

ISSN 1560-9278

eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТОМ 27, № 4 (октябрь – декабрь), 2024 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ТРАНСПОРТ

ТЕХНОЛОГИЯ
ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ
ПРОДУКТОВ



ELECTRICAL ENGINEERING

TRANSPORT

FOOD TECHNOLOGY

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY

VOLUME 27, N 4 (October – December), 2024

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 27, № 4 (октябрь – декабрь), 2024 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 27, N 4 (October – December), 2024**

**Мурманск
2024**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 27, № 4 (октябрь – декабрь), 2024 г.
Научный журнал
Издаётся с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель
ФГАОУ ВО "Мурманский арктический
университет"

Главный редактор
Шокина Ю. В., д-р техн. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

Редакционная коллегия
по направлению "Электротехника. Транспорт"

Заместитель главного редактора
Власов А. Б., д-р техн. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

Члены редакционной коллегии:
Белей В. Ф., д-р техн. наук, профессор
(Калининград, Россия)
Борх О. Я., д-р наук, профессор
(Будё, Норвегия)
Высоцкий В. Е., д-р техн. наук, профессор
(Севастополь, Россия)
Валтчев Станимир, профессор
(Лиссабон, Португалия)
Глушков С. В., д-р техн. наук, профессор
(Владивосток, Россия)
Грачева Е. И., д-р техн. наук, доцент
(Казань, Россия)
Ефименко Д. Б., д-р техн. наук, доцент
(Москва, Россия)
Зверева Э. Р., д-р техн. наук, доцент
(Казань, Россия)
Ивлев М. Л., канд. техн. наук, доцент
(Северодвинск, Россия)
Карпов В. Н., д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербург, Россия)
Козловский В. Н., д-р техн. наук, доцент
(Самара, Россия)
Кхавайя Х. А., д-р наук, доцент
(Тромсё, Норвегия)
Лентарёв А. А., д-р техн. наук, доцент
(Владивосток, Россия)
Мичели Росарио, д-р техн. наук
(Палермо, Италия)
Немировский А. Е., д-р техн. наук, профессор
(Вологда, Россия)
Панасенко Н. Н., д-р техн. наук, профессор
(Астрахань, Россия)
Понградж Э., д-р техн. наук,
(Оулу, Финляндия)
Согонов С. А., канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербург, Россия)
Стариченков А. Л., д-р техн. наук, доцент
(Санкт-Петербург, Россия)
Федотов А. И., д-р техн. наук, профессор
(Казань, Россия)
Юдин Ю. И., д-р техн. наук, профессор
(Новороссийск, Россия)

Адрес редакции
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13
Тел./факс: (8152) 40-33-56
Тел.: (8152) 40-35-01, 40-35-02
E-mail: redvst@mauniver.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 27, N 4 (October – December), 2024
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder
FSAEI HE "Murmansk
Arctic University"

Editor-in-Chief
Shokina Yu. V., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Murmansk, Russia)

The Editorial Board
(Electrical Engineering. Transport)

Deputy Editor
Vlasov A. B., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Murmansk, Russia)

The Editorial Board Members:
Belei V. F., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Kaliningrad, Russia)
Borch O. Ya., Dr Sci., Professor
(Bodø, Norway)
Vysotskii V. E., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Sevastopol, Russia)
Valtchev Stanimir, Professor
(Лиссабон, Португалия)
Glushkov S. V., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Vladivostok, Russia)
Gracheva E. I., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Kazan, Russia)
Efimenko D. B., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Moscow, Russia)
Zvereva E. R., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Kazan, Russia)
Ivlev M. L., Cand. Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Severodvinsk, Russia)
Karpov V. N., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Saint Petersburg, Russia)
Kozlovsky V. N., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Samara, Russia)
Khawaja H. A., Dr Sci., Ass. Professor
(Tromsø, Norway)
Lentarev A. A., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Vladivostok, Russia)
Miceli Rosario, Dr Sci. (Electrical Engineering)
(Palermo, Italy)
Nemirovsky A. E., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Vologda, Russia)
Panasenko N. N., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Astrakhan, Russia)
Pongracz E., Dr Sci. (Engineering),
(Oulu, Finland)
Sogonov S. A., Cand. Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Saint Petersburg, Russia)
Starichenkov A. L., Dr Sci. (Engineering), Ass. Professor
(Saint Petersburg, Russia)
Fedotov A. I., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Kazan, Russia)
Yudin Yu. I., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Novorossiisk, Russia)

The Editorial Office address
MSTU, Sportivnaya St., 13,
183010, Murmansk, RUSSIA
Phone/Fax: (8152) 40-33-56
Phone: (8152) 40-35-01, 40-35-02
E-mail: redvst@mauniver.ru

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Электротехника

Светотехника

- Ашрятов А. А., Кузнецов Е. А., Пашков М. Ю.** Исследование светотехнических характеристик светодиодных аналогов линейных люминесцентных ламп отечественного производства..... 475

Электротехнические комплексы и системы

- Давыдов А. Е., Боченков Б. М., Панкрац Ю. В.** Расширение диапазона двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами..... 486
- Денисов И. В.** Разработка математической модели зависимости удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от факторов, влияющих на ее надежность..... 501
- Петров А. Р., Грачева Е. И., Мифтахова Н. К.** Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях..... 511
- Петрова Р. М., Грачева Е. И.** Оценка параметров надежности схем внутризаводского электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями..... 521

Электроэнергетика

- Бежик А. С., Лебедев А. К., Романовский В. В., Власов А. Б.** Применение на судах электроэнергетических систем с распределенной шиной постоянного тