, характерном для компрессорных станций [18].

Для каждого узла схемы выполняются материальные балансы:

$$\sum \dot{n}_i' - \sum \dot{n}_i'' = 0 \quad (2)$$

и общий энергетический баланс:

$$\sum \dot{m}_i' h' + Q - W = \sum \dot{m}_i'' h'' \quad (3)$$

где  $\dot{n}_i'$  и  $\dot{n}_i''$  – молярный расход  $i$ -го компонента на входе и выходе узла соответственно, моль/с,  $\dot{m}_i'$  и  $\dot{m}_i''$  – массовый расход  $i$ -го компонента на входе и выходе узла соответственно, кг/с,  $h'$  и  $h''$  – удельная энтальпия потока на входе и выходе узла, Дж/кг,  $Q$  – тепловой поток, подводимый к узлу (например, в АВОг), Вт,  $W$  – мощность (компрессор), Вт [23].

Компрессор описывается связью входного и выходного состояний потока ( $p_{вс}, t_{вс}, \dot{m}$ )  $\rightarrow$  ( $p_{нагн}, t_{нагн}, \dot{m}$ ) с учётом эффективности (изоэнтальной или политропной) и реальных свойств [20, 24]. Энергетический баланс компрессора в энтальпийной форме выглядит следующим образом:

$$W = \dot{m} (h'' - h'), \quad (4)$$

а переход к реальному выходному состоянию выполняется через выбранный пакет УС и заданную или рассчитанную эффективность [23, 24].

Трубопроводные участки моделируются как элементы гидравлического сопротивления. Суммарный перепад давления представляется суммой потерь на трение, статического напора и местных сопротивлений:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \quad (5)$$

Для однофазного потока потери на трение в инженерной постановке описываются уравнением Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_1 = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент трения (функция  $Re$  и  $\varepsilon/D$ ),  $L$  – длина, м,  $D$  – внутренний диаметр, м,  $v$  – скорость потока, м/с,  $\rho(T, p)$  – плотность реального газа из уравнения состояния Пенга-Робинсона, кг/м<sup>3</sup>. В расчётном модуле учитываются вклады трения, статического напора, фитингов и иных локальных сопротивлений [21, 25].

Одновременно с уравнениями гидравлики для трубопровода учитывается уравнение энергии для установившегося течения с возможным теплообменом с окружающей средой. Тепловой поток на участке трубопровода выражается через изменение энтальпии потока:

$$Q_{mp} = \dot{m} (h'' - h'), \quad (7)$$

где удельные энтальпии газа на входе и выходе узла вычисляются термодинамическим пакетом на базе уравнения состояния Пенга-Робинсона [18, 23].

В расчётной среде учёт теплопередачи реализуется через задание параметров теплообмена с окружающей средой (температура воздуха, условия теплоотдачи/изоляции), что позволяет учитывать подогрев/охлаждение газа в обвязке помимо АВОг [25].

Байпасный элемент используется как запорная арматура, работающая в двух дискретных состояниях: «закрыт» (байпас отключён) и «открыт» (байпас включён). Поэтому он трактуется не как регулирующий дросселирующий орган, а как элемент, который переключает гидравлическую конфигурацию схемы. В программном комплексе для моделирования технологических процессов это реализуется с заданием перепада давления (или выходного давления) для открытого состояния и исключением потока для закрытого состояния [20, 25].

Для повышения практической достоверности в открытом состоянии учитываются небольшие потери давления на вентиле, обусловленные местным сопротивлением открытого прохода. Тогда перепад давления вдоль байпасной ветви:

$$\Delta p_{бп} = \Delta p_{мс} + \Delta p'_в \quad (8)$$

где  $\Delta p_{мс}$  – потери в трубопроводе байпаса (трение + местные сопротивления), Па,  $\Delta p'_в$  – потери на открытом вентиле, Па.

АВОг моделируется как теплообменный аппарат, для которого тепловая нагрузка определяется энергетическим балансом потока:

$$\dot{m} (h'' - h') = Q_{АВОг} \quad (9)$$

а теплопередача описывается через среднелогарифмический температурный напор:

$$kF \Delta T_{л} = Q_{АВОг} \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $F$  – поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>,  $\Delta T_{л}$  – среднелогарифмический температурный напор между горячим (газ) и холодным (воздух) теплоносителями, К. Потери давления на стороне газа учитываются заданием  $\Delta p$  либо параметрами аппарата [22].

Для оценки влияния байпасной линии выполняются два стационарных сценария:

- сценарий I (байпас закрыт) – газ проходит через УОГ; определяются  $t_{\text{вых}}$ , суммарные  $\Delta p$  по тракту (включая АВОГ и обвязку), а также мощность компрессора;

- сценарий II (байпас открыт) – газ обходит УОГ; в открытом состоянии дополнительно учитывается малый перепад давления на запорном вентиле  $\Delta p_{\text{оп}} \leq 5$  кПа, а также потери давления в трубопроводе байпасной линии [20, 25]. Это позволяет оценить снижение гидравлических потерь и влияние на мощность компрессора при исключении работы УОГ, когда она может греть газ.

Таким образом, для предотвращения нагревания газа вводится температурный критерий на основе разности:

$$\Delta t = t_{\text{вкл}} - t_{\text{вкл}} \quad (11)$$

Без зоны нечувствительности условие открытия байпаса:  $\Delta t \geq 0$ , однако вблизи границы  $\Delta t \approx 0$  возможны частые переключения («дребезг») из-за погрешностей измерений и малых колебаний режима, поэтому используется зона нечувствительности.

Задаются два порога  $\Delta t_{\text{вкл}} > \Delta t_{\text{выкл}}$ . Тогда:

Открыть байпас (вкл.):  $\Delta t \geq \Delta t_{\text{вкл}}$ ; закрыть байпас (выкл.):  $\Delta t \leq \Delta t_{\text{выкл}}$  и при  $\Delta t_{\text{выкл}} < \Delta t < \Delta t_{\text{вкл}}$  состояние вентиля сохраняется.

Такой алгоритм соответствует двухпозиционному управлению с гистерезисом (зоной нечувствительности) и устраняет переключения на «дребезге».

Пусть точность измерений температур на входе и выходе УОГ составляет  $\pm 0,5$  °C. Тогда оценка неопределённости разности температур будет:

$$\sigma_{\Delta t} \approx \sqrt{\sigma_{t_{\text{вх}}}^2 + \sigma_{t_{\text{вых}}}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} \approx 0,71 \text{ °C} \quad (12)$$

Чтобы минимизировать ложные срабатывания, порог включения выбирают не менее чем  $\alpha \sigma_{\Delta t}$ , где  $\alpha \approx 1,4 - 2$  обеспечивает отделение именно нагрева газа от возможного измерительного шума, где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент запаса (множитель доверительного интервала). Практическое значение:  $\Delta t_{\text{вкл}} = +1,0$  °C.

Таким образом два практических варианта порогов:

Вариант 1 (асимметричный, простой):  $\Delta t_{\text{вкл}} = +1,0$  °C,  $\Delta t_{\text{выкл}} = 0,0$  °C.

Вариант 2 (симметричный, устойчивый при инерционности и задержках):  $\Delta t_{\text{вкл}} = +1,0$  °C,  $\Delta t_{\text{выкл}} = -0,5$  °C.

Введение гистерезиса в алгоритм управления обеспечило следующие практические преимущества: исключение «дребезга» исполнительных органов при  $\Delta t \approx 0$ ; повышение устойчивости работы системы в пограничных условиях; снижение износа запорной арматуры и повышение надёжности, особенно в режиме, когда газ в УОГ нагревается.

### Результаты (Results)

Моделирование технологического процесса компрессорной станции выполнено для входящего потока природного газа с параметрами, представленными в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Параметры технологических потоков

Parameters of technological flows

| Поток | Параметр        | Значение |
|-------|-----------------|----------|
| 1     | Температура, °C | 12       |
|       | Давление, кПа   | 5509     |
| 2     | Температура, °C | 34,2     |
|       | Давление, кПа   | 7070     |
| 3     | Температура, °C | 32,11    |
|       | Давление, кПа   | 7069     |
| 4     | Температура, °C | 32,03    |
|       | Давление, кПа   | 7065     |
| W     | Энергия, МВт    | 11,93    |

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

Охлаждённый газ транспортируется к УОГ по участку трубопровода длиной 60 м с характеристиками, приведёнными в таблице 5. Результаты моделирования базового режима (см. рис. 1) показали, что при прохождении через УОГ происходит охлаждение потока на 0,38 °C, сопровождающееся потерей давления около 20 кПа. Суммарные потери давления от нагнетания компрессора до выхода в магистраль составили 21 кПа, что подтверждает существенный вклад гидравлического сопротивления УОГ в общие энергозатраты.



Таблица 5  
Table 5

Данные газопровода, ведущего из компрессорного цеха до УОГ  
Data from the gas pipeline leading from the compressor shop to the UOG

| Параметр                                                                                                   | Значение              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Длина, м                                                                                                   | 60                    |
| Диаметр наружный, мм                                                                                       | 1020                  |
| Диаметр внутренний, мм                                                                                     | 984                   |
| Шероховатость, мм                                                                                          | $4,572 \cdot 10^{-2}$ |
| Материал                                                                                                   | Ст. 40                |
| Общий усреднённый коэффициент теплопередачи, $\text{кДж}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ | 8                     |

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

Далее было проведено моделирование альтернативного режима с байпасированием УОГ (см. рис. 3). В этой схеме установка охлаждения заменена коротким отрезком трубопровода (~15 м) с аналогичными гидравлическими характеристиками с вентилем. Сравнение энергопотребления компрессора для двух сценариев (см. табл. 6) выявило значимый эффект: мощность, потребляемая компрессором, снизилась с 11,93 МВт до 11,80 МВт.

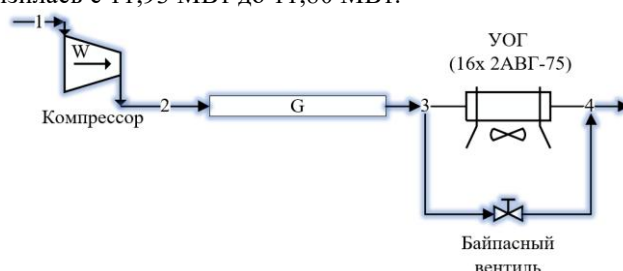


Рис. 3. Технологическая схема альтернативного режима с байпасированием УОГ Fig. 3. Technological scheme of the alternative mode with GCU bypassing

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

Таблица 6  
Table 6

Параметры работы компрессора  
Compressor operation parameters

| Параметр                                   | Значение до внедрения | Значение после внедрения |
|--------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Энергия, МВт                               | 11,93                 | 11,80                    |
| Массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$ | 0,2444                | 0,2418                   |

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

Как видно из параметров потока «Подвод энергии», в базовом режиме (газ проходит через УОГ) компрессору требуется 11,93 МВт подводимой мощности, а при байпасировании УОГ – 11,80 МВт. Учитывая, что низшая теплота сгорания природного газа [19] составляет  $34,79 \text{ МДж}/\text{м}^3$  при плотности  $0,7128 \text{ кг}/\text{м}^3$ , получаем теплоту сгорания, приведенную к единице массы:  $48,81 \text{ МДж}/\text{кг}$ . Тогда массовый расход топливного газа на привод компрессора определяется выражением:

$$m_1 = \frac{Q_T}{Q_H} = \frac{11,93}{48,81} = 0,2444 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (13)$$

$$m_2 = \frac{Q_T}{Q_H} = \frac{11,80}{48,81} = 0,2418 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (14)$$

Таким образом, экономия топливного газа по массе составляет  $0,00266 \text{ кг}/\text{с}$ , что соответствует  $0,00374 \text{ м}^3/\text{с}$  в пересчёте на стандартные условия. Для суточного интервала времени ( $86\,400 \text{ с}$ ) это составляет  $230,1 \text{ кг}/\text{сут}$  или  $322,9 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

#### Обсуждение (Discussions)

Результаты моделирования демонстрируют накопительный эффект от реализации энергосберегающего режима. Экономия топливного газа порядка  $0,00266 \text{ кг}/\text{с}$  ( $0,00374 \text{ м}^3/\text{с}$  в стандартных условиях) на первый взгляд кажется небольшой, однако при масштабировании на продолжительные периоды работы она трансформируется в существенный ресурсный и экономический резерв:  $\sim 230 \text{ кг}$  ( $\sim 323 \text{ м}^3$ ) в сутки. В пересчёте на полный год непрерывного использования байпаса это соответствует примерно  $118\,000 \text{ м}^3$  топливного газа на одной технологической линии.

Ключевым условием практической реализации данной методики является

обеспечение максимальной точности и надежности управления переключением потоков. «Дребезг» запорной арматуры или нестабильность в пограничных режимах могли бы не только нивелировать экономический эффект, но и создать угрозу для технологической безопасности. Внедрение алгоритма управления с гистерезисом является необходимым решением этой проблемы, так как оно исключает частые циклические переключения, стабилизирует работу системы и снижает механический износ оборудования. Это делает режим байпасирования УОГ не просто теоретической возможностью, а технологически реализуемым и надежным решением.

Применимость предложенного способа носит строго обусловленный характер и требует четких критериев. Режим становится целесообразным и безопасным только при определенных сочетаниях температуры газа после компрессора ( $t_{\text{нагн}}$ ) и температуры окружающего воздуха, когда исключен риск перегрева газа и обеспечивается эффективный отвод тепла в грунт магистральным трубопроводом. Для оперативного принятия решений необходима разработка детальных номограмм или интеллектуальных алгоритмов, интегрированных в систему АСУ ТП, которые будут учитывать реальные режимные параметры, сезонные изменения и специфику трассы газопровода. Это превращает разовое технологическое решение в адаптивную систему управления энергоэффективностью.

Следует отметить, что проведенное моделирование в расчетной среде является первым приближением, обосновывающим саму идею и её потенциальную эффективность. Для разработки полноценного рабочего регламента требуется более детальное исследование, включающее:

- динамическое моделирование переходных процессов при переключении на байпас и обратно для оценки всех параметров;
- учет реальной конфигурации и характеристик всего технологического узла КС, включая арматуру, обвязку и конкретные модели АВОг;
- анализ влияния возможных колебаний состава газа на термодинамические и транспортные свойства потока в рамках данного режима;
- технико-экономическое обоснование, учитывающее капитальные затраты на модернизацию системы управления и срок окупаемости проекта.

Несмотря на то, что работа носит модельный характер, она устанавливает количественную взаимосвязь между снижением гидравлического сопротивления и экономией топливного газа, формирует требования к системе управления и определяет вектор для дальнейших, более детальных проектных и исследовательских работ. Внедрение такого адаптивного режима представляется логичным шагом в эволюции систем управления компрессорными станциями в направлении цифровизации и повышения энергетической эффективности.

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

Проведенное исследование продемонстрировало, что предложенное энергосберегающее технологическое решение - управляемый обход установки охлаждения газа с использованием байпасной линии - обладает потенциалом для снижения эксплуатационных затрат на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Моделирование в программном комплексе, основанное на реальных режимных параметрах и компонентном составе газа, подтвердило количественную эффективность данного подхода. При исключении из технологической схемы узла с повышенным гидравлическим сопротивлением (УОГ) в рассматриваемых условиях мощность на привод компрессора уменьшается на 0,13 МВт (с 11,93 до 11,80 МВт). В пересчёте на топливный газ это соответствует экономии около 230 кг (примерно 323 м<sup>3</sup>) в сутки, что при длительной непрерывной работе обеспечивает заметный суммарный эффект. С учётом того, что режим байпасирования УОГ целесообразен только в тёплый период года (когда АВОг не даёт охлаждающего эффекта), годовая экономия будет определяться продолжительностью этого периода. В годовом исчислении, при характерной для региона продолжительности периода высоких температур (20-40 дней), ожидаемая экономия топливного газа может составить от 4,6 до 9,2 тонны (или от 6 460 до 12 920 м<sup>3</sup>) соответственно.

Ключевым фактором успешной практической реализации является не только доказанный энергетический эффект, но и обеспечение надежности и устойчивости работы системы. Для этого необходимо внедрение алгоритма управления переключением с гистерезисом, который исключает «дребезг» исполнительных органов в пограничных режимах, когда разница температур газа и окружающего воздуха близка к нулю. Такой алгоритм минимизирует износ запорной арматуры и повышает общую

отказоустойчивость технологического режима, особенно в ситуации, когда АВОг работает не как охладитель, а как нежелательный нагреватель потока.

Важно подчеркнуть, что применение данного режима носит строго обусловленный характер и требует тщательной предварительной подготовки. Его использование допустимо и экономически оправдано только при определенных сочетаниях температуры газа на выходе из компрессора и температуры наружного воздуха, которые гарантируют безопасный отвод тепла в грунт через стенки магистрального газопровода. Для оперативного управления необходимо разработать детальные регламенты или интеллектуальные системы поддержки принятия решений, основанные на номограммах или алгоритмах, учитывающих реальный состав газа, сезонные колебания климата и конкретные характеристики трассы.

Следует отметить, что представленное стационарное моделирование является важным первым шагом, обосновывающим саму идею и её экономический потенциал. Для перехода к промышленному внедрению требуются дальнейшие исследования, включающие динамическое моделирование переходных процессов при переключении режимов, детальный анализ всей технологической обвязки конкретной КС, а также полноценное технико-экономическое обоснование, учитывающее затраты на модернизацию системы управления. Представленная работа задает четкий вектор для развития цифровых методов управления газотранспортной инфраструктурой, направленных на глубокую оптимизацию энергопотребления без ущерба для надёжности и безопасности.

### Литература

1. Abd A.A., Naji S.Z., Hashim A.S. Effects of non-hydrocarbons impurities on the typical natural gas mixture flows through a pipeline // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. P. 103218. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103218.
2. Fakhroleslam M., Bozorgmehry Boozarjomehry R., Sahlodin A.M., Sin G., Mansouri S.S. Dynamic Simulation of Natural Gas Transmission Pipeline Systems through Autoregressive Neural Networks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60, No. 27. P. 9851–9859. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00802.
3. Hafsi Z., Elaoud S., Mishra M. A computational modelling of natural gas flow in looped network: Effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019. Vol. 64. P. 107–117. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.01.021.
4. Munts V.A., Lebedev M.S. Efficiency Increase in Liquefied Natural Gas Production at Motor Gas Filling Compressor Station using Propane-Butane Fraction pre-Extraction // *Problemele Energeticii Regionale*. 2023. No. 1(57). P. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.07>.
5. Zhussupova D., Otelbaev M., Burgumbayeva S. Modeling Gas Compressor Station Operation to Minimize Fuel Costs for Surge Zone Protection // *International Journal of Rotating Machinery*. 2024. Vol. 2024. Article ID 5560308. DOI: 10.1155/2024/5560308.
6. Ke S.L., Ti H.C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network // *Chemical Engineering Journal*. 2000. Vol. 76, No. 2. P. 169–177. DOI: 10.1016/S1385-8947(99)00131-8.
7. Elaoud S., Abdullay B., Hadj-Taieb E. Effect of hydrogen injection into natural gas on the mechanical strength of natural gas pipelines during transportation // *Archives of Mechanics*. 2014. Vol. 66, No. 4. P. 269–286.
8. Behbahani-Nejad M., Bagheri A. The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70, No. 3-4. P. 256–265. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.11.014.
9. Chaczykowski M., Sund F., Zarodkiewicz P., Hope S.M. Gas composition tracking in transient pipeline flow // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018. Vol. 55. P. 321–330. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.03.014.
10. Burtsev S.A., Karpenko A.P., Leontiev A.I. A method for distributed production of liquefied natural gas at gas-distribution stations // *High Temperature*. 2016. Vol. 54, No. 4. P. 573–576. DOI: 10.1134/S0018151X16030114.
11. Osiadacz A.J., Chaczykowski M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 81, No. 1-3. P. 41–51. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00194-7.

12. Alamian R., Behbahani-Nejad M., Ghanbarzadeh A. A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2012. Vol. 9. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.jngse.2012.05.012.
13. Herran-Gonzalez A., De La Cruz J., De Andres-Toro B., Risco-Martin J. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network // Applied Mathematical Modelling. 2009. Vol. 33, No. 3. P. 1584–1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.03.015.
14. Behbahani-Nejad M., Shekari Y. The accuracy and efficiency of a reduced-order model for transient flow analysis in gas pipelines // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2010. Vol. 73, No. 1-2. P. 13–19. DOI: 10.1016/j.petrol.2010.05.002.
15. Sanjari E., Lay E.N., Peymani M. An accurate empirical correlation for predicting natural gas viscosity // Journal of Natural Gas Chemistry. 2011. Vol. 20, No. 6. P. 654–658. DOI: 10.1016/S1003-9953(10)60244-7.
16. AspenTech. Aspen HYSYS User Guide [Electronic resource]. URL: <https://sites.ualberta.ca/CMENG/che312/F06ChE416/HsysDocs/AspenHYSYSUserGuide.pdf> (accessed: 17.01.2026).
17. Peng D.-Y., Robinson D.B. A New Two-Constant Equation of State // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1976. Vol. 15, No. 1. P. 59–64. DOI: 10.1021/i160057a011.
18. AspenTech. HYSYS Simulation Basis [Electronic resource]. URL: <https://sites.ualberta.ca/CMENG/che312/F06ChE416/HsysDocs/AspenHYSYSSimulationBasis.pdf> (accessed: 17.01.2026).
19. Moran M.J., Shapiro H.N., Boettner D.D., Bailey M.B. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 9th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. 880 p.
20. MINES Paris PSL (DIRens). Compressions [Electronic resource]. URL: <https://direns.minesparis.psl.eu/Sites/Thopt/DiapJS/doc/S11/CoursCompression.pdf> (accessed: 17.01.2026).
21. AspenTech. Pipe Segment [Electronic resource]. URL: <https://lhd52.files.wordpress.com/2011/09/group-3-pipe-segment.pdf> (accessed: 17.01.2026).
22. AspenTech. Heat Exchanger [Electronic resource]. URL: <https://lhd52.files.wordpress.com/2011/09/group-1-heat-exchanger.pdf> (accessed: 17.01.2026).
23. Aspen Technology, Inc. Aspen HYSYS Dynamic Modeling Guide. Version Number: V7.3. March 2011 [Electronic resource]. URL: [https://profsite.um.ac.ir/~fanaei/\\_private/DynamicModel7\\_3.pdf](https://profsite.um.ac.ir/~fanaei/_private/DynamicModel7_3.pdf) (accessed: 17.01.2026).
24. Завьялов А.П., Никулина Д.П., Чурикова М.М., Гречишников И.М. О методах обеспечения энергетической эффективности транспортировки газа в современных условиях // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2023. – № 1(310). – С. 145–152. – DOI: 10.33285/2073-9028-2023-1(310)-145-152.
25. Шомов П.А. Разработка энерготехнологических схем компрессорных станций на основе глубокой утилизации вторичных энергетических ресурсов // Вестник МЭИ. – 2024. – № 5. – С. 89–99. – DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-89-99.

#### Авторы публикации

**Захаров Александр Сергеевич** – аспирант Казанского национального исследовательского технологического университета. Email: [alexanderzaharo@yandex.ru](mailto:alexanderzaharo@yandex.ru).

**Аетов Алмаз Уралович** – старший преподаватель кафедры теоретических основ теплотехники Казанского национального исследовательского технологического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9371-332X>. Email: [aetovalmaz@mail.ru](mailto:aetovalmaz@mail.ru).

**Саляхов Рамис Харисович** – заместитель генерального директора по производству ООО «Газпром трансгаз Казань» - ПАО «Газпром». Email: [turbogazr@yandex.ru](mailto:turbogazr@yandex.ru).

**Гильмутдинов Ильфар Маликович** – д-р техн. наук, и.о. заведующего кафедрой технологии конструкционных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-6306>. Email: [gilmutdinovIM@corp.knrtu.ru](mailto:gilmutdinovIM@corp.knrtu.ru).

## References

1. Abd A.A., Naji S.Z., Hashim A.S. Effects of non-hydrocarbons impurities on the typical natural gas mixture flows through a pipeline // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. P. 103218. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103218.
2. Fakhroleslam M., Bozorgmehry Boozarjomehry R., Sahlodin A.M., Sin G., Mansouri S.S. Dynamic Simulation of Natural Gas Transmission Pipeline Systems through Autoregressive Neural Networks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60, No. 27. P. 9851–9859. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00802.
3. Hafsi Z., Elaoud S., Mishra M. A computational modelling of natural gas flow in looped network: Effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019. Vol. 64. P. 107–117. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.01.021.
4. Munts V.A., Lebedev M.S. Efficiency Increase in Liquefied Natural Gas Production at Motor Gas Filling Compressor Station using Propane-Butane Fraction pre-Extraction // *Problemele Energeticii Regionale*. 2023. No. 1(57). P. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.07>.
5. Zhussupova D., Otelbaev M., Burgumbayeva S. Modeling Gas Compressor Station Operation to Minimize Fuel Costs for Surge Zone Protection // *International Journal of Rotating Machinery*. 2024. Vol. 2024. Article ID 5560308. DOI: 10.1155/2024/5560308.
6. Ke S.L., Ti H.C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network // *Chemical Engineering Journal*. 2000. Vol. 76, No. 2. P. 169–177. DOI: 10.1016/S1385-8947(99)00131-8.
7. Elaoud S., Abdullay B., Hadj-Taieb E. Effect of hydrogen injection into natural gas on the mechanical strength of natural gas pipelines during transportation // *Archives of Mechanics*. 2014. Vol. 66, No. 4. P. 269–286.
8. Behbahani-Nejad M., Bagheri A. The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70, No. 3-4. P. 256–265. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.11.014.
9. Chaczykowski M., Sund F., Zarodkiewicz P., Hope S.M. Gas composition tracking in transient pipeline flow // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018. Vol. 55. P. 321–330. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.03.014.
10. Burtsev S.A., Karpenko A.P., Leontiev A.I. A method for distributed production of liquefied natural gas at gas-distribution stations // *High Temperature*. 2016. Vol. 54, No. 4. P. 573–576. DOI: 10.1134/S0018151X16030114.
11. Osiadacz A.J., Chaczykowski M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 81, No. 1-3. P. 41–51. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00194-7.
12. Alamian R., Behbahani-Nejad M., Ghanbarzadeh A. A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2012. Vol. 9. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.jngse.2012.05.012.
13. Herran-Gonzalez A., De La Cruz J., De Andres-Toro B., Risco-Martin J. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network // *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33, No. 3. P. 1584–1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.03.015.
14. Behbahani-Nejad M., Shekari Y. The accuracy and efficiency of a reduced-order model for transient flow analysis in gas pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 73, No. 1-2. P. 13–19. DOI: 10.1016/j.petrol.2010.05.002.
15. Sanjari E., Lay E.N., Peymani M. An accurate empirical correlation for predicting natural gas viscosity // *Journal of Natural Gas Chemistry*. 2011. Vol. 20, No. 6. P. 654–658. DOI: 10.1016/S1003-9953(10)60244-7.
16. AspenTech. Aspen HYSYS User Guide [Electronic resource]. URL: <https://sites.ualberta.ca/CMENG/che312/F06ChE416/HsysDocs/AspenHYSYSUserGuide.pdf> (accessed: 17.01.2026).
17. Peng D.-Y., Robinson D.B. A New Two-Constant Equation of State // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1976. Vol. 15, No. 1. P. 59–64. DOI: 10.1021/i160057a011.
18. AspenTech. HYSYS Simulation Basis [Electronic resource]. URL: <https://sites.ualberta.ca/CMENG/che312/F06ChE416/HsysDocs/AspenHYSYSSimulationBasis.pdf> (accessed: 17.01.2026).
19. Moran M.J., Shapiro H.N., Boettner D.D., Bailey M.B. *Fundamentals of Engineering*

Thermodynamics. 9th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. 880 p.

20. MINES Paris PSL (DIRens). Compressions [Electronic resource]. URL: <https://direns.minesparis.psl.eu/Sites/Thopt/DiapJS/doc/S11/CoursCompression.pdf> (accessed: 17.01.2026).

21. AspenTech. Pipe Segment [Electronic resource]. URL: <https://lhd52.files.wordpress.com/2011/09/group-3-pipe-segment.pdf> (accessed: 17.01.2026).

22. AspenTech. Heat Exchanger [Electronic resource]. URL: <https://lhd52.files.wordpress.com/2011/09/group-1-heat-exchanger.pdf> (accessed: 17.01.2026).

23. Aspen Technology, Inc. Aspen HYSYS Dynamic Modeling Guide. Version Number: V7.3. March 2011 [Electronic resource]. URL: [https://profsite.um.ac.ir/~fanaei/\\_private/DynamicModel7\\_3.pdf](https://profsite.um.ac.ir/~fanaei/_private/DynamicModel7_3.pdf) (accessed: 17.01.2026).

24. Zavyalov A.P., Nikulina D.P., Churikova M.M., Grechishnikov I.M. On methods of ensuring energy efficiency of gas transportation in modern conditions // Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas. – 2023. – № 1(310). – Pp. 145-152. – DOI: 10.33285/2073-9028-2023-1(310)-145-152.

25. Shomov, P.A., Development of energy technology schemes for compressor stations based on deep utilization of secondary energy resources, Vestnik MEI, 2024, No. 5, pp. 89-99.- DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-89-99.

#### Authors of the publication

**Alexander S. Zakharov** – Kazan National Research Technological University. [alexanderzaharo@yandex.ru](mailto:alexanderzaharo@yandex.ru).

**Almaz U. Aetov** – Kazan National Research Technological University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9371-332X>. [aetovalmaz@mail.ru](mailto:aetovalmaz@mail.ru).

**Ramis K. Salyakhov** – LLC - Gazprom PJSC. [turbogazr@yandex.ru](mailto:turbogazr@yandex.ru).

**Ilfar M. Gilmutdinov** – Kazan National Research Technological University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-6306>. [gilmutdinovIM@corp.knrtu.ru](mailto:gilmutdinovIM@corp.knrtu.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 19.02.2026 г.

**Отредактировано** 23.04.2026 г.

**Принято** 07.05.2026 г.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА И АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОГО МАШИНЫ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДАТА-ЦЕНТРА

Юдин<sup>1</sup> А.К., Владимиров<sup>1</sup> Я.А., Мухаметова<sup>2</sup> Л.Р.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия  
yudin.a.k@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Тепловую энергию дата-центра (или ЦОД – центра обработки данных) с воздушной системой охлаждения можно использовать, например, для подогрева воздуха в помещениях в зимнее время. Для этого может быть установлен теплообменник, который передаст тепло от системы охлаждения и использует его для нагрева воздуха, который затем поступает в здание. Известен ряд типовых потребителей тепловой энергии от дата-центров: жилые и офисные здания, теплицы. Например, компания Yandex открыла в 2015 году дата-центр в пригороде Хельсинки. Тепловая энергия от дата-центра поступает в систему отопления жилых домов. В центре обработки данных компании Facebook в Лунда, в Швеции, тепло, выделяемое серверами, используется для обогрева воздуха, который затем направляется в офисы Facebook и соседние здания. Кроме того, тепло от дата-центра может быть использовано для отопления теплиц и других объектов сельского хозяйства. В частности, в Нидерландах тепло от дата-центров используется для обогрева теплиц, где выращиваются овощи, цветы и другие растения. ЦЕЛЬ. Моделирование режимов работы теплового насоса и абсорбционной холодильной машины для утилизации тепловой энергии дата-центра. МЕТОДЫ. Проведено моделирование режимов работы теплового насоса для интеграции дата-центра в систему централизованного теплоснабжения с расчетом теплового баланса и определением коэффициента трансформации тепловой энергии, который находится в диапазоне 3,4 – 4,5 в зависимости от расчетного режима. Дополнительно проведено моделирование режимов работы абсорбционной холодильной машины (АБХМ) для покрытия нагрузки на охлаждение дата-центра с расчетом теплового баланса. РЕЗУЛЬТАТЫ. Построенная математическая модель является моделью единичного теплового насоса, путем объединения которых будет достигаться уровень покрытия требуемой тепловой мощности для здания. Модель выполнена для технологической связки теплового насоса и дата-центра в виде концепции «черного ящика», где в качестве черного ящика выступает дата-центр. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Интеграция теплового насоса в тепловую схему дата-центра является актуальным решением в случае расположения объекта в зоне действия системы централизованного теплоснабжения. В свою очередь, применение АБХМ с холодильной мощностью 2000 кВт может иметь перспективы, т.к. в качестве источника холода в типовых проектах холодоснабжения дата-центров применяются группы чиллеров внутреннего размещения мощностью по 2000 кВт с выносными воздушными конденсаторами.

**Ключевые слова:** дата-центр; моделирование; централизованное теплоснабжение; тепловой насос; абсорбционная холодильная машина

**Для цитирования:** Юдин А.К., Владимиров Я.А., Мухаметова Л.Р. Моделирование теплового насоса и абсорбционной холодильной машины для утилизации тепловой энергии дата-центра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 178-191. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-178-191.

## SIMULATION OF A HEAT PUMP AND AN ABSORPTION REFRIGERATING MACHINE FOR THE UTILIZATION OF THERMAL ENERGY IN A DATA CENTER

Yudin<sup>1</sup> A.K., Vladimirov<sup>1</sup> Y.A., Mukhametova<sup>2</sup> L.R.

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

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

yudin.a.k@mail.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* The thermal energy of a data center with an air-cooling system can be used, for example, to heat indoor air in winter. For this purpose, a heat exchanger can be installed, which transfers heat from the cooling system and uses it to heat the air, which then enters the building. A number of typical consumers of thermal energy from data centers are known: residential and office buildings, greenhouses. For example, Yandex opened a data center in a suburb of Helsinki in 2015. Thermal energy from the data center enters the heating system of residential buildings. At Facebook's data center in Lulea, Sweden, the heat generated by the servers is used to heat the air, which is then sent to Facebook's offices and neighboring buildings. In addition, the heat from the data center can be used to heat greenhouses and other agricultural facilities. In particular, in the Netherlands, heat from data centers is used to heat greenhouses where vegetables, flowers and other plants are grown. *THE PURPOSE.* Simulation of the operating modes of a heat pump and an absorption refrigerating machine for the utilization of thermal energy in a data center. *METHODS.* The simulation of the operating modes of a heat pump for the integration of a data center into a centralized heat supply system with the calculation of the heat balance and the determination of the coefficient of transformation of thermal energy, which is in the range of 3.4 - 4.5, depending on the design mode. Additionally, the simulation of the operating modes of an absorption refrigerating machine was carried out to cover the cooling load of the data center with the calculation of the thermal balance. *RESULTS.* The constructed mathematical model is a model of a single heat pump, by combining which the level of coverage of the required heat output for the building will be achieved. The model is designed for the technological connection of a heat pump and a data center in the form of a "black box" concept, where the data center acts as a black box. *CONCLUSION.* The integration of the heat pump into the thermal scheme of the data center is an urgent solution if the facility is located in the area of the district heating system. In turn, the use of absorption refrigerating machine with a cooling capacity of 2000 kW may have prospects, since groups of indoor chillers with a capacity of 2000 kW with external air condensers are used as a source of cold in typical data center refrigeration projects.

**Keywords:** data center; modeling; district heating; heat pump; absorption refrigerating machine.

**For citation:** Yudin A.K., Vladimirov Y.A., Mukhametova L.R. Simulation of a heat pump and an absorption refrigerating machine for the utilization of thermal energy in a data center. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 178-191. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-178-191.

### **Введение (Introduction)**

В Российской Федерации ежегодный прирост потребляемой мощности в отрасли хранения данных составляет не менее 100 МВт/год. Известно, что практически вся электроэнергия, потребляемая основным оборудованием дата-центров, преобразуется во вторичную тепловую энергию. Внедрение дата-центров с отводом тепловой энергии внешним абонентам позволяет снизить потребление электрической энергии на охлаждение и утилизировать большую часть тепловой энергии (как правило, до 70%) от работы основного оборудования.

Цель исследования заключается в разработке принципиальных схемных решений и моделировании режимов работы теплового насоса и абсорбционной холодильной машины для утилизации тепловой энергии дата-центра. Научная значимость исследования состоит в разработке основ для интеграции дата-центров в зону действия систем централизованного тепло- и холодоснабжения посредством применения теплового насоса или абсорбционной холодильной машины. Практическая значимость исследования заключается в прогнозировании режимных характеристик установок утилизации тепловой энергии дата-центра.



### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Требуемые параметры микроклимата для дата-центров одними из первых были регламентированы Американским сообществом инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию (ASHRAE), рекомендациями которых пользуются во всем мире. С развитием конструкционных возможностей компонентов компьютерных систем рекомендуемый диапазон температур воздуха помещений дата-центров менялся и на данный момент составляет 20 – 27 °C [1]. Технические специалисты IT-предприятий стремятся к заданному диапазону используя различные решения систем охлаждения [2, 3]. Системы охлаждения серверных помещений в принципиальном смысле разделяются на воздушные и жидкостные. В первом случае, рынок охлаждающих систем может предложить следующие варианты [4, 5]:

#### **Фреоновая система охлаждения:**

Данная система работает на классических промышленных сплит-системах. Охлажденный воздушный поток движется в холодный коридор через фальшпол, проходит через стойки с вычислительными устройствами, которые передают выработанную тепловую энергию, а затем через горячий коридор поступает в сплит-систему, где охлаждается и возвращается в помещение. В конденсаторе тепло, поглощенное хладагентом, выделяется в окружающую среду, и фреон конденсируется обратно в жидкость. Жидкий фреон затем проходит через устройство расширения, где его давление и температура понижаются, и он возвращается в испаритель, после которого направляется в компрессор. Фреоновые системы охлаждения дата-центров имеют несколько преимуществ перед другими типами систем охлаждения. Они могут быть эффективными и надежными, и они могут управляться автоматически для поддержания определенной температуры в помещении. Однако, в связи с тем, что фреон может оказывать негативное воздействие на окружающую среду, такие системы охлаждения сейчас всё чаще заменяются на более экологически чистые альтернативы.

#### **Чиллерная система охлаждения:**

Такой тип системы охлаждения работает по циклу, аналогичному фреоновой системе охлаждения, и использует агрегаты, названные чиллерами, для охлаждения воды или другой жидкости, которая циркулирует через систему трубопроводов и теплообменников в серверной комнате. Эта система также работает на основе цикла испарения и конденсации, где охлаждаемая жидкость циркулирует в системе, перенося тепло изнутри помещения во внешнюю среду. Процесс работы чиллерной системы охлаждения начинается с того, что вода или другая охлаждаемая жидкость циркулирует через систему трубопроводов внутри серверной комнаты. Здесь она принимает на себя тепловую энергию от серверов и другого оборудования, которое работает в помещении. Жидкость затем проходит через теплообменник, где она передает тепло теплоносителю, который движется в чиллер, где он и охлаждается. Теплоноситель, циркулирующий во внешнем блоке, представляет из себя незамерзающий раствор, который позволяет работать системе в холодный период года.

#### **Фрикулинг:**

Данный метод охлаждения является следующим шагом в развитии воздушных систем охлаждения для дата-центров. Такая система представляет собой технологию охлаждения, которая не требует применения компрессоров и других энергоемких устройств для функционирования. Его основная идея заключается в использовании окружающей среды для охлаждения объекта. Для достижения этой цели прохладный воздух из окружающей среды может быть направлен непосредственно в помещение или передан через теплоноситель. Однако, чтобы фрикулинг работал эффективно, температура на улице должна быть ниже, чем внутри помещения [6].

#### **Иммерсионная система охлаждения:**

Иммерсионная система охлаждения является инновационной технологией, которая позволяет эффективно утилизировать теплоту, выделяемую в результате работы серверов. В отличие от традиционных систем охлаждения, которые используют воздушные потоки, иммерсионные системы погружают оборудование в жидкий охладитель, который обладает диэлектрическими свойствами. Погружение серверного оборудования в жидкий охладитель позволяет охлаждать оборудование непосредственно, внутри его корпуса, в результате чего пропадает необходимость установки дополнительного внешнего оборудования, занимающего площадь помещения, что позволяет повысить плотность размещения серверных стоек в дата-центрах. Одним из главных преимуществ иммерсионных систем охлаждения является высокая эффективность в использовании энергии. Такие системы позволяют снизить потребление электроэнергии предприятием, что также уменьшает

негативное влияние на окружающую среду.

В статье [7] производится моделирование работы схемы охлаждения с применением фреоновых тепловых насосов. В данной схеме используются фреоны R134a и R245fa. Схема предназначена для обеспечения температуры помещения 18 – 25 °С и для утилизации 12 кВт теплоты через воду. Примером исследования чиллерной системы является работа [8], где проводится разработка и экспериментальное исследование компактного адсорбционного чиллера, работающего на силикагеле. Некоторые модели чиллеров могут работать в режиме теплового насоса. В этом же случае возможно отопление помещений. Рассмотренный в статье чиллер работал по схеме, при которой температура горячей воды на входе составляла 50 °С, что соответствует стандартам безопасности современных ЦОД в системах водяного охлаждения. В ходе данного исследования были сделаны следующие выводы:

- При габаритах чиллера 1,5×0,6×2,2 м средняя охлаждающая мощность составила 4,91 кВт.
- Снижение температуры охлаждающей воды на входе оказывает значительное положительное влияние на производительность чиллера (при снижении с 32 °С до 24 °С охлаждающая мощность увеличивается с 3,04 до 10,5 кВт).

Отдельное распространение среди чиллерных систем получили абсорбционные холодильные машины (АБХМ) бромистолитиевого типа. В работе [9] приводится упрощённая методика теплового расчёта АБХМ. В работе [10] проводится исследования бромистолитиевых абсорберов, в результате которых было определено, что наиболее подходящая геометрия подающего патрубка должна минимизировать объём удерживаемой жидкости в целях снижения риска коалесценции капель и увеличения площади поверхности раздела пар-жидкость. В исследовании [11] производится моделирование и анализ системы АБХМ при внедрении в систему жидкостного охлаждения, что отражает гибкость применения АБХМ в системах охлаждения.

В работе [12] производится расчёт системы чиллера с фрикулингом для обеспечения стабильной работы при перепадах температуры наружного воздуха. Было определено, что чиллеры могут работать в двух режимах: в компрессорном режиме и в режиме фрикулинга. Компрессорный режим основан на применении винтовых компрессоров с фреоновым хладагентом. В режиме фрикулинга подразумевается байпас компрессоров, а охлаждение происходит за счёт отвода тепла из охлаждённой воды в воздух. В учебных пособиях<sup>12</sup> и работе [13] рассматриваются системы кондиционирования воздуха на базе чиллера-фанкойлов.

Система погружного жидкостного охлаждения рассмотрена в работе [14], где изучаются тепломассообменные процессы каждого при использовании безчиллерной системы охлаждения на ЦОД компании IBM. В учебном пособии<sup>3</sup> также проводится исследование процесса теплопередачи от процессоров в гибридной погружной системе охлаждения. В свою очередь, в [15] рассмотрена экспериментальная установка ЦОД компанией SEILAB, где было доказано, что жидкостное охлаждение позволяет значительно снизить электропотребление и утилизировать получаемое тепло. Также был представлен численный и экспериментальный анализ жидкостной системы с целью определения требуемых характеристик работы ЦОД для успешной утилизации теплоты. В результате исследования было определено, что невозможно подобрать универсальные показатели системы утилизации тепла и необходимо задавать соответствующие значения, исходя из особенностей работы дата центров.

Другой работой, исследующей погружное жидкостное охлаждение, является [16], где производится построение и расчёт математической модели жидкостного охлаждения вычислительных устройств при непосредственном контакте с хладагентом в случае естественной циркуляции жидкого хладагента. Результатом данной работы являются следующие выводы:

- Применение жидкостных погружных системы охлаждения вычислительных устройств позволяет значительно повысить их эффективность по сравнению с воздушными. При этом достигается большая компактность размещения устройств.
- Недостатком системы охлаждения с кипящим хладагентом является потребность в

<sup>1</sup> Системы кондиционирования воздуха на базе чиллера-фанкойлов: учебное пособие / сост.: Э.У. Ямлеева. – Ульяновск: Ул-ГТУ, 2019. – 242 с.

<sup>2</sup> Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами / Е. М. Белова // Издательство «Евроклимат», 2003. – 400 с.

<sup>3</sup> Основы обеспечения микроклимата зданий / Ю. Я. Кувшинов, О. Д. Самарин // Издательство Ассоциации строительных вузов, Москва, 2012. – 200 с.

герметичном исполнении.

- Эффективность системы с кипящим хладагентом в разы превышает простую погружную систему, и она не требует создания контура принудительной циркуляции жидкости.

- Конденсатор системы с кипящим хладагентом компактнее, по сравнению с обычным теплообменником жидкостного охлаждения.

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

В настоящей работе проведено моделирование режимов работы теплового насоса для интеграции дата-центра в систему централизованного теплоснабжения с расчетом теплового баланса и определением коэффициента трансформации тепловой энергии [17, 18]. Дополнительно проведено моделирование режимов работы абсорбционной холодильной машины для покрытия нагрузки на охлаждение дата-центра с расчетом теплового баланса [19]. В качестве среды моделирования в обоих случаях применялись программные пакеты AspenONE: Aspen HYSYS и Aspen Plus, соответственно. Предполагается, что оба технических решения применяются для типового дата-центра, применяющего чиллерную систему в качестве метода охлаждения [20, 21].

Для создания математической модели в среде Aspen HYSYS (рис. 1) предполагается решение следующих задач:

- Моделирование контура теплонасосной установки (ТНУ) на фреоне R290, который объединен технологией с ЦОД (табл. 1);
- Анализ различных режимов работы цикла;
- Получение необходимых расчетных зависимостей для ТНУ.

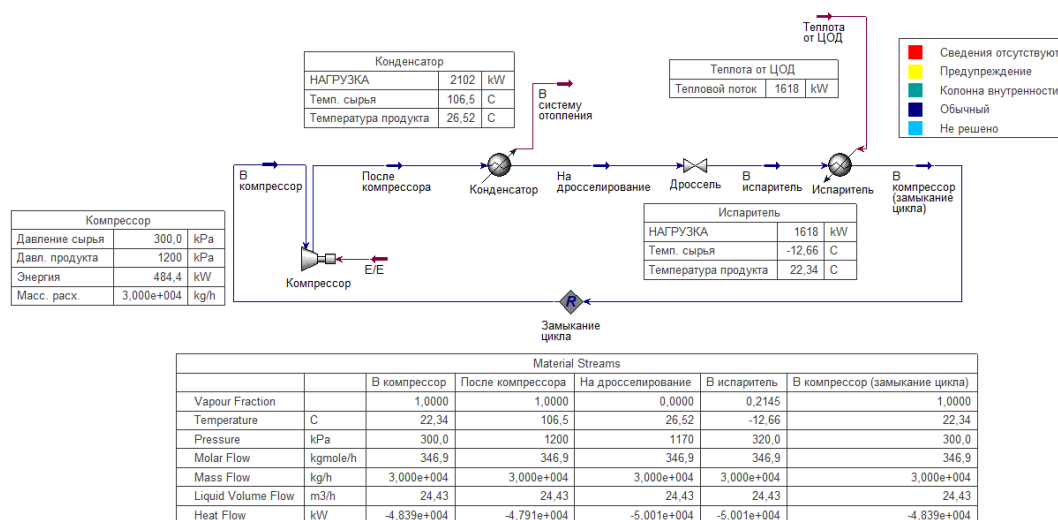


Рис. 1. Математическая модель ТНУ для утилизации тепловой энергии ЦОД

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

В качестве номинальной тепловой мощности, снимаемой с ЦОД, принята величина 1600 кВт (после отладки модели – 1618 кВт) с целью получения около 2000 – 2100 кВт тепловой энергии на конденсаторе. Эта величина принята на основании изучения проектной документации ЦОД, построенных на территории Российской Федерации. В частности, во многих проектах ЦОД в качестве источника охлаждения в базовом варианте применяются чиллеры внутреннего размещения мощностью от 1000 до 2000 кВт с выносными воздушными конденсаторами.

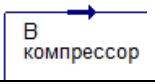
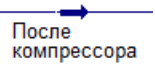
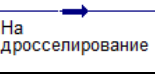
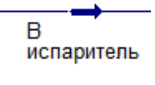
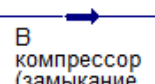
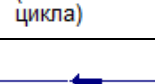
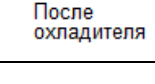
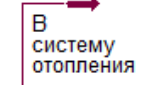
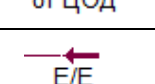
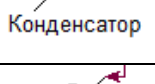
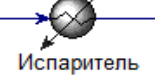
Параметром, который лежит в основе оценки энергоэффективности работы теплового насоса, является коэффициент трансформации тепла или коэффициент преобразования  $\mu$ . Этот коэффициент рассчитывается путем отношения полученной полезной тепловой энергии  $Q_{\text{пол}}$  к затраченной электрической энергии  $Q_{\text{э}}$ . Для построенной математической модели, в рамках базового режима работы, коэффициент преобразования равен:

$$\mu = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{э}}} = \frac{2102,0}{484,4} = 4,34$$

Таблица 1

Table 1

Описание условных обозначений элементов модели THU  
 Description of the symbols of the elements of the heat pump unit model

| Группы элементов | Обозначение элемента в модели                                                       | Описание                                                                                                                |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                |    | Материальный поток. Фреон. На входе в компрессор                                                                        |
|                  |    | Материальный поток. Фреон. На выходе из компрессора/вход в конденсатор                                                  |
|                  |    | Материальный поток. Фреон. Выход из конденсатора/вход в дросселирующий клапан                                           |
|                  |    | Материальный поток. Фреон. Выход из дросселирующего клапана/вход в испаритель                                           |
|                  |    | Материальный поток. Фреон. Выход из испарителя/вход в компрессор                                                        |
|                  |    | Материальный поток. Фреон. После охлаждения перед компрессором                                                          |
|                  |   | Энергетический поток. Имитирует тепловую энергию, полученную в конденсаторе THU, которая направлена в систему отопления |
|                  |  | Энергетический поток. Тепловая энергия от воды первичного контура перед THU, направлена в испаритель THU                |
|                  |  | Энергетический поток. электроэнергия, затрачиваемая на привод компрессора                                               |
| 2                |  | Дросселирующий клапан. Служит для снижения давления фреона                                                              |
| 3                |  | Конденсатор и охладитель. Моделирует процесс фазового перехода фреона (конденсацию)                                     |
|                  |  | Испаритель. Моделирует процесс фазового перехода фреона (испарение)                                                     |
| 4                |  | Инструмент Recycle. Позволяет замыкать технологические циклы                                                            |
| 5                |  | Компрессор. Моделирует процесс повышения давления рабочего тела. В текущей модели – фреона.                             |

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

Моделирование различных режимов работы чиллеров АБХМ в рамках данной работы проведено в Aspen Plus (рис. 2).

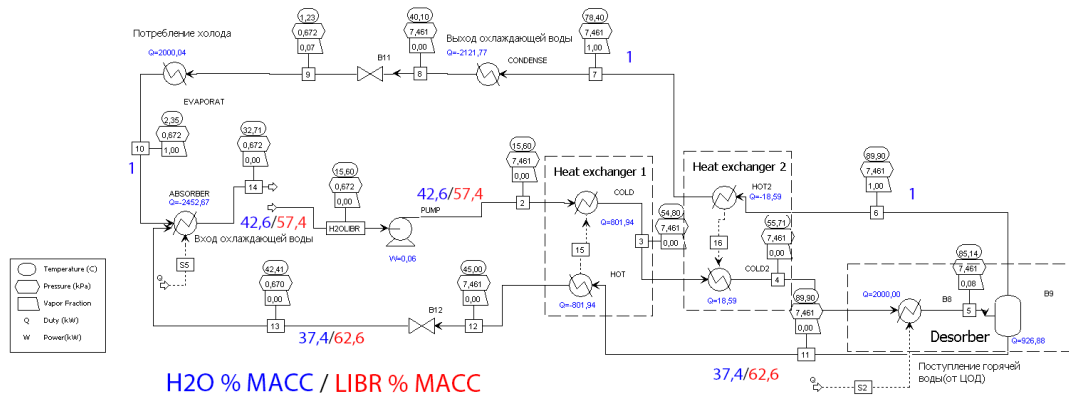


Рис. 2. Математическая модель АБХМ с массовыми концентрациями воды и LiBr  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для создания математической модели в выбранной среде моделирования предполагается решение следующих задач:

- Моделирование теплового контура на бромистом литии, который объединен технологией с ЦОД;
- Анализ массового расхода бромистого лития в зависимости от исходных данных потребления и выработки тепловой энергии ЦОД;
- Получение расчетных зависимостей расхода воды в контуре охлаждения ЦОД в зависимости от хладопроизводительности АБХМ.

Для поставленной задачи требуемая хладопроизводительность равна 2000 кВт. В таблице 2 представлен баланс системы АБХМ для каждого элемента модели.

Таблица 2

Table 2

Тепловой и материальный баланс элементов АБХМ  
 Thermal and material balance of absorption cooling machine elements

| Название элемента | Назначение                                                                                        | Вход                                                              | Выход                                                             |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| PUMP              | Насос, прокачивающий неконцентрированный бромистый литий                                          | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Электроэнергия:<br>0,06 кВт     | Массовый расход:<br>37293 кг/ч                                    |
| COLD              | Холодный контур теплообменного аппарата первой ступени                                            | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>801,94 кВт | Массовый расход:<br>37293 кг/ч                                    |
| COLD2             | Холодный контур теплообменного аппарата второй ступени                                            | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>18,59 кВт  | Массовый расход:<br>37293 кг/ч                                    |
| B8                | Модуль, обозначающий рекуперативный подвод теплоты к блоку десорбера (генератора).                | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>2000 кВт   | Массовый расход:<br>37293 кг/ч                                    |
| B9                | Модуль десорбера (генератора), обозначающий сепарацию бромистого лития и воды вследствие нагрева. | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>926,88 кВт | Массовый расход:<br>LiBr: 34213 кг/ч<br>H2O: 3080 кг/ч            |
| HOT               | Горячий контур теплообменного аппарата первой ступени                                             | Массовый расход:<br>3080 кг/ч                                     | Массовый расход:<br>3080 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>18,59 кВт   |
| HOT2              | Горячий контур теплообменного аппарата второй ступени                                             | Массовый расход:<br>37293 кг/ч                                    | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>801,94 кВт |

| Название элемента | Назначение                                                                           | Вход                                                                | Выход                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| CONDENSE          | Блок, в котором происходит охлаждение водяных паров и фазовый переход                | Массовый расход:<br>3080 кг/ч                                       | Массовый расход:<br>3080 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>2121,77 кВт  |
| B11               | Дроссель водяного контура                                                            | Массовый расход:<br>3080 кг/ч                                       | Массовый расход:<br>3080 кг/ч                                      |
| EVAPORAT          | Блок испарителя, к которому подводится контур воды системы холодоснабжения.          | Массовый расход:<br>3080 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>2000,4 кВт    | Массовый расход:<br>3080 кг/ч                                      |
| ABSORBER          | Блок абсорбера, в котором происходит конденсация и смешение воды и бромистого лития. | Массовый расход:<br>LiBr: 34212 кг/ч<br>H <sub>2</sub> O: 3080 кг/ч | Массовый расход:<br>37293 кг/ч<br>Тепловая энергия:<br>2452,67 кВт |
| B12               | Дроссель контура концентрированного лития.                                           | Массовый расход:<br>34212 кг/ч                                      | Массовый расход:<br>34213 кг/ч                                     |

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

### Результаты и обсуждение (Results and discussions)

На рисунке 3 показана зависимость потребляемой электрической мощности компрессора от степени сжатия рабочего тела, на рисунке 4 – выделяемая теплота в конденсаторе в зависимости от перепада температур фреона, до и после конденсатора, на рисунке 5 – зависимость коэффициента трансформации тепла от степени сжатия в компрессоре, на рисунке 6 – зависимость коэффициента трансформации тепла от перепада температур фреона в конденсаторе.

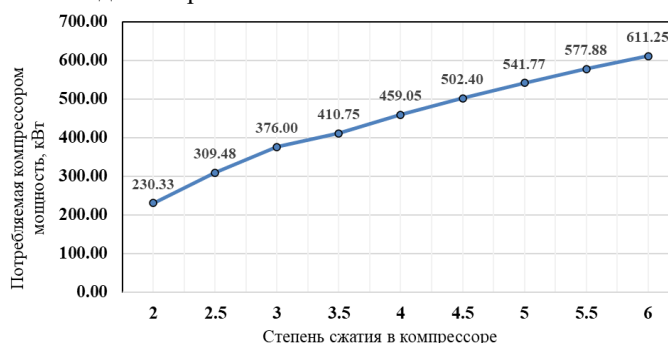


Рис. 3. Зависимость потребляемой электрической мощности компрессора от степени сжатия фреона

Fig. 3. Dependence of the consumed electric power of the compressor on the compression ratio of the freon

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

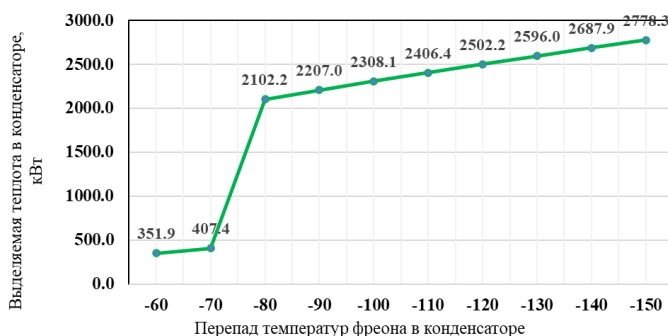


Рис. 4. Зависимость коэффициента трансформации тепла от перепада температур фреона в конденсаторе

Fig. 4. Dependence of the heat transformation coefficient on the temperature difference of freon in the condenser

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

Полученная зависимость на рисунке 4 отображает снижение величины выделенной теплоты в конденсаторе от фреона при уменьшении его перепада температур. Перелом на графике соответствует параметрам фреона, при которых процесс фазового перехода (конденсации) происходить не будет, следовательно, нет изменения агрегатного состояния,

что влечет за собой выделение незначительного количества теплоты  $Q_{\text{пол}}$ , что нарушает цикл работы ТНУ. В дальнейшем эти точки рассматриваться не будут. В модели конденсация начинается от величины разницы температур в 70 градусов Цельсия. Знак « - » обозначает математическую особенность вычислений в Aspen HYSYS для корректного отображения температуры после конденсатора.

Таким образом, конденсация фреона происходит при температурах 35 – 40 °С, что позволяет использовать тепловую энергию с данным температурным потенциалом для отопления близлежащего здания (или непосредственно помещений офисного типа здания ЦОД) с помощью теплого пола или отопительной вентиляции. Для базового режима работы модели ТНУ коэффициент преобразования составляет 4,34. В случае необходимости использования ТНУ для отопления здания посредством радиаторов потребуется повышение температуры конденсации фреона, как минимум, до 65 – 70 °С, что повлечет за собой перенастройку модели с изменением давления фреона и, возможно, необходимость выбора фреона другого типа. В любом случае повышение температуры конденсации фреона до 65 – 70 °С приведет к снижению коэффициента преобразования ТНУ ниже 3,0, что резко снизит энергетическую и экономическую привлекательность подобного решения. Поэтому применение тепловой энергии ЦОД для нужд отопления целесообразно при наличии абонентов с сравнительно невысокими температурами отопительных приборов. Соответственно, в неотапительном периоде данная тепловая энергия может использоваться для нужд горячего водоснабжения близлежащего здания (или непосредственно помещений офисного типа здания ЦОД) при последующем подогреве, например, посредством электронагревателей или же утилизироваться в окружающую среду.



Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования тепла от степени сжатия в компрессоре

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

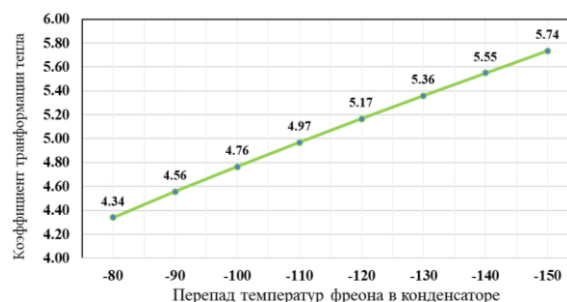


Рис. 6. Зависимость коэффициента преобразования тепла от перепада температур фреона в конденсаторе

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

Полученные зависимости (рис. 5 и 6) доказывают, что при снижении количества выделяемой в конденсаторе теплоты, также снижается и значение коэффициента преобразования ТНУ, так как снижается полезная выделяемая теплота  $Q_{\text{пол}}$ . Также коэффициент преобразования снижается и при увеличении степени сжатия в компрессоре при неизменной нагрузке в конденсаторе. Но достичь сверхвысоких показателей коэффициента преобразования невозможно, так как имеются ограничения у физических свойств фреона при различных условиях. Построенная математическая модель является моделью единичного теплового насоса, путем объединения которых и будет достигаться уровень покрытия требуемой тепловой мощности для здания.

Применение АБХМ с холодильной мощностью 2000 кВт может стать перспективным решением, т.к. в качестве источника холода в типовых проектах холодоснабжения ЦОД применяются группы чиллеров внутреннего размещения мощностью по 2000 кВт с выносными воздушными конденсаторами.

Параметры теплоносителя, поступающего в генератор – вода при температуре 105 °С и расходе 47,619 кг/с, на выходе температура составляет 95 °С. Тепловая энергия от конденсатора и абсорбера в базовом варианте отводится на сухую градирню водой через рекуперативный теплообменный аппарат, для охлаждения с 40 до 30 °С. Коэффициент трансформации тепла в модели АБХМ равен 1, т.к. схема, моделируемая в программном пакете Aspen Plus, не учитывает потери тепловой энергии в элементах.

На рисунках 7 – 9 представлена диаграмма  $h$ - $\zeta'$ ,  $\zeta''$  для бромистого лития для схемы на рисунке 2. На диаграмме отражены свойства потоков таблицы 2, построенной на основе данных потоков схемы на рисунке 2.

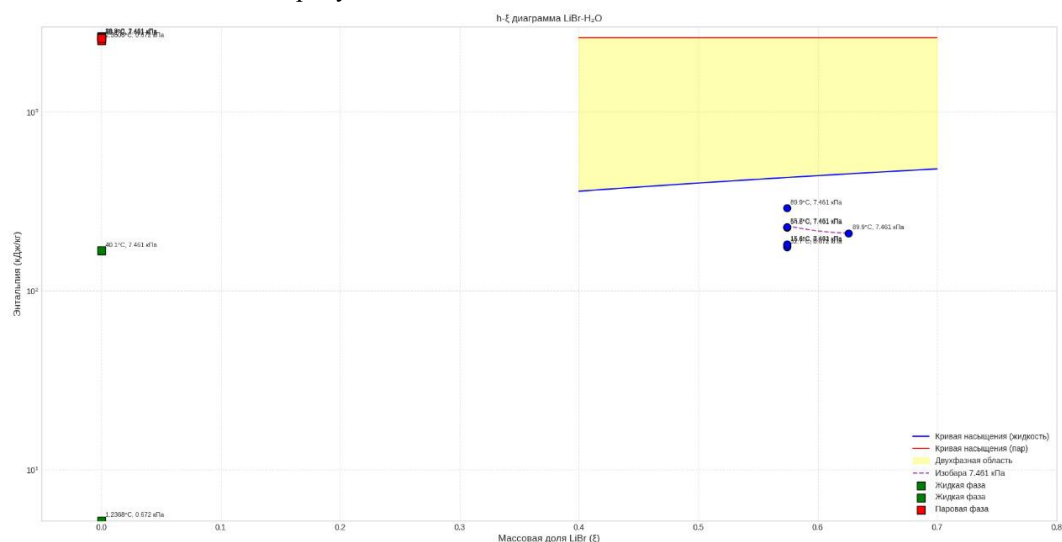


Рис. 7. Диаграмма  $h$ - $\zeta'$ ,  $\zeta''$  для LiBr в характерных точках

Fig. 7. Diagram  $h$ - $\zeta'$ ,  $\zeta''$  for LiBr at characteristic points

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

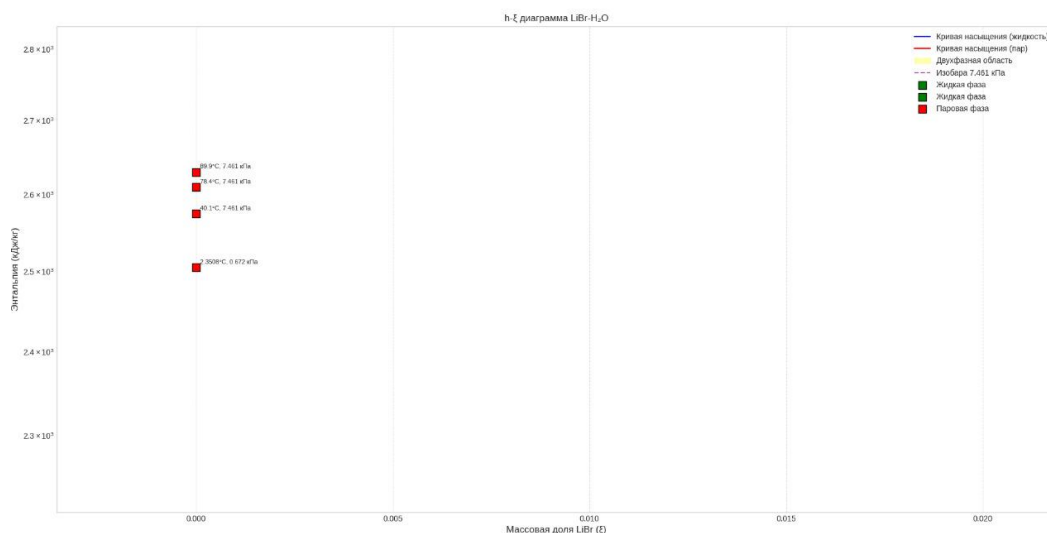


Рис. 8. Диаграмма  $h$ - $\zeta'$ ,  $\zeta''$  для водяного пара

Fig. 8. Diagram  $h$ - $\zeta'$ ,  $\zeta''$  for water vapor

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



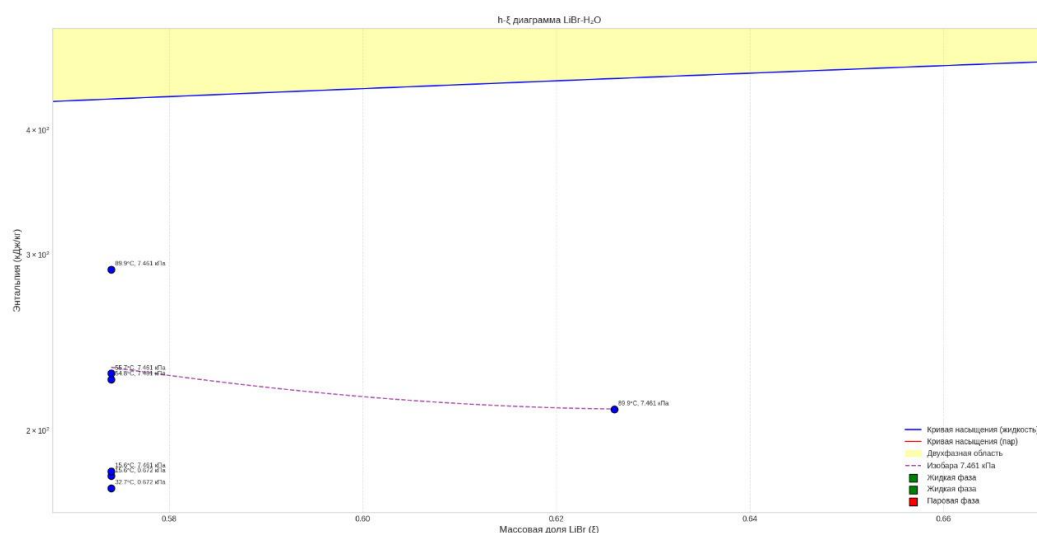


Рис. 9. Диаграмма  $h$ - $\zeta$ ,  $\zeta''$  для LiBr при различных концентрациях  
Fig. 9. Diagram  $h$ - $\zeta$ ,  $\zeta''$  for LiBr at various concentrations

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

Таблица 3

Table 3

Характеристики материальных потоков схемы на рисунке 2

Characteristics of the material flows of the scheme in figure. 2

| №  | Давление (кПа) | Температура (°C) | Масс. доля H <sub>2</sub> O (%) | Фаза     | Энтальпия (кДж/кг) |
|----|----------------|------------------|---------------------------------|----------|--------------------|
| 1  | 0,672          | 15,6             | 42,6                            | Жидкость | 180                |
| 2  | 7,461          | 15,6             | 42,6                            | Жидкость | 182                |
| 3  | 7,461          | 54,8             | 42,6                            | Жидкость | 205                |
| 4  | 7,461          | 55,7             | 42,6                            | Жидкость | 208                |
| 5  | 7,461          | 89,9             | 42,6                            | Жидкость | 290                |
| 6  | 7,461          | 89,9             | ≈100                            | Пар      | 2660               |
| 7  | 7,461          | 78,4             | ≈100                            | Пар      | 2635               |
| 8  | 7,461          | 40,1             | ≈100                            | Жидкость | 168                |
| 9  | 0,672          | 1,2              | ≈100                            | Жидкость | 5                  |
| 10 | 0,672          | 2,3              | ≈100                            | Пар      | 2505               |
| 11 | 7,461          | 89,9             | ≈100                            | Жидкость | 210                |
| 12 | 7,461          | 45,0             | 37,4322                         | Жидкость | 185                |
| 13 | 0,672          | 42,4             | 37,4322                         | Жидкость | 195                |
| 14 | 0,672          | 32,7             | 42,6                            | Жидкость | 165                |

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

Характер изобары 7,461 кПа объясняется тем, что растворение бромистого лития в воде является экзотермическим процессом, чем больше массовая доля в растворе, тем больше энергии выделяется при образовании раствора и тем меньше удельная энтальпия раствора, также снижается теплоёмкость. Параметры теплоносителя, поступающего в генератор – вода при температуре 105 °C с расходом 47,619 кг/с, на выходе температура составляет 95 °C. Тепловая энергия от конденсатора и абсорбера в базовом варианте отводится на сухую градирню водой через рекуперативный теплообменный аппарат, для охлаждения с 40 до 30 °C.

#### Заключение (Conclusions)

Центры обработки данных потребляют значительное количество электроэнергии, существенная часть из которой, в виде теплоты, отводимой от ИТ-оборудования, сбрасывается в окружающую среду. Количество и мощность ЦОД в России будут быстро

расти, как и во всем мире. Соответственно, будет увеличиваться потенциал использования вторичной тепловой энергии. Решение этой проблемы заключается в создании multifunctional комплексов на основе ЦОД и теплопотребителей. Моделирование теплового насоса и абсорбционной холодильной машины представляет собой актуальные задачи с точки зрения определения конфигурации схемы утилизации тепловой энергии и построения энергетического баланса дата-центра.

### Литература

1. Caceres C.R., Sandberg M., Sotoca A. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // *Cities* 150, 2024. p. 22.
2. Lu H., Zhang Z., Yang L. A review on airflow distribution and management in data center // *Energy & Buildings* 179, 2018. p. 265-277.
3. Alkurush A.A., Salem M.S., Abdelrehim O., et al. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // *International Journal of Refrigeration* 160, 2024. p. 246-262.
4. Patankar S.V. Airflow and cooling in a data center // *Journal of Heat Transfer*, 2010. p. 17.
5. Fakhim B., Behnia M., Armfield S.W., et al. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // *Applied Thermal Engineering* 31, 2011. p. 2279-2291.
6. Lan J., Zhang Z., Liang X., et al. Experimental and numerical investigation on thermal performance of data center via fan-wall free cooling technology // *Applied Thermal Engineering*. 2023. 228: 120467.
7. Antal M., Cioara T., Anghel I., et al. Transforming Data Centers in Active Thermal Energy Players in Nearby Neighborhoods // *Sustainability* 10, 939, 2018. p. 20.
8. Du S, Cui Z., Wang R.Z., et al. Development and experimental study of a compact silica gel-water adsorption chiller for waste heat driven cooling in data centers // *Energy Conversion and Management* 300, 2024. p.10.
9. Дзино А.А., Малинина О.С. Системы прямых и обратных термодинамических циклов для получения тепла и холода // VII Международная научно-техническая конференция «Низ-котемпературные и пищевые технологии в XXI веке» Ч. I: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – С. 141–144.
10. Cola F., Hey J., Romagnoli A. Characterization of the droplet formation phase for the H<sub>2</sub>O–LiBr absorber An analytical and experimental analysis // *Applied Energy* 222, 2018. p.885-897.
11. Huang C., Shao S., Wang N., et al. Performance analysis of compression-assisted absorption refrigeration-heating system for waste heat recovery of liquid-cooling data center// *Energy* 305, 2024. p. 13.
12. Borkowski M., Pilat A.K. Customized data center cooling system operating at significant outdoor temperature fluctuations // *Applied Energy* 306, 2022. p. 11.
13. Antal M., Cioara T., Anghel I., et al. Techno-economic study of an energy sharing network comprised of a data centre and multi-unit residential buildings for cold climate // *Energy & Buildings* 186, 2019. p. 261–275.
14. Gao T., David M., Geer J., et al. Experimental and numerical dynamic investigation of an energy efficient liquid cooled chiller-less datacenter test facility // *Energy and Buildings* 91, 2015. p.83-96.
15. Carbo A., Oro E., Salom J., et al. Experimental and numerical analysis for potential heat reuse in liquid cooled data centres // *Energy Conversion and Management* 112, 2016. p. 135–145.
16. Ахременков А.А., Цирлин А.М. Математическая модель жидкостного погружного охлаждения вычислительных устройств / // Программные системы: теория и приложения, 2016, 7:1(28), с. 187–199.
17. He Z., Xi H., Ding T., et al. Energy efficiency optimization of an integrated heat pipe cooling system in data center based on genetic algorithm // *Applied Thermal Engineering* 182, 2021. p.9.
18. Yuana X., Liang Y., Hu X., et al. Waste heat recoveries in data centers: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188, 2023. p. 17.
19. Юдин А.К. Разработка энергетической модели дата-центра. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025;27(4):147-156. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156>.

20. Tofani A. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // TRITA: TRITA-ITM-EX 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.

21. Lu T., Lü X., Valisuo P., et al. Innovative approaches for deep decarbonization of data centers and building space heating networks: Modeling and comparison of novel waste heat recovery systems for liquid cooling systems // Applied Energy 357, 2024. p. 16.

#### Авторы публикации

**Юдин Александр Константинович** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Высшая школа атомной и тепловой энергетики, Россия, Санкт-Петербург, E-mail: yudin.a.k@mail.ru.

**Владимиров Ярослав Александрович** – доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Высшая школа атомной и тепловой энергетики, Россия, Санкт-Петербург, E-mail: vladim\_yaa@spbstu.ru.

**Мухаметова Лилия Рафаэлевна** – канд. экон. наук, доцент, кафедры экономики и организации производства Казанского государственного энергетического университета, E-mail: liliyamyhametova@mail.ru.

#### References

1. Caceres C.R., Sandberg M., Sotoca A. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // Cities 150, 2024. p. 22.
2. Lu H., Zhang Z., Yang L. A review on airflow distribution and management in data center // Energy & Buildings 179, 2018. p. 265-277.
3. Alkurush A.A., Salem M.S., Abdelrehim O., et al. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration 160, 2024. p. 246-262.
4. Patankar S.V. Airflow and cooling in a data center // Journal of Heat Transfer, 2010. p. 17.
5. Fakhim B., Behnia M., Armfield S.W., et al. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // Applied Thermal Engineering 31, 2011. p. 2279-2291.
6. Lan J., Zhang Z., Liang X., et al. Experimental and numerical investigation on thermal performance of data center via fan-wall free cooling technology // Applied Thermal Engineering. 2023. 228: 120467.
7. Antal M., Cioara T., Anghel I., et al. Transforming Data Centers in Active Thermal Energy Players in Nearby Neighborhoods // Sustainability 10, 939, 2018. p. 20.
8. Du S, Cui Z., Wang R.Z., et al. Development and experimental study of a compact silica gel-water adsorption chiller for waste heat driven cooling in data centers // Energy Conversion and Management 300, 2024. p.10.
9. Dzino A.A., Malinina O.S. Sistemy` pryamy`x i obratny`x termodinamicheskix ciklov dlya polucheniya tepla i xoloda // VII Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya «Niz-kotemperaturny`e i pishhevy`e texnologii v XXI veke» Ch. I: Materialy` konferencii. – SPb.: Universitet ITMO, 2015: 141-144 (In Russ.).
10. Cola F., Hey J., Romagnoli A. Characterization of the droplet formation phase for the H<sub>2</sub>O–LiBr absorber An analytical and experimental analysis // Applied Energy 222, 2018. p.885-897.
11. Huang C., Shao S., Wang N., et al. Performance analysis of compression-assisted absorption refrigeration-heating system for waste heat recovery of liquid-cooling data center// Energy 305, 2024. p. 13.
12. Borkowski M., Pilat A.K. Customized data center cooling system operating at significant outdoor temperature fluctuations // Applied Energy 306, 2022. p. 11.
13. Antal M., Cioara T., Anghel I., et al. Techno-economic study of an energy sharing network comprised of a data centre and multi-unit residential buildings for cold climate // Energy & Buildings 186, 2019. p. 261–275.
14. Gao T., David M., Geer J., et al. Experimental and numerical dynamic investigation of an energy efficient liquid cooled chiller-less datacenter test facility // Energy and Buildings 91, 2015. p.83-96.

15. Carbo A., Oro E., Salom J., et al. Experimental and numerical analysis for potential heat reuse in liquid cooled data centres // *Energy Conversion and Management* 112, 2016. p. 135–145.
16. Akhremenkov A.A., Zirlin A.M. Matematicheskaya model` zhidkostnogo pogruzhnogo oxlazhdeniya vy`chislitel`ny`x ustroystv / *Programmny`e sistemy`: teoriya i prilozheniya*, 2016, 7:1(28), 187–199. (In Russ.).
17. He Z., Xi H., Ding T., et al. Energy efficiency optimization of an integrated heat pipe cooling system in data center based on genetic algorithm // *Applied Thermal Engineering* 182, 2021. p.9.
18. Yuana X., Liang Y., Hu X., et al. Waste heat recoveries in data centers: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188, 2023. p. 17.
19. Yudin A.K. Development of an energy model of a data center. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(4):147-156. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156>.
20. Tofani A. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // *TRITA: TRITA-ITM-EX* 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.
21. Lu T., Lü X., Valisuo P., et al. Innovative approaches for deep decarbonization of data centers and building space heating networks: Modeling and comparison of novel waste heat recovery systems for liquid cooling systems // *Applied Energy* 357, 2024. p. 16.

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

**Alexander K. Yudin** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Saint Petersburg, Russia, E-mail: [yudin.a.k@mail.ru](mailto:yudin.a.k@mail.ru).

**Yaroslav A. Vladimirov** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Saint Petersburg, E-mail: [vladim\\_yaa@spbstu.ru](mailto:vladim_yaa@spbstu.ru).

**Lilia R. Mukhametova** – Kazan State Power Engineering University, E-mail: [liliyamyhametova@mail.ru](mailto:liliyamyhametova@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 25.10.2025 г.

**Отредактировано** 14.11.2025 г.

**Принято** 24.12.2025 г.



## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Крутова И.А., Золотоносов Я.Д.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Россия  
iraida\_knyazeva@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ работы состоит в исследовании влияния угла при вершине конуса на эффективность процесса теплообмена путем сравнения нескольких вариантов змеевиковых теплообменных аппаратов (ТА) типа «труба в трубе». Поиск оптимальной геометрии, включая форму корпуса и использование интенсификаторов, совершенствование методов расчёта, позволяющих точно прогнозировать поведение аппаратов. ЦЕЛЬ. Установление зависимости между углом при вершине конуса и теплогидродинамической эффективностью аппаратов и оценка эффективности замены гладкостенного теплообменного элемента на пружинно-витой канал. МЕТОДЫ. Для достижения поставленной цели был проведён анализ научно-технической литературы, по результатам которого сформированы границы исследуемого параметра. Решение сопряжённой задачи теплообмена выполнялось средствами программного комплекса CFD Ansys Fluent. РЕЗУЛЬТАТЫ. Температура нагреваемого теплоносителя достигла своего максимального значения для варианта цилиндрического ТА и составила 53,44°C. Однако, сравнение конических и цилиндрических ТА по критерию Кирпичева показывает преимущество первых: конический теплообменник с углом при вершине равным 50° показал значение 17,92 против 15,7 у цилиндрического, что свидетельствует о более высоких энергетических показателях конической конфигурации. Замена гладкой трубы на пружинно-витой канал приводит к увеличению конечной температуры нагреваемого теплоносителя до 61,3 °С, что на 11,97 °С выше исходного значения. При этом коэффициент эффективности Кирпичева для данного теплообменника достиг 18,32. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В рамках проведённого исследования были выполнены расчёты конических змеевиковых ТА типа «труба в трубе» на основе гладкостенного элемента круглого сечения. Установлено, что рост угла при вершине конуса оказывает заметное влияние на процессы теплообмена, причём наиболее выраженным это воздействие становится в диапазоне от 50° до 70°. На основании совокупности полученных данных авторы принимают значение угла при вершине конуса равным 50° оптимальным. Подтверждается техническая и энергетическая целесообразность применения конических теплообменников на базе пружинно-витых каналов.

**Ключевые слова:** теплообмен; гидродинамика; конический змеевиковый теплообменник; теплогидродинамическая эффективность; интенсификация теплообмена.

**Для цитирования:** Крутова И.А., Золотоносов Я.Д. Влияние геометрических параметров на теплогидродинамическую эффективность конических теплообменников типа «труба в трубе» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 192-206. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-192-206.

## INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE THERMAL AND HYDRODYNAMIC EFFICIENCY OF CONICAL PIPE-IN-PIPE HEAT EXCHANGERS

Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D.

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia  
iraida\_knyazeva@mail.ru

**Abstract:** RELEVANCE of this work is due to the need to study the effect of the cone apex angle on the heat transfer efficiency by comparing several variants of coil-type heat exchangers (HE)

of the "pipe in pipe" type. **PURPOSE.** To determine the degree of influence of the angle at the cone apex on the thermohydrodynamic efficiency of heat exchangers based on spring-twisted channel. **METHODS.** The calculations of the conical coil HE was performed based on theoretical research and the solution of the conjugate heat transfer problem. **RESULTS.** The maximum temperature value of the heated coolant was recorded for the cylindrical HE and was 53.44 °C. At angles ranging from 0 to 50°, the temperature difference was 5.12 °C (9.6%), while the cylindrical HE was 32.3% longer. The element's length was reduced by 14% when the angle was changed from 30 to 50°. The advantage of conical HE is confirmed by a higher value of the Kirpichev factor — 17,92 against 15,70 for cylindrical analogues. Replacing a smooth pipe with a spring-twisted channel allows you to obtain a final temperature of the heated coolant of 61.3 °C, which exceeds the base indicator by 11.97 °C; the Kirpichev efficiency factor for this option is 18,32. The calculations were performed for conical coil heat exchangers of the "pipe in a pipe" type based on a spring-twisted channel with a circular cross-section. It was found that an increase in the angle at the apex of the cone has a significant impact on the heat exchange processes, with the most pronounced effect occurring in the range of 50° to 70°. Based on the obtained data, the authors assume that the angle at the apex of the cone is equal to 50°. The technical and energy feasibility of using conical HE, as well as replacing smooth pipes with spring-twisted channels, is confirmed by the results of the calculations.

**Keywords:** heat transfer; hydrodynamics; conical coil heat exchanger; thermal and hydraulic efficiency; and heat transfer intensification.

**For citation:** Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D. Influence of geometric parameters on the thermal and hydrodynamic efficiency of conical pipe-in-pipe heat exchangers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 192-206. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-192-206.

### **Введение (Introduction)**

Змеевиковые теплообменники давно применяются в промышленной сфере, демонстрируя высокую компактность и эффективность.

Компактные размеры змеевиковых теплообменных аппаратов (ТА) обусловили их широкое распространение в промышленности. Центральным конструктивным элементом таких устройств служит змеевик — труба преимущественно круглого сечения, которая может иметь плоскую или пространственную конфигурацию. Геометрическая форма змеевика может быть плоской спиральной, зигзагообразной, объемной цилиндрической или конической. Выбор той или иной конфигурации зависит от технологических условий эксплуатации ТА и теплофизические характеристики рабочих сред, требуемой тепловой мощности и массогабаритных показателей установки, а также схемы взаимодействия потоков теплоносителей.

Конструктивно ТА со змеевиками делятся на две группы в зависимости от расположения теплообменной поверхности. Если змеевик размещён внутри корпуса, такой аппарат относят к погружному типу. Наружное исполнение предполагает крепление змеевика к внешней стенке корпуса, как правило, посредством сварки. Первые называют погружными, вторые — с наружными змеевиками, которые обычно привариваются к корпусу [1]. Помимо этих двух исполнений, выделяется отдельная разновидность — змеевиковые теплообменники, построенные по принципу «труба в трубе».

Погружные аппараты представляют собой вертикальный цилиндрический корпус с выпуклыми крышками на торцах. Внутри него располагается змеевик — труба из стали, меди или титана, свёрнутая в спираль. В ряде случаев применяется не один, а два или три змеевика, соединённых параллельно, внутрь которых подаётся греющий теплоноситель. Нагреваемая среда поступает в ёмкость через патрубок и заполняет пространство вокруг змеевика.

Из-за большого объема нагреваемая среда циркулирует медленно, а режим теплообмена приближается к условиям естественной конвекции. Интенсификация процесса достигается либо установкой перемешивающих устройств, либо размещением змеевика в кольцевом пространстве между двумя сосудами [1].

Среди существующих технических решений выделяются змеевиковые теплообменники типа «труба в трубе» [2], конструкция которых предполагает коаксиальное расположение двух труб — внешней и внутренней — с образованием

зазора между ними. Внутренняя труба имеет патрубки для входа и выхода горячего теплоносителя, а внешняя — для нагреваемой жидкости. Нагреваемая жидкость поступает в межтрубное пространство, образованное внутренней и внешней трубами, в то время как горячий теплоноситель подается в противоток, передавая тепло нагреваемой жидкости через разделительную стенку.

По утверждению автора изобретения, при производительности 667 л/ч предложенная конструкция теплообменника позволяет сократить его длину в 4 раза, а диаметр — вдвое. Расход теплоносителя при этом снижается в 2 раза, масса устройства — в 10 раз относительно серийно выпускаемых промышленностью аналогов [3].

На сегодняшний день погружные теплообменники занимают лидирующее положение в промышленности, тогда как конструкции змеевиковых ТА типа «труба в трубе» до сих пор остаются менее исследованными.

Повышение эффективности теплообменного оборудования является одной из приоритетных задач современного энергетического и химического машиностроения. Змеевиковые теплообменники, благодаря своей компактности и высокой интенсивности теплообмена, обусловленной возникновением вторичных течений (вихрей Дина), широко используются в различных отраслях промышленности. Особый интерес для исследования представляют конические змеевики, геометрия которых (изменяющийся диаметр витков) создает дополнительные возможности для управления гидродинамикой потока. В отличие от цилиндрических аналогов, они позволяют более гибко адаптировать характеристики аппарата под конкретные технологические задачи.

Проектирование ТА предполагает достижение расчётных показателей теплопередачи. Одновременно необходимо учитывать технологичность изготовления и эксплуатационную надёжность на протяжении всего расчётного периода использования оборудования. Безопасность процессов производства, установки и работы аппарата относится к числу обязательных требований. Помимо этого, конструктивное решение должно предусматривать доступ к теплообменным поверхностям для их очистки, а также возможность проведения осмотра и выполнения ремонтных работ.

В рыночных условиях и при значительной конкуренции производителей теплообменного оборудования современные ТА должны характеризоваться высокой эффективностью работы и конструктивной простотой. Одновременно необходимо обеспечивать минимальные гидравлические потери и компактность при небольшой массе устройства.

Для определения наиболее выгодных с точки зрения эффективности параметров змеевиковых ТА применяются критерии, среди которых наибольшее распространение получили следующие:

а) критерий Кирпичева, оценивающий энергетическую эффективность, ТА

$$E = \frac{Q}{N},$$

где  $Q$  – теплообменный поток, передаваемый в ТА, Вт;

$N$  – мощность, затрачиваемая на прокачку жидкости через ТА, Вт.

б) критерии компактности, позволяющие оценить объем

$$K_{IV} = \frac{Q}{V}, \text{ Вт/м}^3$$

или массу ТА

$$K_{IM} = \frac{Q}{M}, \text{ Вт/кг},$$

где  $V$  – объем ТА, м<sup>3</sup>;

$M$  – масса теплообменника, кг.

В случае, когда значение нагреваемого теплоносителя на выходе из ТА не задано, а его геометрия может быть произвольной, наиболее выгодными можно считать теплообменники, у которых при одном и том же значении длины аппарата  $L$  значение температуры на выходе  $t_{\text{сout}}$  будет наибольшим.

Для определения критериев эффективности необходимо предварительно определить основные гидродинамические и теплофизические характеристики, которые используются при их расчете.

Целью исследования данной работы является определение степени влияния угла при вершине конуса на теплогидродинамическую эффективность ТА на базе гладкостенных теплообменных элементов путем проведения расчетов конических и цилиндрического змеевиковых ТА типа «труба в трубе» на базе гладкостенных теплообменных элементов.

Научная значимость исследования состоит в том, что на основе теоретических исследований и решения сопряженной задачи теплообмена проводится исследование влияния угла при вершине конуса на эффективность процесса теплообмена путем сравнения нескольких вариантов змеевиковых ТА, что является одной из составляющих методики определения оптимальных геометрических размеров конических змеевиковых ТА типа «труба в трубе».

Практическая значимость исследования заключается в определении диапазона значений угла при вершине конуса с точки зрения эффективности работы змеевикового ТА.

В статье представлен обзор современных исследований, посвященных влиянию ключевых геометрических факторов: угла конусности, шага навивки, формы поперечного сечения трубы и наличия внутренних турбулизаторов. Особое внимание уделено сравнению гидродинамических режимов течения в конических змеевиковых ТА с различным углом при вершине конуса.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В последние годы учёные активно используют численные методы для анализа процессов теплопередачи в различных ТА, уделяя особое внимание змеевиковым теплообменникам, которые находят применение в различных отраслях промышленности.

На основе анализа современных теоретических и экспериментальных исследований можно утверждать, что геометрические характеристики змеевиковых теплообменников оказывают определяющее влияние на их эффективность. Коническая форма создает условия для более интенсивного теплообмена по сравнению с цилиндрическими аналогами, однако степень этой интенсификации напрямую зависит от таких параметров, как угол конуса, форма поперечного сечения трубы, шаг навивки и конфигурация самого змеевика.

Влияние геометрических параметров на интенсивность теплообмена в цилиндрических змеевиковых аппаратах типа «труба в трубе» стало предметом исследований, выполненных в работах [3–5].

Среди геометрических характеристик цилиндрического змеевикового теплообменника радиус змеевика и диаметр внутренней трубы оказывают заметное влияние на его производительность при ламинарном режиме течения. Что касается направления движения теплоносителей, то противоточная схема по своей эффективности превосходит прямоточную.

Авторами работы [3], было проведено численное исследование влияние различных геометрических параметров на теплопередачу и характеристики потока жидкости в цилиндрическом змеевиковом ТА. Было установлено, что уменьшение диаметра змеевика приводит к росту критерия Нуссельта, что объясняется усилением влияния поперечной циркуляции с уменьшением радиуса спирали.

Авторами работы [3] также утверждается, что к росту критерия Нуссельта приводит увеличение шага спирали и диаметра теплообменного элемента, так как эффект вторичного потока сильнее. Следует отметить, что в работе рассматривались следующие диаметры теплообменного элемента: 0,032 м; 0,042 м; 0,052 м; при этом расход нагреваемого теплоносителя в трубном пространстве изменялся от 0,02 до 0,06 кг/с.

Также в работе [3] отмечается, что меньший перепад давления наблюдается в змеевике с меньшим радиусом спирали, так как такой змеевик имеет меньшую длину труб. А меньший диаметр внутренней трубы приводит к росту перепада давления. В рассматриваемом случае при изменении диаметра внутренней трубы с 0,052 м до 0,032 м перепад давления увеличивается почти на 87 %.

В работе [4] численно изучается влияние геометрических параметров и свойств наножидкости на теплопередачу и перепад давления в спиральном ТА. Коэффициент трения и коэффициент теплопередачи рассчитываются с учетом влияния свойств наножидкости, в том числе диаметра наночастиц, температуры наножидкости, числа Рейнольдса и объемной доли, с одной стороны, и влияния геометрических параметров, в том числе диаметра трубы, диаметра змеевика и шага витков, с другой стороны. Замена воды на жидкость с содержанием наночастиц, увеличение шага и коэффициента кривизны витка улучшает теплопередачу и снижает коэффициент трения.

Авторы работы [5] исследовали теплопередачу, коэффициент трения, перепад давления и число Нуссельта в спиральной змеевике с переменным давлением и скоростью на входе при различных значениях числа Дина [отношения диаметра спирали ( $D$ ) к диаметру трубы ( $d$ )]. Рассматривался аппарат с диаметром 0,3 метра, состоящий из четырех витков с внутренним диаметром 0,01 метра и общей длиной 3,77 метра. Модель была построена с применением метода сеточной дискретизации, что позволило провести детальный анализ режимов течения, включая ламинарный и турбулентный. Исследование проводилось при постоянной температуре стенки и заданном тепловом потоке.



Анализ результатов показал, что увеличение числа Дина приводит к повышению эффективности теплопередачи в спиральной трубе. Влияние изменения давления на процесс теплопередачи менее значимо при ламинарном режиме течения. Однако в условиях турбулентного режима наблюдается обратный эффект, что требует дополнительного изучения и учета при проектировании теплообменных систем.

В научно-технической литературе, как зарубежной [6–11], так и отечественной [1, 12–15], накоплен ряд разработок, касающихся конических змеевиковых теплообменников. Коллективом авторов под руководством Pramod S., Purandare [6,7] были изучены процессы теплообмена и потери давления в погружных конических змеевиках при различных значениях диаметра труб и угла конусности. В рамках работы было рассмотрено 15 конфигураций змеевиков, различавшихся углом конуса: от  $0^\circ$  (соответствующего цилиндрической форме) через промежуточные значения  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$  до  $180^\circ$ , при котором змеевик приобретает плоскую спиральную форму.

В ходе экспериментов изучалось поведение горячей и холодной воды в диапазоне расходов от 10 до 100 л/ч. Указанному диапазону соответствовали числа Рейнольдса от 500 до 5000. Фиксировались два ключевых параметра: температура и перепад давлений в ТА — при варьировании массовых расходов обоих потоков.

Выявлено, что величина числа Нуссельта и коэффициента трения определяются совокупностью параметров: скоростью потока, диаметром трубы, углом конуса и коэффициентом кривизны. При возрастании расхода внутри труб число Нуссельта увеличивается, тогда как рост скорости в межтрубном пространстве даёт противоположный эффект. Угол конуса и диаметр трубы действуют в том же направлении — их увеличение сопровождается снижением значения числа Нуссельта.

В теплообменниках с цилиндрическими змеевиками наблюдается однородная структура вторичных течений, что указывает на эффективное перемешивание жидкости и, как следствие, на улучшенную теплопередачу. Когда угол конуса возрастает от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , то есть при переходе от цилиндрической конфигурации к спиральной, интенсивность упомянутых течений заметно снижается. Причиной служит уменьшение рабочей длины трубки змеевика.

Геометрия конических и спиральных змеевиков с плотной навивкой витков формирует условия, при которых скорость движения жидкости в межтрубном пространстве существенно изменяется. Внутри змеевика при этом складываются локальные зоны с пониженной подвижностью среды. Замедление потока, возникающее вследствие указанных особенностей компоновки, влечёт за собой снижение интенсивности теплообмена, что выражается в уменьшении числа Нуссельта и соответствующих коэффициентов теплопередачи.

Дополнительно установлено, что число Нуссельта подвержено влиянию числа Дина как в самой трубе, так и в межтрубном пространстве. Соотношение массовых расходов горячего и холодного теплоносителей существенно влияет на теплопередачу и общую эффективность теплообменника. Эффективность сначала растёт с увеличением угла конуса, достигает пика, а затем снижается. Оптимальным для данной конфигурации признан угол конуса в  $72^\circ$ . Следует отметить, что перепад давления в конических змеевиковых теплообменниках оказывается выше, чем в спиральных.

В работе [8] построена трёхмерная численная модель, описывающая гидродинамику и теплообмен воды в межтрубном канале конических аппаратов типа «труба в трубе» — как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения.

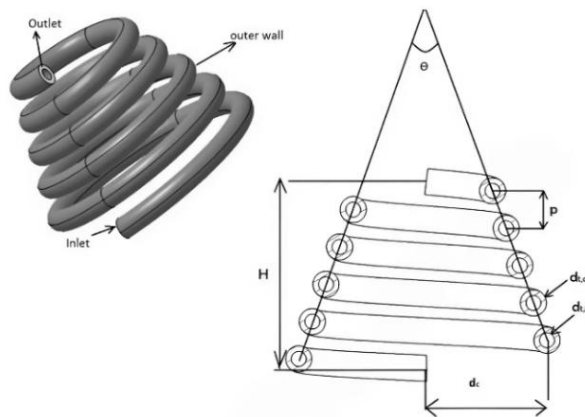


Рис. 1. Модель ТА с его геометрическими характеристиками. [8]

Fig. 1. The model of HE with its geometrical characteristics [8]

Для моделирования турбулентных эффектов и их воздействия на теплообмен применялась стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности. Увеличение угла конусности в диапазоне от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  сопровождается увеличением коэффициента гидравлического сопротивления на 15,51 %, тогда как число Нуссельта при тех же условиях возрастает существенно значительнее — на 37,17 %. Иная картина наблюдается при изменении соотношения диаметров внешней и внутренней труб: увеличение этого параметра на 50 % ведёт к подъёму числа Нуссельта на 39,11 % при одновременном снижении коэффициента гидравлического сопротивления на 23,29 %. Влияние отношения диаметра внешней трубы к диаметру змеевика на интенсивность теплообмена оказывается менее выраженным по сравнению с перечисленными факторами. При увеличении соответствующего соотношения на 50 % коэффициент трения и число Нуссельта прирастают лишь на 4,47 % и 8,38 % соответственно, что свидетельствует об ограниченном вкладе данного геометрического параметра в тепловые характеристики системы.

В статье [9] был исследован процесс теплообмена в межтрубном пространстве как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения. Было исследовано четыре образца с разными значениями угла при вершине конуса  $\theta$  -  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  и  $70^\circ$ . Результаты моделирования показывают, что вторичный поток возникает из-за конической формы. По мере увеличения конического угла коэффициент кривизны увеличивается, а вторичный поток усиливается, что, в свою очередь, заставляет частицы жидкости перемещаться от изгиба внутренней стенки трубы к изгибу внешней стенки кольцевого пространства и повышает температуру жидкости, а значит, и эффективность теплопередачи. В работе [4] был определен комбинированный индекс эффективности ТА ( $\eta$ ). Змеевиковый конически ТА с отношением шага змеевика к диаметру равного 0,057 и углом при вершине конуса, равного  $30^\circ$  показал наилучшие результаты как для ламинарного, так и для турбулентного режима течения.

Экспериментальная часть работы [10] посвящена исследованию теплового и гидродинамического поведения конического спирального теплообменника типа «труба в трубе» (ТТССНЕ). Варьировались конструктивные параметры: степень скручивания спирали ( $\lambda$ ), угол наклона аппарата ( $\alpha$ ) к горизонтальной оси, число Дина ( $Dn$ ), а также схемы течения рабочей среды — как во внутренней трубе, так и в межтрубном канале. Целью служило повышение эффективности теплообмена за счёт выявления влияния каждого из перечисленных факторов на интегральные характеристики аппарата.

Для экспериментального исследования были созданы три образца, отличавшихся шагом между витками. Угол наклона спиральных элементов варьировался в трёх положениях:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Диапазон числа Рейнольдса при течении в трубном пространстве составлял от 12300 до 62600, тогда как в межтрубном пространстве соответствующие значения находились в пределах 2500–18500.

Результаты исследования показали, что минимальный шаг между витками обеспечивает наиболее сильный рост числа Нуссельта: для трубного пространства этот показатель возрастает на 40,9%, для межтрубного — на 32,2%. Угол наклона змеевика в  $90^\circ$  по сравнению с вариантом  $45^\circ$  также существенно влияет на интенсивность теплообмена, повышая число Нуссельта в трубном пространстве на 23,7%, а в межтрубном — на 21,6%. Именно при сочетании указанных геометрических параметров критерии термогидравлической эффективности достигают своих максимальных значений.

Работа [11] охватывает пассивные способы усиления теплопередачи в змеевиковых ТА. Среди рассматриваемых подходов выделяются оребрение трубных поверхностей, размещение внутренних вставок, изменение геометрических параметров каналов, а также использование перегородок.

Проведённый анализ литературы, охватывающий свыше 150 публикаций, позволяет систематизировать имеющиеся пассивные методы и сформулировать ряд ключевых положений.

Площадь теплообмена возрастает при использовании оребренных поверхностей, а сам поток приобретает турбулентный характер — это в совокупности обеспечивает рост коэффициента теплопередачи на величину до 30%.

При любом из пассивных методов рост массового расхода и числа Рейнольдса сопровождается увеличением коэффициента теплопередачи.

Спирально-винтовая лента, в отличие от витой, обеспечивает более высокую интенсивность теплообмена: завихрение потока усиливается, а время контакта жидкости с зоной активного теплообмена возрастает.

Основная часть актуальных работ посвящена экспериментальным и расчётным подходам к интенсификации теплообмена в областях с высокой тепловой нагрузкой.

При этом увеличение перепада давления ( $\Delta P$ ) сопряжено с ухудшением прочностных характеристик трубных стенок — этот аспект остаётся недостаточно изученным и требует отдельного рассмотрения.

Змеевиковые теплообменники представляют собой одну из наиболее активно изучаемых конструкций с точки зрения совершенствования процессов теплопередачи. Интерес к данному направлению во многом обусловлен запросами промышленного сектора, ориентированного на разработку систем терморегулирования с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Среди перспективных направлений совершенствования змеевиковых ТА выделяется модификация геометрии трубных поверхностей. Достигается это преимущественно за счёт размещения турбулизаторов и перегородок, под действием которых осевое течение трансформируется в вихревое. Испытаниям подверглись вставки различной конфигурации — трапецевидной, прямоугольной, треугольной, конической, пилообразной, а также многоэлементные компоновки. Отдельно анализировалось влияние пространственной ориентации дефлекторов трапецевидного и пилообразного профилей при турбулентном режиме течения. Полученные данные свидетельствуют о том, что наращивание числа вставок сопровождается ростом среднего числа Нуссельта в межтрубном пространстве, тогда как перепад давления при этом закономерно возрастает.

Оптимизация геометрических характеристик змеевиковых теплообменников — диаметра витков и межвиткового расстояния — достигается посредством применения современных инструментов численного моделирования.

В исследовании [12] отмечается связь между использованием интенсификаторов в змеевиковых теплообменниках и возрастанием скорости течения рабочей среды. Для кольцевых и «винтовых» вариантов подобных устройств характерно то, что ускорение теплоносителя охватывает всё поперечное сечение канала, а не ограничивается его отдельными зонами.

При использовании турбулизаторов, описанных в источнике [12], наблюдается усиление теплообменных процессов, сопровождаемое одновременным возрастанием гидравлического сопротивления. Геометрические параметры интенсификаторов при этом требуют оптимизации — без её проведения проектирование теплотехнических систем не даёт желаемого результата, на что прямо указывают авторы работы.

Ряд исследований [6,9,11] свидетельствует о том, что конические ТА превосходят цилиндрические по показателям эффективности.

В работах [13–16], рассматривалось решение сопряжённой задачи теплообмена применительно к ТА конической формы, а полученные результаты были представлены в виде численных решений.

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

Исследование заключалось в решении стационарной задачи для конических змеевиковых ТА, имеющих различный угол при вершине конуса.

Основой для выполнения конструктивного расчета является требуемая площадь поверхности теплообмена  $F$ . Диаметр внешней трубы  $D$ , из которой навивается змеевик, а также диаметр витка змеевика были выбран исходя из критерия компактности и технологической возможности гибки труб в холодном состоянии.

На рисунке 2 представлено несколько вариантов геометрических моделей рассматриваемых змеевиковых ТА типа «труба в трубе» для оценки влияния геометрических характеристик на интенсивность теплообменных процессов.

В целях оптимизации вычислительных ресурсов и повышения точности результатов будут рассматриваться теплообменники, оснащенные внутренними теплообменными элементами в форме гладких труб круглого сечения.

Геометрические параметры варианта конического змеевикового ТА (табл. 1), изображенного на рисунке 2 а, идентичны размерам ТА, на базе пружинно-витого канала, рассматриваемого в работе [16]. Вариант змеевикового теплообменника, представленный на рисунке 2 б, отличается радиусом изгиба верхнего основания, составляющим 100 мм, что соответствует технологически допустимому пределу при диаметре внешней трубы  $D_{вн}=36$  мм. На рисунке 2 в изображен цилиндрический змеевиковый ТА с габаритными размерами исследуемого конического теплообменника на базе теплообменного элемента. Вариант змеевикового конического теплообменника, изображенный на рисунке 2 г, обусловлен рекомендуемой величиной угла при вершине конуса в диапазоне  $68-72^\circ$ , а также технологическими ограничениями, связанными с минимальным радиусом изгиба стальных труб.

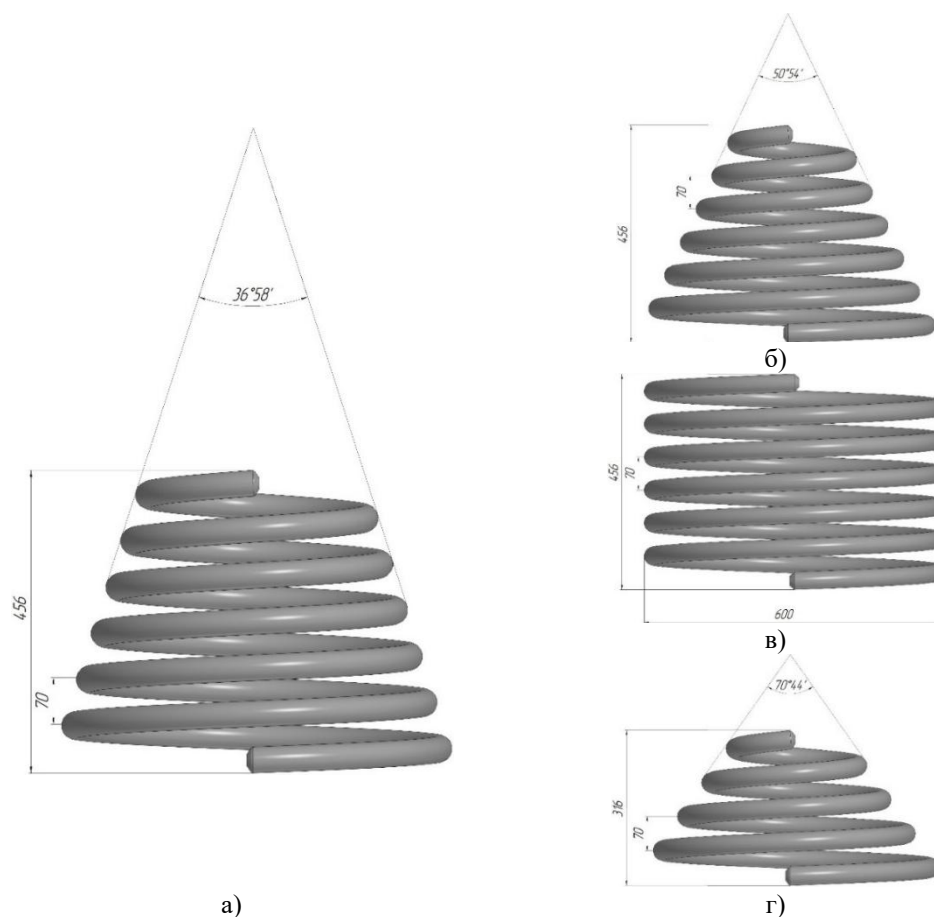


Рис. 2. Геометрические модели рассматриваемых вариантов ТА  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 1  
 Table 1

Геометрические параметры змеевиковых теплообменных аппаратов с гладкими теплообменными элементами  
 Geometric parameters of coil heat exchangers with smooth heat exchange elements

| №  | Параметр                                               | Вариант 1<br>(рис. 2 а) | Вариант 2<br>(рис. 2 б) | Вариант 3<br>(рис. 2 в) | Вариант 4<br>(рис. 2 г) |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1  | Число витков                                           | 6                       | 6                       | 6                       | 4                       |
| 2  | Внутренний диаметр трубы внешнего змеевика, мм         | 32                      | 32                      | 32                      | 32                      |
| 3  | Расстояние между витками внешней змеевиковой трубы, мм | 34                      | 34                      | 34                      | 34                      |
| 4  | Диаметр нижнего основания, мм                          | 600                     | 600                     | 600                     | 600                     |
| 5  | Диаметр верхнего основания, мм                         | 342                     | 200                     | 600                     | 200                     |
| 6  | Высота теплообменника, мм                              | 456                     | 456                     | 456                     | 316                     |
| 7  | Толщина стенки внешнего змеевика, мм                   | 2                       | 2                       | 2                       | 2                       |
| 8  | Средний диаметр теплообменного элемента                | 17                      | 17                      | 17                      | 17                      |
| 9  | Толщина стенки теплообменного элемента, мм             | 2                       | 2                       | 2                       | 2                       |
| 10 | Длина теплообменного элемента, м                       | 8,89                    | 7,56                    | 11,32                   | 5,04                    |

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

Рассматриваемые теплообменники представляют собой устройства с коаксиально расположенными трубами, свальцованными в змеевик. При этом как внутренняя, так и наружная трубы имеют гладкие стенки и круглое поперечное сечение.

Схема подачи теплоносителей показана на рисунке 3. В ТА реализуется противоточная схема движения теплоносителей, которая считается более эффективной [3].

Нагреваемая вода с начальной температурой  $T_{c,in}$  поступает во внутреннюю трубу через штуцер 1, в то время как через штуцер 2, расположенный во внешнем стальном змеевике, в межтрубное пространство подается греющая вода с температурой на входе -  $T_{h,in}$ .

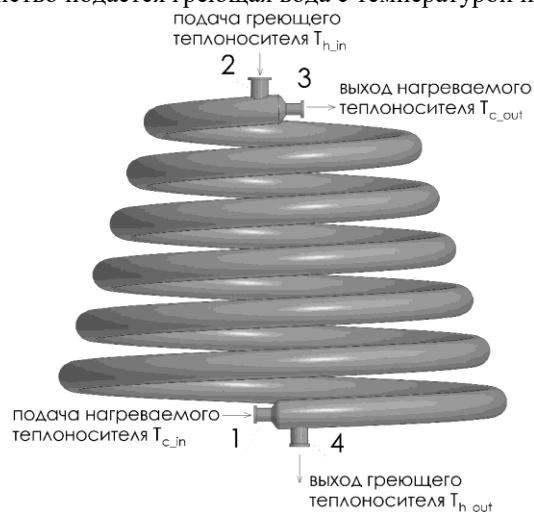


Рис. 3. Схема движения теплоносителей в коническом змеевиковом аппарате

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

Таблица 2

Table 2

Параметры нагревающего и нагреваемого теплоносителя (воды)

Parameters of the heating and heated coolant (water)

| № | Параметр                                  | Обозначение | Значение |
|---|-------------------------------------------|-------------|----------|
| 1 | Температура нагревающей воды на входе, °C | $T_{h,in}$  | 70       |
| 2 | Температура нагреваемой воды на входе, °C | $T_{c,in}$  | 5        |
| 3 | Расход нагревающей воды, кг/час           | $G_h$       | 802      |
| 4 | Расход нагреваемой воды, кг/час           | $G_c$       | 400      |

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

Для численной реализации сопряженной задачи теплообмена использовался программный комплекс CFD Ansys Fluent, который использует метод конечных объемов.

Для решения задачи был выбран решатель Pressure-Based, Steady, задавалась модель турбулентности  $k-\omega$  SST, подключено уравнение энергии. Использован метод решения Coupled, и схемы второго порядка для уравнений давления и моментов. Тип решателя Pressure-Based, данный решатель рекомендован для несжимаемых и слабо сжимаемых сред, задача решается в стационарной постановке. Результаты моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчетов

Calculation results

| Форма теплообменного аппарата              | Вариант 1<br>(рис. 2 а) | Вариант 2<br>(рис. 2 б) | Вариант 3<br>(рис. 2 в) | Вариант 4<br>(рис. 2 г) |
|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Температура нагреваемой воды на выходе, °C | 49,33                   | 49,6                    | 53,44                   | 38,53                   |
| Температура греющей воды на выходе, °C     | 46,58                   | 45,5                    | 44,12                   | 51,96                   |
| Скорость в трубном пространстве, м/с       | 0,634                   | 0,635                   | 0,633                   | 0,621                   |
| Скорость в межтрубном пространстве, м/с    | 0,431                   | 0,431                   | 0,428                   | 0,430                   |

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

Кроме сравнения конечных результатов расчета практический интерес представляет анализ изменения температуры по длине теплообменного элемента.

Чтобы проанализировать скорость изменения температуры по длине канала были получены средние значения температур в нескольких сечениях и построены графики, (рис. 4).

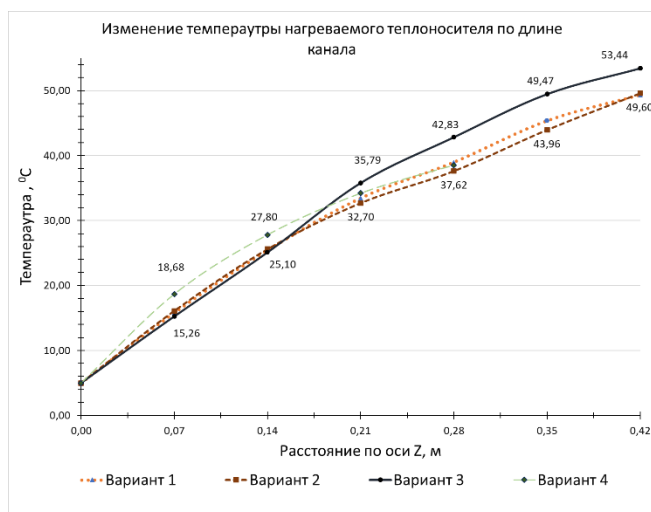


Рис. 4. Графики изменения температуры нагреваемого теплоносителя по длине канала  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На графиках рисунка 4 показана динамика изменения температуры нагреваемого теплоносителя по длине канала. Нагреваемый теплоагент подается в трубное пространство со стороны нижнего основания.

Самый быстрый рост температуры показывает вариант 4 (конический ТА с углом при вершине конуса, равный  $70,44^\circ$ ), однако из-за наименьшей длины теплообменного элемента и, соответственно, площади теплообменной поверхности данный вариант позволяет нагреть теплоноситель до температуры  $38,53^\circ\text{C}$ . Наибольшей температурой на выходе нагреваемого теплоносителя характеризуется вариант 3 (цилиндрический ТА), равной  $53,44^\circ\text{C}$ . На графиках видно, что на первых двух витках (расстояние по оси z от 0 до 0,14 м) изменение температуры для вариантов ТА 1-3 происходит с одинаковой скоростью, что объясняется схожей геометрией, однако, для варианта 4, уже с первого витка наблюдается более интенсивный разогрев нагреваемого теплоносителя. Опережение графика изменение температуры цилиндрического теплообменника (вариант 3) начинается с третьего витка, когда происходит значительное сокращение по длине теплообменных элементов для 1 и 2 вариантов ТА.

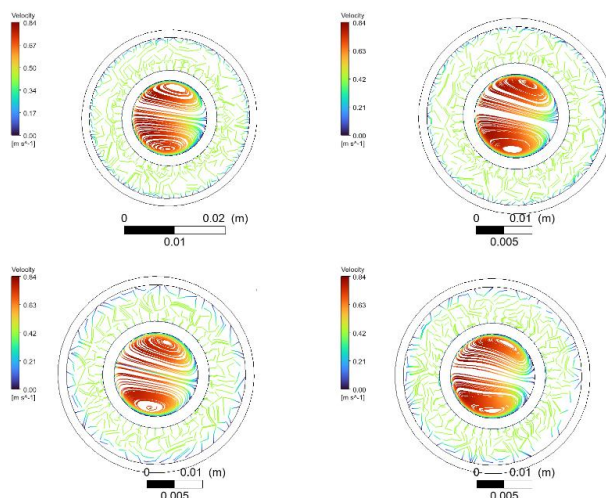


Рис. 5. Профили скоростей в центральной части ТА  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Нагреваемый теплоноситель движется внутри теплообменного элемента, в

поперечном сечении наблюдается картина градиента скоростей, смещенная к внешней стороне змеевика, особенно в варианте для конического ТА с углом при вершине конуса равного  $70,44^\circ$ .

В варианте с цилиндрическим ТА наблюдается более равномерное распределение скорости по сечению. Также значение осевой компоненты скорости для цилиндрического варианта (вариант 4) является наименьшим среди всех рассматриваемых конструкций и в данном сечении не превышает значения  $0,59$  м/с.

Скорость потока достигает максимального значения у внешней стенки теплообменного элемента, что способствует улучшению теплообмена за счет интенсивного перемешивания потока и разрушения пограничного слоя. Это обеспечивает более эффективную теплопередачу в змеевиках по сравнению с прямыми трубами.

Поперечная циркуляция, возникающая в изогнутых трубах, увеличивает скорость жидкости до значений, заметно превышающих среднее осевое. Это приводит к существенному усилению обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, как следствие, к резкому увеличению гидравлического сопротивления.

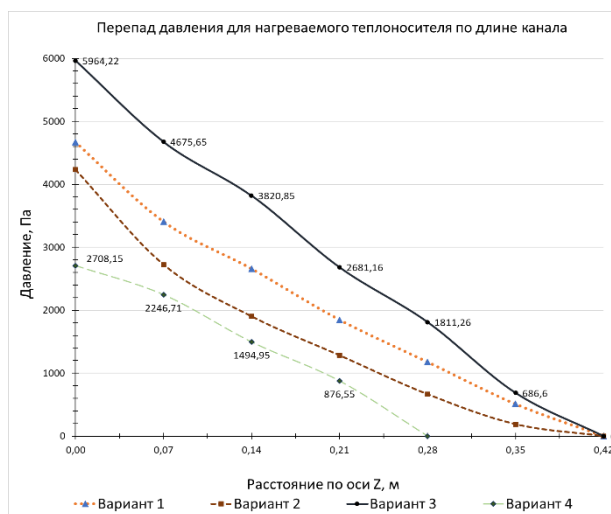


Рис. 6. Графики перепада давления нагреваемого теплоносителя по длине канала  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

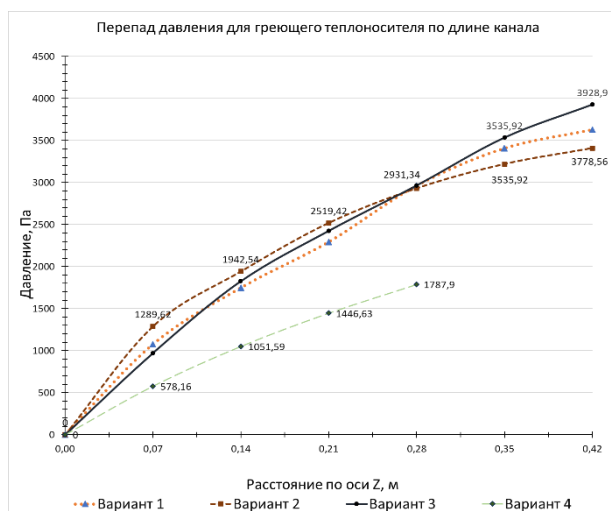


Рис. 7. Графики перепада давления греющего теплоносителя по длине канала  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из данных рисунков 6 и 7, можно сделать вывод о равномерном характере изменения давления нагреваемого теплоносителя. Наименьший перепад давления наблюдается в варианте конического змеевикового ТА с углом при вершине конуса, равного  $70,44^\circ$ . В трубном пространстве перепад давления выше, чем в межтрубном, что связано со скоростью движения теплоносителей.

Адекватность полученных результатов подтверждается результатами расчета теплового баланса.

Таблица 4

Table 4

Критерии эффективности теплообменных аппаратов с гладкостенными теплообменными элементами  
*Efficiency criteria for heat exchangers with smooth-walled heat exchange elements*

| Критерии эффективности ТА                           | Вариант 1<br>(рис. 2 а) | Вариант 2<br>(рис. 2 б) | Вариант 3<br>(рис. 2 в) | Вариант 4<br>(рис. 2 г) |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Передаваемая тепловая мощность, Q, Вт.              | 21250,19                | 21836,25                | 23355,23                | 15 910,7                |
| Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup>        | 1 277                   | 1 297                   | 1 243                   | 1 267                   |
| Мощность, затрачиваемая на прокачку жидкости, N, Вт | 1327,62                 | 1218,78                 | 1488,02                 | 709,32                  |
| Масса ТА, кг                                        | 17,8                    | 15,11                   | 22,82                   | 9,95                    |
| Критерий Кирпичева                                  | 16,01                   | 17,92                   | 15,7                    | 22,87                   |
| Критерий компактности по массе, Вт/кг               | 1193,83                 | 1445,15                 | 1023,36                 | 1630,68                 |

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

В работах [14, 16] авторами статьи был проведен сравнительный анализ конических и цилиндрических змеевиковых ТА. Как уже отмечалось ранее в работе [16] представлены результаты расчета для ТА на базе пружинно-витого канала с геометрическими размерами аналогичными рассматриваемому варианту 1 данной работы.

Было проведено математическое моделирование сопряженной задачи теплообмена с аналогичными исходными данными и условиями решения, что и для рассматриваемых конических ТА на базе гладкостенного ТА. При использовании пружинно-витых теплообменных труб в рассматриваемом змеевиковом теплообменнике конечная температура нагреваемого теплоносителя превышает соответствующую при использовании гладких труб на величину  $\Delta t_a = t_{coupr} - t_{cou} = 61,3 - 49,33 = 11,97$  °С. При этом коэффициент эффективности Кирпичева равен 18,32.

Авторы установили, что распределение скорости по сечению теплообменного элемента наиболее равномерное при использовании пружинно-витого канала, что указывает на наличие поперечной циркуляции. Поперечная циркуляция, возникающая в пружинно-витом канале, обеспечивает интенсификацию обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем, а с другой — влечёт за собой ощутимый рост гидравлического сопротивления.

Расчёты перепада давления вдоль теплообменного элемента согласуются с полученными результатами. Конический теплообменник с пружинно-витым каналом, демонстрирующий наибольшую эффективность нагрева холодного теплоагента, но характеризуется при этом повышенными значениями перепада давления.

#### **Обсуждение (Discussions)**

Были проведены расчеты змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали, выполненных на основе гладкостенного теплообменного элемента круглого сечения.

Температура нагреваемого теплоносителя достигла максимального значения (53,44°С) в варианте 3 (цилиндрический ТА). Это обусловлено прежде всего наибольшей поверхностью теплообмена по сравнению с коническими вариантами.

Было подтверждено, что увеличение угла при вершине конуса действительно оказывает влияние на теплообменные процессы в диапазоне от 50° до 70°. Однако, при прочих равных параметрах это ведет к сокращению теплообменной поверхности, что негативно сказывается на конечной температуре нагреваемого теплоносителя. В диапазоне углов при вершине конуса от 0° до 50° разница в конечной температуре составила 5,12 °С (9,6%), но при этом длина теплообменного элемента для цилиндрического ТА на 32,3% выше.

Наблюдается незначительная разница между результатами, полученными для углов 36° до 50°, при этом происходит сокращение длины теплообменного элемента на 14 %. Наибольшее значение критерия Кирпичёва у 4-го варианта ТА, однако температура на выходе нагреваемого теплоносителя на 14,23 °С ниже, чем для варианта 3. Для достижения планируемых выходных показателей необходимо рассматривать вопрос увеличения



площади теплообмена за счет установки интенсификаторов.

Наибольшими преимуществами по удельному показателям обладает вариант 4 (рис. 2 г). Для него характерны минимальная масса аппарата (9,95 кг), что в 2,3 раза легче варианта 3, а также наименьшие затраты мощности на прокачку теплоносителя (709 Вт) – в 2,1 раза меньше, чем у варианта 3. Данный вариант демонстрирует максимальное значение критерия Кирпичева (22,87), свидетельствующее о наилучшей эффективности использования перепада давления, и максимальную компактность по массе – 1631 Вт/кг. Основным недостатком варианта 4 является самая низкая тепловая мощность (15910 Вт), уступающая варианту 3 на 31 %.

В свою очередь, вариант 3 обеспечивает наибольший тепловой поток (23355 Вт), но обладает максимальной массой, наибольшими гидравлическими потерями и наихудшими удельными показателями среди всех рассмотренных конструкций. Промежуточное положение занимает вариант 2, который представляет собой рациональный компромисс: высокая (вторая по величине) тепловая мощность  $Q$ , наивысший коэффициент теплопередачи ( $1297 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ), небольшая масса (15,11 кг) и хорошая компактность.

#### **Заключение (Conclusions)**

Исходя из полученных результатов видно, что при одних и тех же исходных параметрах конический змеевиковый теплообменник обеспечивает необходимый тепловой эффект при меньшей длине теплообменного элемента, чем цилиндрический аппарат аналогичного типа. Сокращение протяжённости теплообменных элементов напрямую уменьшает расход материалов, что создаёт условия для снижения себестоимости аппарата в целом.

Расчётные данные свидетельствуют о технической и энергетической обоснованности применения конических ТА с заменой гладких трубок на пружинно-витые. Подобная конструктивная модификация обеспечивает одновременное повышение тепловой производительности и снижение энергозатрат на транспортировку теплоносителя. Совокупным следствием этих изменений служит заметный рост общей энергоэффективности системы. Применение пружинно-витых элементов в теплообменном оборудовании представляет собой решение, направленное на повышение эффективности и эксплуатационной надёжности подобных устройств.

#### **Литература**

1. Багоутдинова, А.Г., Золотоносов Я.Д. Змеевиковые теплообменники. Моделирование, расчет. / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов - Казань- КГАСУ, 2016.-245 с.
2. Патент РФ №2115876 на изобретение МПК F28D 7/00 Теплообменник типа «труба в трубе» / А. Л. Коптелов - №96101976/06 заявл. 01.02.96; опубли. 20.07.98
3. Mishra, T. N. Modeling and CFD Analysis of Tube in Tube Helical Coil Heat Exchanger. (2015)
4. Faridi Khouzestani, Reza & Ghafouri, Ashkan & Halalizade, Mahmood. (2021). Numerical study of the effects of geometric parameters and nanofluid properties on heat transfer and pressure drop in helical tubes. SN Applied Sciences. 3. 10.1007/s42452-021-04701-6.
5. Nashine, Prerana & Singh, Thokchom. (2021). EFFECT OF DEAN NUMBER ON THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF A HELICAL COIL TUBE WITH VARIABLE VELOCITY & PRESSURE INLET. Journal of Thermal Engineering. 6. 128-139. 10.18186/thermal.729149.
6. Purandare, P., Lele, Dr M., Gupta, R.: Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger. Thermal science 20 (6), 2087-2099 (2016).
7. Pramond S. Purandare, Mandar M. Lele and Raj K. Gupta: Experimental Investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger. Thermal Science, year 2016, vol. 20 №6, pp. 2087-2099.
8. Ali, M., Rad, M. M., Nuhait, A., Almuzaiqer, R., Alimoradi, A., & Iskander, T. (2019). New equations for Nusselt number and friction factor of the annulus side of the conically coiled tubes in tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114545>
9. Abdelmagied, M. Investigation of fluid flow and heat transfer in annulus conical tubes. Discov Appl Sci 8, 128 (2026). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07974-3>
10. Abdelmagied, M. Investigation of a tube in tube conically coil heat exchanger thermal and fluid flow performance characteristics. Int. J. Air-Cond. Ref. 33, 7 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44189-025-00071-5>

11. Md Atiqur Rahman, Review on heat transfer augmentation in helically coiled tube heat exchanger, International Journal of Thermofluids, Volume 24 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100937>

12. Муравьев А.В., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Ильин В.К. Исследование теплогидравлических характеристик криволинейного канала с кольцевыми турбулизаторами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 102-116.

13. Золотоносов, Я. Д. Аналитическое Решение задачи теплообмена при течении вязких жидкостей в змеевиковых теплообменных аппаратах типа «труба в трубе» / Я. Д. Золотоносов, Е. К. Вачагина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 3(771). – С. 95-109. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-771-3-95-109. – EDN BIOHEV.

14. Крутова, И. А. Решение сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов / И. А. Крутова, Я. Д. Золотоносов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 214-226. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226. – EDN MIDCGA.

15. Я. Д. Золотоносов, А.Я. Золотоносов, Е.К. Вачагина, Е.В. Варсегова. Инновационные теплообменные аппараты. Конструкции. Расчет. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2021. –ISBN 978-5-7829-0586-6.

16. Крутова И.А., Золотоносов Я.Д. Расчет змеевиковых теплообменников с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 179-194. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-179-194.

#### Авторы публикации

**Крутова Ираида Александровна** – аспирант Казанского государственного архитектурно-строительного университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. Email: iraida\_knyazeva@mail.ru.

**Золотоносов Яков Давидович** – д-р. техн. наук, профессор Казанского государственного архитектурно-строительного университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. Email: zolotonosov@mail.ru.

#### References

1. Bagoutdinova, A.G., Zolotonosov Ya.D. Coil heat exchangers. Modeling, calculation. / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov - Kazan- KGAZU, 2016.-245 p.

2. Patent of the Russian Federation No. 2115876 for the invention IPC F28D 7/00 Pipe-in-Pipe Heat Exchanger / A. L. Koptev - No. 96101976/06 applied for 01.02.96; published on 20.07.98

3. Mishra, T. N. Modeling and CFD Analysis of Tube in Tube Helical Coil Heat Exchanger. (2015)

4. Faridi Khouzestani, Reza & Ghafouri, Ashkan & Halalizade, Mahmood. (2021). Numerical study of the effects of geometric parameters and nanofluid properties on heat transfer and pressure drop in helical tubes. SN Applied Sciences. 3. 10.1007/s42452-021-04701-6.

5. Nashine, Prerana & Singh, Thokchom. (2021). EFFECT OF DEAN NUMBER ON THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF A HELICAL COIL TUBE WITH VARIABLE VELOCITY & PRESSURE INLET. Journal of Thermal Engineering. 6. 128-139. 10.18186/thermal.729149.

6. Purandare, P., Lele, Dr M., Gupta, R.: Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger. Thermal science 20 (6), 2087-2099 (2016).

7. Pramond S. Purandare, Mandar M. Lele, and Raj K. Gupta: Experimental Investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger. Thermal Science, year 2016, vol. 20 №6, pp. 2087-2099.

8. Ali, M., Rad, M. M., Nuhait, A., Almuzaiqer, R., Alimoradi, A., & Iskander, T. (2019). New equations for Nusselt number and friction factor of the annulus side of the conically coiled tubes in tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114545>

9. Abdelmagied, M. Investigation of fluid flow and heat transfer in annulus conical tubes. Discov Appl Sci 8, 128 (2026). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07974-3>

10. Abdelmagied, M. Investigation of a tube in tube conically coil heat exchanger thermal and fluid flow performance characteristics. Int. J. Air-Cond. Ref. 33, 7 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44189-025-00071-5>
11. Md Atiqur Rahman, Review on heat transfer augmentation in helically coiled tube heat exchanger, International Journal of Thermofluids, Volume 24 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100937>
12. Muravyov A.V., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Ilyin V.K. Investigation of the Thermal and Hydraulic Characteristics of a Curvilinear Channel with Ring Turbulators // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2024. Vol. 16. No. 1 (61). Pp. 102-116.
13. Zolotonosov, Ya. D. Analytical Solution of the Heat Exchange Problem in the Flow of Viscous Fluids in Coil Heat Exchangers of the "Pipe in Pipe" Type / Ya. D. Zolotonosov, E. K. Vachagina // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Construction. – 2023. – No. 3(771). – Pp. 95-109. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-771-3-95-109. – EDN BIOHEV.
14. Krutova, I. A. Solution of the Conjugate Heat Transfer Problem for Conical Heat Exchangers / I. A. Krutova, Ya. D. Zolotonosov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki. – 2024. – Vol. 26, No. 6. – Pp. 214-226. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226. – EDN MIDCGA.
15. I am D. Zolotonosov, A.Ya. Zolotonosov, E.K. Vachagina, and E.V. Varsegova. Innovative heat exchangers. Constructions. Calculation. Kazan: Publishing House of Kazan State Architect."He's building. University, 2021. –ISBN 978-5-7829-0586-6.
16. Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D. Calculation of coil heat exchangers with a variable bending radius of a helical spiral // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 179-194. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-179-194.

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

**Iraida A. Krutova** – Kazan State University of Architecture and Engineering. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. e-mail: [iraida\\_knyazeva@mail.ru](mailto:iraida_knyazeva@mail.ru).

**Yakov D. Zolotonosov** – Kazan State University of Architecture and Engineering. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. e-mail: [zolotonosov@mail.ru](mailto:zolotonosov@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** **12.04.2026 г.**

**Отредактировано** **18.05.2026 г.**

**Принято** **26.05.2026 г.**



## УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕССОЛИВАНИЯ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТА ТЭС

Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Сафина Г.Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
larisanik@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в изучении возможности использования гранулированного сорбента, разработанного на основе золошлаковых отходов, для очистки обратного осмотического концентрата – высокоминерализованного стока ТЭС – от сульфат- и хлорид-ионов. **ЦЕЛЬ.** Снизить негативное воздействие ТЭС на окружающую среду путём внедрения усовершенствованной технологии очистки обратного осмотического концентрата с использованием многотоннажного отхода энергетики. **МЕТОДЫ.** Определение технологических характеристик золошлаковых отходов производилось с применением гостированных методик. Анализ физико-химических показателей качества воды проводился с соблюдением методов, используемых в рамках ведомственного экологического контроля (хроматографический, гравиметрический, титриметрический, фотоколориметрический). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана технология, позволяющая очищать обратный осмотический концентрат от сульфат- и хлорид-ионов с использованием разработанного гранулированного сорбента на основе золошлаковых отходов. Произведен расчет экономического эффекта и предотвращенного экологического вреда от внедрения усовершенствованной технологии. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработан гранулированный сорбент на основе золошлаковых отходов, предназначенный для очистки обратного осмотического концентрата от сульфат- и хлорид-ионов.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы ТЭС, обратный осмотический концентрат, сульфат-ионы, хлорид-ионы, адсорбция, сорбционные материалы.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

**Для цитирования:** Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Сафина Г.Г. Утилизация золошлаковых отходов в качестве сорбционных материалов для обессоливания обратного осмотического концентрата ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 207-218. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-207-218.

## UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE AS SORPTION MATERIALS FOR DESALINATION OF REVERSE OSMOSIS CONCENTRATE TES

Nikolaeva L.A., Zainullina E.R., Safina G.G.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
larisanik@mail.ru

**Abstract:** *PURPOSE* The study focuses on evaluating the feasibility of using a granular sorbent material derived from ash-slag waste to remove sulfate and chloride ions from reverse osmosis concentrate – a highly mineralized effluent produced by thermal power plants. **GOAL.** Reducing the environmental impact of thermal power plants through the application of an advanced purification technology for reverse osmosis concentrate, using materials derived from energy sector waste. **METHODS.** The technological characteristics of ash-and-slag waste were determined using GOST-standardized methods. The physico-chemical parameters of water

quality were analyzed in accordance with in-house environmental monitoring protocols, including chromatographic, gravimetric, titrimetric, and photocolormetric techniques. **RESULTS** We have performed calculations of the economic effect and prevented environmental harm associated with the deployment of an enhanced treatment process. The technology uses granular sorbent media to remove sulfate and chloride ions from reverse osmosis concentrate generated by thermal power plants. **CONCLUSION.** Based on ash-and-slag waste, a granular sorbent material was synthesized to treat reverse osmosis concentrate by removing sulfate and chloride ions.

**Keywords:** ash and slag waste from thermal power plants; reverse osmotic TPP concentrate; sulfate ions; chloride ions; adsorption; sorption material.

**Acknowledgments:** The work was carried out at the expense of a grant provided in 2025 by the Science and Technology Foundation of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and applied scientific research in scientific and educational organizations, enterprises, and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan".

**For citation:** Nikolaeva L.A., Zainullina E.R., Safina G.G. Utilization of ash and slag waste as sorption materials for desalination of reverse osmosis concentrate TES. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 207-218. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-207-218.

### **Введение (Introduction)**

На протяжении последнего десятилетия в России произошло значительное расширение производственных мощностей ТЭС, что приводит к постоянному выбросу большого объема тепла и вредных веществ в окружающую среду. Интенсивное использование природных водных ресурсов в энергетике сопровождается образованием сточных вод с различной концентрацией загрязняющих веществ, что создаёт серьезные экологические проблемы. На ТЭС предъявляются строгие требования к качеству воды, используемой в процессе производства электрической и тепловой энергии. Добавочная вода подается в контур для восполнения потерь пара и конденсата после применения физико-химических методов очистки.

В процессе водоподготовки одним из способов обессоливания природной воды являются мембранные технологии. Ультрафильтрация, микрофильтрация, нанофильтрация применяются на стадии предварительной очистки, природной воды в результате такой очистки образуется осветленная вода, обессоливание которой происходит на установках обратного осмоса (УОО). После установки обратного осмоса образуются пермеат и сточные воды с повышенной минерализацией — концентрат, составляющий 25% от общего объема водопотребления. При пропускной способности УОО – 60 м<sup>3</sup>/ч объем сбрасываемого концентрата достигает – 20 м<sup>3</sup>/ч. Анализ физико-химического состава концентрата показал, что концентрация, сульфат- и хлорид-ионов, превышают предельно допустимые значения для сбросов в водные объекты рыбохозяйственного значения [1].

В настоящее время концентрат сбрасывается в общую систему канализации. В ряде технологий обратноосмотический концентрат (ООК) полностью утилизируется и может использоваться в качестве основного компонента для производства дорожных покрытий. Это позволяет повысить ресурсную эффективность и снизить экологическую нагрузку на инфраструктуру города. Применение ООК в дорожных материалах предполагает: улучшение прочностных характеристик и долговечности покрытий; снижение затрат на сырье за счет вторичной переработки; снижение выбросов CO<sub>2</sub> в рамках контура управления отходами; снижение требований к обработке и обезвреживанию отходов перед повторным использованием.

Целью исследования является снижение негативного воздействия ТЭС на окружающую среду за счет разработки технологии доочистки обратноосмотического концентрата (ООК) гранулированным сорбционным материалом на основе золошлаковых отходов (ЗШО) с последующим возвратом в технологический цикл при соблюдении установленных показателей качества.

Для очистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов разработан гранулированный сорбционный материал на основе золошлаковых отходов (ЗШО), получаемой при сжигании топлива на ТЭС в топочной камере при температурах от 1200 до 1700 °С. Объем

образующихся отходов варьируется в зависимости от типа топлива и составляет: 10 – 15 % при сжигании бурого угля, 40 % – каменного угля, 50 – 80 % – сортовых смесей, а также 0,15 – 0,20 % – мазута.

Научная значимость исследований заключается в разработке технологии доочистки ООК с использованием сорбционных материалов на основе ЗШО, направленных на удаление сульфат- и хлорид-ионов. В ходе эксперимента была определена адсорбционная емкость различных форм сорбентов: порошкообразного и гранулированного. Результаты показали, что гранулированный сорбент значительно более эффективен, с показателями очистки 96,2% для сульфат-ионов и 98,4% для хлорид-ионов. Для порошкообразного сорбента эффективность составила 89,4% по сульфат-ионам и 90,5% по хлорид-ионам.

Практическая значимость исследования — усовершенствование схемы водоподготовки ГРЭС за счёт внедрения блока адсорбционной доочистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов с использованием гранулированного сорбента на основе ЗШО.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

В работах [2, 3] рассмотрены методы очистки обратноосмотического концентрата, которые делятся на четыре класса: мембранные, термические, электрические и химические.

Изучены комплексные методы — в настоящее время они тестируются преимущественно в экспериментальном масштабе для исключения сброса обратноосмотического концентрата. Проанализированы способы обработки концентрата морской воды (их можно отнести к перечисленным выше категориям) применительно к другим источникам концентрата. Рассмотрены методы утилизации концентрата. Каждый тип методов имеет свои особенности: термические методы хорошо себя зарекомендовали, но требуют значительных энергозатрат по сравнению с другими подходами; химические методы могут быть экономически выгодными за счёт прибыли от продажи извлечённых химических веществ, однако чаще всего их применяют лишь для предварительной очистки; электрические и мембранные методы представляют собой перспективные технологии.

В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований прямого сброса ООК в поверхностные водоемы.

Для компенсации затрат на интенсивные исследования, необходимые для реализации технологии нулевой утечки, целесообразно применять инновационные и экологичные методы утилизации. Они позволят существенно сократить воздействие на окружающую среду.

В источнике [5] изложен метод сброса ООК, предварительно обработанного коагуляцией, осаждением и фильтрацией, в глубокую скважину. Высоцким С.П. и Печенога А.А. [6] предложен способ минимизации объема ООК за счет его возврата в технологический цикл.

Ежегодно на угольных электростанциях в России сжигается более 100 млн тонн угля, в результате чего образуются продукты сжигания углей (золашлаковые отходы), которые утилизируются и накапливаются в золоотвалах, а совокупный объём накопленных отходов превышает 1,5 млрд тонн, занимая более 22000 га территорий [7]. ЗШО классифицируются как отходы II–IV классов опасности и представляют существенную экологическую угрозу из-за выщелачивания тяжёлых металлов и токсичных элементов, загрязнения грунтовых и поверхностных вод, пылевого загрязнения атмосферы при ветровой эрозии золоотвалов и потенциального накопления радионуклидов [8]. При этом уровень утилизации ЗШО в России остаётся крайне низким — перерабатывается лишь около 10% от общего объёма, тогда как основная масса размещается на специализированных полигонах, содержание которых требует значительных затрат (строительство – до 500 – 800 млн руб. за объект, реконструкция – 200 – 400 млн руб., ежегодное обслуживание – 5 – 15 млн руб./га) [9].

Между тем современные исследования [10, 11] демонстрируют значительный потенциал ЗШО как вторичного сырья: в строительной отрасли их применяют при производстве цемента (в качестве минеральной добавки до 15–20%), бетона, стеновых материалов, сухих строительных смесей, керамических изделий, теплоизоляционных материалов и в дорожном строительстве; в химической промышленности из ЗШО извлекают ценные компоненты ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$ , V, Ge. и др.), получают сульфат алюминия и минеральные удобрения; в металлургии используют как добавки в агломерационную шихту и компоненты шлакообразующих смесей; в сельском хозяйстве – в качестве мелиорантов для кислых почв и минеральных добавок; кроме того, ЗШО служат сырьём для производства сорбентов, фильтрующих материалов,

алюмосиликатных микросфер и редкоземельных металлов. Комплексное использование ЗШО способно обеспечить значительный экологический эффект (сокращение площади золоотвалов, снижение выбросов загрязняющих веществ) и экономический эффект (снижение затрат на содержание полигонов, экономия первичных ресурсов, создание новых производств), причём при увеличении уровня утилизации до 50–60% годовой экономический эффект может составить 15–25 млрд руб. с учётом экологических выгод, что подчёркивает необходимость развития технологий переработки и вовлечения золошлаковых отходов в хозяйственный оборот для повышения ресурсоэффективности отечественной промышленности и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Значительный практический и научный интерес представляют исследования, демонстрирующие высокую сорбционную эффективность золошлаковых отходов (ЗШО). В работе [12] исследована способность ЗШО извлекать ионы аммония из водной среды. В результате было установлено, что степень извлечения ионов аммония достигает 90% при оптимальных условиях: pH 6–8, температуре 20–25 °C и времени контакта 60 – 90 минут.

Показано, что высокая сорбционная ёмкость ЗШО обусловлена их развитой удельной поверхностью (15 – 30 м<sup>2</sup>/г) и наличием активных центров на основе алюмосиликатных соединений.

В исследовании [13] проведено сравнение сорбционных свойств модифицированного сорбента на основе ЗШО ТЭС по отношению к различным нефтепродуктам, таким как мазут, керосин, бензин марки АИ-92, н-гексан.

Экспериментально установлено, что максимальная сорбционная ёмкость наблюдается для тяжёлых фракций (мазут – до 8,5 г/г), тогда как для лёгких углеводородов (н-гексан) показатель снижается до 3,2 г/г. Модификация поверхности ЗШО путём кислотной активации (5 % раствором HCl) повышает сорбционную способность на 25–40% за счёт увеличения пористости и образования дополнительных функциональных групп.

Дополнительные исследования [14] выявили эффективность ЗШО при очистке из водных сред: от ионов тяжёлых металлов Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> (эффективность 70 – 85%); фенольных соединений (до 75%); фосфатов (до 65%) благодаря присутствию соединений кальция и магния, образующих нерастворимые осадки.

Механизм сорбции на ЗШО включает несколько процессов: физическую адсорбцию за счёт пористой структуры материала.

Практическое внедрение технологии сорбционной очистки на основе ЗШО уже реализовано на ряде объектов: локальных очистных сооружениях промышленных предприятий (удаление нефтепродуктов); системах водоподготовки ТЭС (доочистка оборотных вод); мобильных установках для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов.

Таким образом, использование ЗШО в качестве сорбционного материала не только решает проблему утилизации отходов теплоэнергетики, но и предоставляет экономически выгодное решение для очистки промышленных и сточных вод от широкого спектра загрязнителей. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию методов модификации ЗШО для повышения селективности сорбции, разработку технологий регенерации отработанных сорбентов и создание нормативов применения золошлаковых сорбентов в системах водоочистки различного масштаба.

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

Объект исследования – отходы энергетики (ООК, ЗШО ТЭС).

В ходе исследования химического состава ООК использовали стандартизированные методики анализа качества воды [15]. Определение количественного содержания ионов – сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) и хлоридов (Cl<sup>-</sup>) – выполняли с помощью ионной хроматографии. Измерения проводили на хроматографе Metrohm Eco IC (Швейцария).

Химический состав ЗШО был установлен с использованием рентгенографического качественного фазового анализа на дифрактометре D 8 ADVANCE компании Bruker. Технологические характеристики ЗШО определены на основе стандартных методик.

Химический состав ООК ГРЭС следующий: pH – 7,62, Na<sup>+</sup> – 79,7 мг/дм<sup>3</sup>, Cl<sup>-</sup> – 312 мг/дм<sup>3</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 132 мг/дм<sup>3</sup>; SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – 7,3 мг/дм<sup>3</sup>; удельная электропроводность – 1748 мкСМ/см, окисляемость – 27,52 мгО/дм<sup>3</sup>. Показатели качества ООК говорят о том, что концентрации сульфат- и хлорид-ионов превышают ПДК загрязняющих веществ в

водах водных объектов рыбохозяйственного значения:  $\text{SO}_4^{2-}$  – 100 мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Cl}^-$  – 300 мг/дм<sup>3</sup>.

Для соответствия ПДК загрязняющих веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты рыбохозяйственного значения, необходима доочистка обратноосмотического концентрата (ООК). Предложена технология обессоливания ООК методом адсорбции с использованием золошлаковых отходов энергетики (IV класс опасности по Федеральному классификационному каталогу отходов) [16].

Состав ЗШО ГРЭС, сжигающей бурый подмосковный уголь (доля сжигания — 10 %), определен экспериментальным путём. Преобладающими компонентами являются: диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ , 40-60 %) и оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15-30 %), далее следуют оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 5-15 %) и сульфат кальция ( $\text{CaSO}_4$ , 2-20 %). Содержание остальных компонентов (оксидов кальция, магния, калия, натрия, диоксида титана и углерода) варьируется от 0,8 до 1,4 %.

К ключевым технологическим характеристикам материала относятся: насыпная плотность (800 кг/м<sup>3</sup>), гранулометрический состав (частицы размером 0,5 – 2,0 мм), влажность (5 %), слабокислая реакция среды (pH 6,6 – 6,8), а также высокие показатели пористости (0,79 см<sup>3</sup>/г) и удельной поверхности (150 – 400 м<sup>2</sup>/г).

В рамках исследования [17] оценивали адсорбционные свойства золы по отношению к сульфат- и хлорид-ионам. Для этого готовили модельные растворы: раствор сульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) с концентрацией 150 мг/дм<sup>3</sup> и раствор хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) с концентрацией 350 мг/дм<sup>3</sup>. Эксперименты проводили в двух режимах — статическом и динамическом.

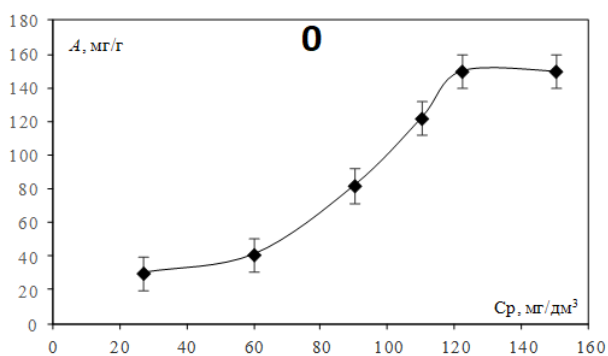
Сорбент С1 на основе ЗШО, представляет собой порошок размерами частиц 0,5-2,0 мм, влажностью – 5%, высушенной при 150°C. Статическое исследование адсорбционных свойств сорбента С1 проводили методом переменных навесок при постоянной концентрации раствора. Эксперимент проводился в пяти конических колбах вместимостью – 100 см<sup>3</sup>, содержащих модельный раствор. В каждую колбу вносили навеску сорбента в диапазоне 0,01 – 2 г.

Перемешивание осуществляли магнитной мешалкой в течение 24 ч. После завершения сорбент отделяли фильтрацией через бумажный фильтр. Определяем количественное содержание остаточных концентраций сульфат- и хлорид-ионов [18]. Расчёт величины адсорбции  $A$  (в мг/г) проводили на основе полученных данных по установленной формуле.

$$A = \frac{(c_0 - c) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где  $A$  – количество адсорбционного вещества, приходящееся на 1 г адсорбента, мг/г;  $m$  – масса адсорбента, г;  $V$  – объем раствора, из которого идет адсорбция, л.

В статических условиях построена изотерма адсорбции сульфат- и хлорид- ионов сорбентом С1 (рис. 1).



а



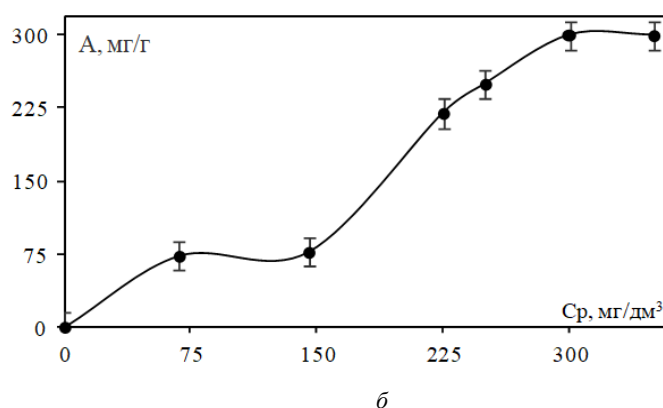


Рис. 1. Изотермы адсорбции: *a* – сульфат-ионов; *b* – хлорид-ионов; *C<sub>p</sub>* – концентрация сульфат- и хлорид-ионов в растворе

Fig. 1. Adsorption isotherms: *a* – sulfate ions; *b* – chloride ions; *C<sub>p</sub>* – concentration of sulfate ions, chloride ions in the solution, mg/dm<sup>3</sup>

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

Форма изотерм адсорбции (см. рис. 1) соответствует IV классу по классификации Смита [19].

Для изучения механизма адсорбции построены изотермы при различных температурах 293 К, 313 К, 323 К и 333 К (рис. 2).

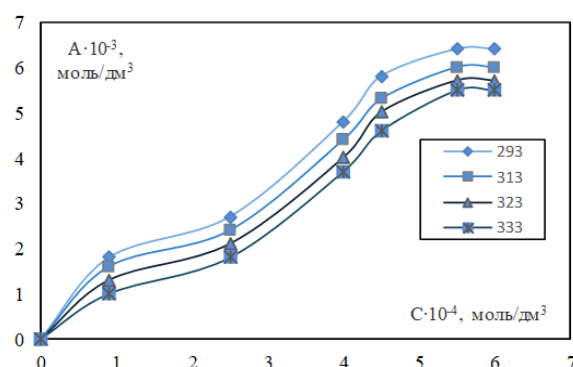
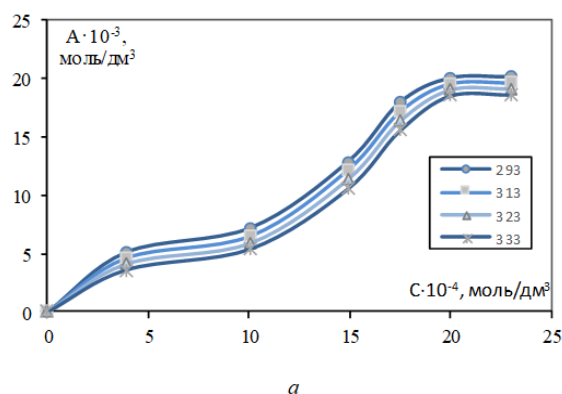


Рис. 2. Изотермы адсорбции при различных температурах сорбентом С1: *a* – сульфат-ионов; *b* – хлорид-ионов

Fig. 2. Adsorption isotherms at different temperatures with sorption material S1: *a* – sulfate ions; *b* – chloride ions

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

На основе полученных изотерм произведен расчет термодинамических и кинетических параметров.

Произведены расчеты дифференциальной теплоты адсорбции (табл. 1) и энергии Гиббса (табл. 2) для процесса адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1.

$$Q = -R \frac{\Delta \ln C}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)}, \quad (2)$$

где  $T$  – температура, К;  $R$  – молярная газовая постоянная,  $R = 8,341$  Дж/(моль · К);  $C$  – равновесная концентрация сульфат-ионов (хлорид-ионов) в растворе, моль/дм<sup>3</sup>.

Энергия Гиббса  $\Delta G$ , кДж/моль (табл. 2):

$$\Delta G = -R \cdot T \cdot \ln K_d, \quad (3)$$

где  $K_d$  – константа адсорбционного равновесия Ленгмюра;  $T$  – температура, К.

Таблица 1

Table 1

Дифференциальные теплоты адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1

Differential heat of adsorption of sulfate and chloride ions by sorbent C1

| Температура, К | Сульфат-ионы |                            | Хлорид-ионы |                            |
|----------------|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
|                | Q, кДж/моль  | $A \cdot 10^{-3}$ , моль/г | Q, кДж/моль | $A \cdot 10^{-3}$ , моль/г |
| 293            | 24,15        | 7,4                        | 22,45       | 2,73                       |
| 313            | 24           | 6,1                        | 22,13       | 2,37                       |
| 323            | 23,52        | 5,4                        | 21,52       | 1,9                        |
| 333            | 23,7         | 5,1                        | 21,15       | 1,8                        |

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

Таблица 2

Table 2

Влияние температуры на постоянные Ленгмюра и энергии Гиббса при адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1

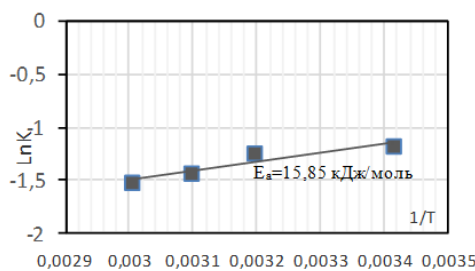
Effect of temperature on Langmuir constants and Gibbs energies during the adsorption of sulfate and chloride ions by sorbent C1

| Температура, К | Сульфат-ионы        |                           |                       | Хлорид-ионы         |                           |                       |
|----------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
|                | $K_L \cdot 10^{-3}$ | $A_m \cdot 10^3$ , моль/г | $\Delta G$ , кДж/моль | $K_L \cdot 10^{-3}$ | $A_m \cdot 10^3$ , моль/г | $\Delta G$ , кДж/моль |
| 293            | 11,34               | 19,8                      | -60,15                | 3,62                | 6,48                      | -30,85                |
| 313            | 11,16               | 19,6                      | -62,56                | 3,18                | 6,12                      | -30,83                |
| 323            | 10,13               | 17,5                      | -62,72                | 3,12                | 5,96                      | -30,74                |
| 333            | 9,93                | 17,2                      | -63,16                | 2,98                | 5,47                      | -30,42                |

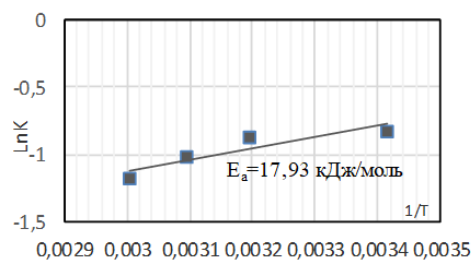
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для нахождения энергии активации  $E_a$  использовано уравнение Аррениуса (рис. 3):

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}. \quad (3)$$



а



б

Рис. 3. Графический метод расчета энергии активации процесса адсорбции: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов

Fig. 3. Graphical method for calculating the activation energy of the adsorption process: а – sulfate ions; б – chloride ions

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

Установлено, что механизм адсорбции сульфат- и хлорид-ионов на сорбенте С1 носит физический характер.

Для изучения адсорбции этих ионов в динамических условиях применялся гранулированный сорбционный материал на основе ЗШО (С2). В качестве связующего компонента использовалось жидкое натриевое стекло (ЖНС), при этом соотношение ЖНС к основному материалу составляло 3:2 по массе.

Оптимальная температура обработки сорбента С1 в диапазоне от 20 °С до 600 °С с шагом 100 °С выбрана в соответствии с экспериментальными данными, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Зависимость удельной поверхности гранулированного сорбента С2 от температуры обработки

Dependence of the specific surface area of granular sorbent C2 on the processing temperature

| № п/п | Температура обработки $t$ , °С | Удельная поверхность С2, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г |
|-------|--------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1     | 20                             | 141,2                                                 |
| 2     | 200                            | 145,5                                                 |
| 3     | 300                            | 149,1                                                 |
| 4     | 400                            | 149,2                                                 |
| 5     | 500                            | 149,6                                                 |
| 6     | 600                            | 149,7                                                 |

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

Максимально эффективное значение удельной поверхности материала с использованием связующего достигается при температуре 300 °С. Таким образом, термообработка проводилась при 300 °С в течение 25 минут.

Исследование адсорбционных характеристик гранулированного сорбента С2 в отношении сульфат- и хлорид-ионов в динамическом режиме проводили на модельной лабораторной установке. Для этого использовали стеклянную колонку с геометрическими параметрами: диаметр 2,5 см, высота слоя сорбента 20 см. Масса загруженного гранулированного сорбента составила – 56 г. Через колонку пропускали одинаковые порции модельных растворов –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (150 мг/дм<sup>3</sup>) и  $\text{NaCl}$  (350 мг/дм<sup>3</sup>).

Произведен расчет динамической и полной сорбционной емкости (ДСЕ и ПСЕ) поглощения гранулированного сорбента С2 в отношении сульфат- и хлорид-ионов. Для сульфат-ионов: ДСЕ – 324,1 мг/г, 1345,4 мг/г, ПСЕ – 408,5, объем пропущенной воды: 119,8 дм<sup>3</sup>, 149,8 соответственно и хлорид-ионов: ДСЕ – 1345,5 мг/г, ПСЕ – 1671,5 мг/г, объем пропущенной воды: 250,7 дм<sup>3</sup>, 311,7 дм<sup>3</sup>. Объем пропущенной воды фиксировался при полном насыщении гранулированного сорбента С2.

Результаты эксперимента по динамической адсорбции сульфат- и хлорид-ионов на сорбенте С2 в гранулированной форме представлены на рисунке 4.

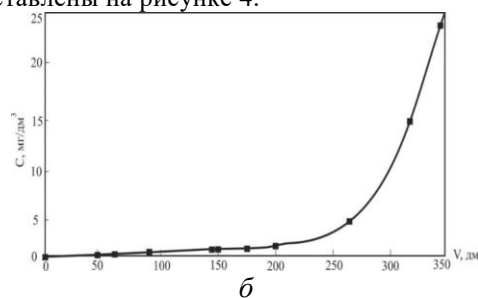
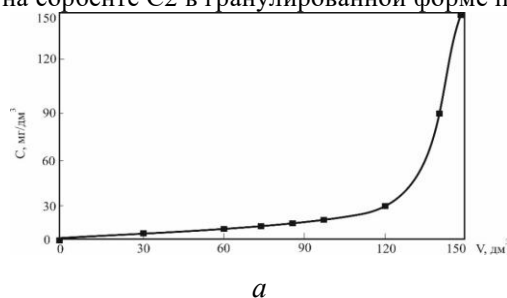


Рис. 4. Выходная кривая адсорбции гранулированным сорбентом С2 в динамических условиях: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов  
С – концентрация хлорид-ионов в растворе после адсорбции; V – объем раствора, пропущенного через колонку

Fig. 4. Output Curve of Adsorption of Sulfate (a) and Chloride Ions (b) with Sorbent S2 under dynamic conditions: C – concentration of chloride ions in the solution after adsorption; V – volume of solution passed through the column

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

В таблице 4 представлены данные по эффективности очистки обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид-ионов с использованием сорбционных материалов на основе ЗШО.

Таблица 4

Table 4

Эффективность адсорбции сульфат- и хлорид-ионов разработанными сорбционными материалами

The efficiency of sulfate and chloride ion adsorption by the developed sorption materials

| Марка сорбционного материала | Концентрация сульфат-ионов, мг/дм <sup>3</sup> |                 | Эффективность% | Концентрация хлорид-ионов, мг/дм <sup>3</sup> |                 | Эффективность % |
|------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                              | до адсорбции                                   | после адсорбции |                | до адсорбции                                  | после адсорбции |                 |
| С1                           | 150                                            | 15,9            | 89,4           | 350                                           | 33,2            | 90,5            |
| С2                           | 150                                            | 5,7             | 96,2           | 350                                           | 5,7             | 98,4            |

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

### Результаты (Results)

Результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность

динамической очистки обратноосмотического концентрата: эффективность очистки по сульфат-ионам достигает 96,2%, хлорид-ионам — 98,4%.

На основании полученных данных предложено усовершенствовать технологическую схему водоподготовки ГРЭС (рис. 5)

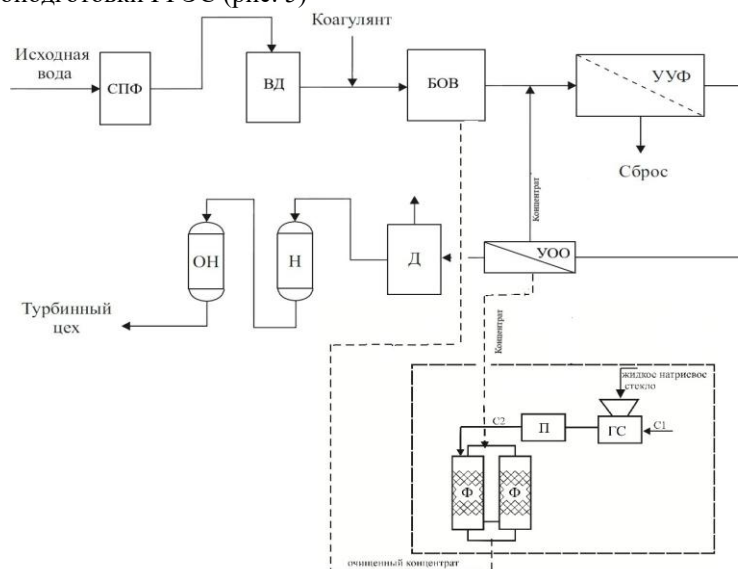


Рис. 5. Принципиальная схема водоподготовки на ГРЭС: СПФ – самопромывные дисковые фильтры; ВД – вакуумные дегазаторы; БОВ – баки осветленной воды; УУФ – установка ультрафильтрации; УОО – установка обратного осмоса; Д – декарбонизатор; Н, ОН – Н-катионитный и ОН-анионитный фильтры; ГС – гранулятор-смеситель ТЛГ-080; П – камерная печь СНО 160/1250; Ф – адсорбционный фильтр

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

Fig. 5. Process flow diagram of water treatment Shatura GRES: SPF – self-washing disc filters; VD – vacuum degassers; BOV – clarified water tanks; UUF – ultrafiltration unit; UOO – reverse osmosis unit; D – decarbonizer; N, OH – H-cation and OH-anion filters; GS – TLG-080 granulator-mixer; P – SNO 160/1250 chamber furnace; F – adsorption filter

Водоподготовка реализуется посредством многоступенчатой технологической схемы. На начальном этапе вода, имеющая температуру в диапазоне 20 – 30 °С, поступает на механическую очистку, на этом этапе удаляются взвешенные вещества, используются фильтры-сетки и самопромывные дисковые фильтры типа «Аркал» (СПФ). Для удаления большого количества растворенного воздуха установлены специальные вакуумные дегазаторы (ВД). Затем в поток вводится коагулянт – сульфат алюминия. Снижается концентрация коллоидных примесей.

После коагуляции вода направляется на установку ультрафильтрации (УУФ), состоящую из нескольких блоков (4 блока типа УФС-02-32). Каждый блок включает мембранные элементы, которые удаляют взвеси, коллоиды и большую часть органических примесей. Далее осветлённая вода поступает на установку обратного осмоса (типа ДВС-М/150-8-54). Здесь происходит частичное обессоливание воды. На установке обратного осмоса, в результате которого образуются две фракции: пермеат и концентрат. Пермеат поступает на вакуумно-струйный декарбонизатор (Д) для удаления растворённой углекислоты, после чего он направляется в бак пермеата. Для достижения нормативных требований ПТЭ по качеству воды для питания котлов выполняется доочистка на ионообменных противоточные фильтры, где происходит окончательное обессоливание. Концентрат, образующийся в процессе обратного осмоса, дополнительно очищается от сульфат- и хлорид-ионов в адсорбционном фильтре (Ф), заполненном сорбентом С2. Производство данного сорбента осуществляется на отдельном технологическом участке, оснащённом гранулятором-смесителем (ГС) и камерной печью СНО 160/1250 (П).

Технология получения гранулированного сорбционного материала С2 включает два основных этапа. На первом этапе порошкообразный сорбент С1 смешивают со связующим — жидким натриевым стеклом (ЖНС) — в грануляторе-смесителе модели ТЛГ-080. На втором этапе сформированные гранулы подвергают прокаливанию в камерной печи типа СНО 160/1250 при температуре 300 °С.

Усовершенствованная технологическая схема блоком доочистки ООК на ТЭС с

использованием гранулированного сорбента С2 показывает высокую экономическую и экологическую эффективность. Себестоимость очистки составляет 27,54 руб./м<sup>3</sup>, производства сорбента — 14 759 руб./т. На примере ГРЭС предотвращённый экологический вред оценивается в 865 458 руб./год, а экономическая эффективность внедрения — в 1 038 045,74 руб./год.

В ходе проведённого исследования выполнен комплексный анализ качества обратноосмотического концентрата (ООК). Установлено, что в период с 2021 по 2024 г. средняя концентрация загрязняющих веществ в сточной воде существенно превышала предельно допустимые концентрации (ПДК) для водных объектов рыбохозяйственного назначения: концентрация сульфат-ионов — 132 мг/дм<sup>3</sup>; хлорид-ионов — 312 мг/дм<sup>3</sup>.

Дополнительно проанализирована существующая схема водоподготовки ГРЭС с блоком обратного осмоса, а также изучены физико-химические и технологические характеристики золошлаковых отходов (ЗШО). На основе полученных данных разработаны оптимальные условия получения гранулированного сорбента С2: соотношение компонентов (по массе) — 3:2; температура термообработки — 300 °С; продолжительность термообработки — 25 мин; диаметр гранул — 0,5 – 2,5 мм.

Экспериментальные исследования показали, что адсорбция сульфат- и хлорид-ионов материалом на основе ЗШО протекает по механизму физической адсорбции. В ходе работы получены изотермы адсорбции и выполнены расчёты термодинамических и кинетических характеристик процесса с использованием порошкообразного сорбента С1.

Результаты расчётов: дифференциальная теплота адсорбции: для сульфат-ионов — 24,15–23,7 кДж/моль; для хлорид-ионов — 22,45–21,15 кДж/моль. Энергия Гиббса: для сульфат-ионов: –63,16–(–60,15) кДж/моль; для хлорид-ионов: –30,42–(–30,85) кДж/моль. Энергия активации: для сульфат-ионов: 15,85 кДж/моль; для хлорид-ионов: 17,93 кДж/моль.

#### **Заключение (Conclusions)**

Для снижения экологической нагрузки ТЭС на окружающую среду разработан сорбент на основе золошлаковых отходов (ЗШО), предназначенный для очистки обратноосмотического концентрата (ООК) от сульфат- и хлорид-ионов. В ходе лабораторных экспериментов разработана технология изготовления — порошкообразного и гранулированного сорбентов.

В технологическую схему водоподготовки ГРЭС внесено усовершенствование: добавлен блок адсорбционной доочистки обратноосмотического концентрата (ООК) от сульфат- и хлорид-ионов. В качестве сорбционного материала применяется разработанный гранулированный сорбент С2. Также предложена производственная схема его получения, включающая использование гранулятора-смесителя и камерной печи.

Экспериментально подтверждена эффективность адсорбционной доочистки ООК в динамическом режиме: по сульфат-ионам — 96,2 %, хлорид-ионам — 98,4 %.

Для реализации процесса рекомендована технология с применением гранулированного сорбента С2. Экономическая оценка: стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> ООК — 27,54 руб.; себестоимость гранулированного сорбента С2 — 14 759 руб./т. Годовой экономический эффект от снижения экологического воздействия — 865,458 тыс. руб. Суммарная эффективность внедрения — 1 038 тыс. руб./год. Окупаемость технологии — 1,5 года.

#### **Литература**

1. Михайлова Е.С., Попова Л.В. Анализ методов очистки сточных вод от сульфатов // Московский экономический журнал. 2022. № 11(7). С. 37–38.
2. Zakiya T., Rajalakshmi M. Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse Osmosis: A Review // Nature Environment and Pollution Technology. 2021. Vol. 20, N. 4. pp. 1403–1414.
3. Scholes R.C., Vega M.A., Sharp J.O., et al. Nitrate removal from reverse osmosis concentrate in pilot-scale open-water unit process wetlands. // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 7. pp. 650–661.
4. Yang Y., Sun Y., Song X., Yu J. Separation of mono- and di-valent ions from seawater reverse osmosis brine using selective electrodialysis // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. pp. 18754–18767.
5. Xuesong Xu, Lu Lin, Guanyu Ma, et al. Study on the effect of polyethyleneimine coating on membrane selectivity and desalination performance in electrodialysis of reverse osmosis concentrate // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 207. pp. 396–405.
6. Высоцкий С.П., Печенога А.А. Совершенствование обратноосмотического обессоливания воды // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2020. № 2 (57). С. 82–89.

7. Шаванов Н. Д., Коновалова Н. А., Панков П. П., Руш Е. А. Изучение состава и свойств золошлаковых смесей с целью их утилизации в строительной индустрии // Актуальные проблемы техносферной безопасности, 2022. С. 134–137.
8. Dik E.P., Soboleva A.N., Smirnova O.A. Environmental hazard classes of ashes and slags from thermal power stations // Thermal Engineering. 2011. Т. 58, № 6. С. 506–512.
9. Алдабергенова С.С., Ибраева Ж.Т., Ниязбекова Р.К., и др. Применение составов золошлаковых отходов при производстве строительных материалов // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2024;1(2(14)):440-452.
10. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., и др. Комплексное использование золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36.
11. Хаглеев, Е. П. Золошлакоотвалы годичного регулирования дифференцированных потоков золы и шлака угольных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 7–8. С. 21–32.
12. Фоменко А.И. Характеристика микросфер золы уноса для их использования в качестве сорбента // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19, № 6. С. 696-702.
13. Пухов С.А., Киселёва С.П. Вовлечение в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций в интересах эколого-ориентированного развития экономики // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7, № 4. С. 1–10.
14. Бушумов С.А., Короткова Т.Г. Экологически безопасный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики // Тонкие химические технологии. 2023. Т. 18, № 5. С. 446–460.
15. Аверина Ю.М., Ветрова М.А., Рыбина Е.О., Чумакова А.А. Методы контроля качества воды // Успехи в химии и химической технологии. 2019. № 3. С. 25–27.
16. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Саяхов Р.И. Очистка обратноосмотического концентрата золошлаковыми отходами ТЭС // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 9. С. 10–15.
17. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 2. С. 186–195.
18. Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Т.С. Номоконовой Сорбционная технология очистки сточных и оборотных вод золоотвалов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 35–44.
19. Свешникова Д. А., Сулейманов С. И., Хамизов Р. Х. Кинетика и механизм адсорбции сульфат-ионов на активированном угле КМ-2. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т.21. №4. С. 510-519.

#### Авторы публикации

**Николаева Лариса Андреевна** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-7200-2318>. Email: [larisanik16@mail.ru](mailto:larisanik16@mail.ru).

**Зайнуллина Элеонора Райнуровна** – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: [my-elechka@mail.ru](mailto:my-elechka@mail.ru).

**Сафина Гульшат Галлямутдиновна** – канд. хим. наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета.

#### References

1. Mikhailova E.S., Popova L.V. Analiz metodov ochistki stochnykh vod ot sul'fatov. *Moskovskii ehkonomicheskii zhurnal*. 2022. № 11(7): 37-38. (In Russ).
2. Zakiya T., Rajalakshmi M. Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse Osmosis: A Review. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2021; 20(4): 1403-1414. doi: 10.46488/NEPT.2021.v20i04.003.
3. Scholes R.C., Vega M.A., Sharp J.O., et al. Nitrate removal from reverse osmosis concentrate in pilot-scale open-water unit process wetlands. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2021; 7: 650–661. doi: 10.1039/c8ew00456a.
4. Yang Y., Sun Y., Song X., Yu J. Separation of mono- and di-valent ions from seawater reverse osmosis brine using selective electrodialysis. *Environmental Science and Pollution*

Research. 2021; 28. pp. 18754–18767. doi: 10.1007/s11356-022-33 140-3.

5. Xuesong Xu, Lu Lin, Guanyu Ma, et al. Study on the effect of polyethyleneimine coating on membrane selectivity and desalination performance in electrodialysis of reverse osmosis concentrate. *Separation and Purification Technology*. 2018; 207: 396–405. doi: 10.1016/j.seppur.2018.06.070

6. Vysotskii S.P., Pechenoga A.A. Sovershenstvovanie obratnoosmoticheskogo obessolivaniya vody. *Nauchnyi vestnik NIIGD Respirator*. 2020; 2(57): 82–89. (In Russ.).

7. Shavanov N. D., Konovalova N. A., Pankov P. P., Rush E. A. Studying the composition and properties of ash and slag mixtures for the purpose of their utilization in the construction industry. *Actual problems of technosphere safety*. 2022; 134-137. (In Russ.).

8. Dik E.P., Soboleva A.N., Smirnova O.A. Environmental hazard classes of ashes and slags from thermal power stations. *Thermal Engineering*. 2011; 58(6): 506–512. (In Russ.).

9. Aldabergenova S.S., Ibrayeva Zh.T., Niyazbekova R.K., et al. Recycling and use of ash and slag waste. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*. 2024;1(2(14)):440-452. (In Russ.).

10. Afanaseva O.V., Mingaleeva G.R., Dobronravov A.D., Shamsutdinov E.V. Complex use of ash and slag waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26-36. (In Russ.).

11. Khagleev E.P. Ash-slag dumps with annual regulation differentiated flows of ash and slag coal power station. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(7-8):21-32. (In Russ.).

12. Fomenko A. I. Kharakteristika mikrosfer zoly unosa dlya ikh ispolzovaniya v kachestve sorbenta. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2019; 19(6): 696-702. (In Russ.).

13. Pukhov S.A., Kiseleva S.P. Vovlechenie v khozyaistvennyi oborot zoloshlakovykh otkhodov teplovykh ehlektrostantsii v interesakh ehkologO-orientirovannogo razvitiya ehkonomiki. *Otkhody i resursy*. 2020; 7(4): 1–10. (In Russ.).

14. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Ehkologicheski bezopasnyi sorbent iz zoloshlakovykh otkhodov teploehnergetiki. *Tonkie khimicheskie tekhnologii*. 2023; 18(5): 446–460. (In Russ.).

15. Averina Yu. M., Vetrova M. A., Rybina E. O. Metody kontrolya kachestva vody. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2019; 3: 25-27. (In Russ.).

16. Nikolaeva L., Zainullina E., Saiakhov R. Purification of the Reverse Osmosis Concentrate Using Ash and Dlag Waste from TPP. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(9):10-15. doi: 10.18412/1816-0395-2024-9-10-15

17. Nikolaeva L.A., Zainullina E.R. Investigation of the process of desalination of the concentrate of reverse osmosis plants by energy waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2): 186-195. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-186-195

18. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., et al Sorption Technology for the Treatment of Waste and Circulating Waters of Ash Dumps. *Transbaikal State University Journal*. 2023; 29(3): 35–44. (In Russ.).

19. Sveshnikova D. A., Suleimanov S. I., Khamizov R. K. The kinetics and mechanism of sulphate ion adsorption on KM-2 activated carbon. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protssy*, 2021; 21(4): 510-519. (In Russ.).

#### Authors of the publication

**Larisa A.Nikolaeva** – Kazan State Power Engineering University. Email: larisanik16@mail.ru.

**Eleonora R. Zainullina** – Kazan State Power Engineering University. Email: my-elechka@mail.ru.

**Gulshat G. Safina** – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

**Получено** 16.03.2026 г.

**Отредактировано** 07.04.2026 г.

**Принято** 14.04.2026 г.

Сдано в набор 15.06.2026 г.  
Бумага офсет 80 г. Печать  
ризографическая  
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 00.00.2026 г.  
Усл. печ. л. 18,3  
Заказ № 5333  
Дата выхода в свет 00.00.2026 г.

Формат 60\*90/8  
Уч.изд. л. 11,62.  
Цена свободная



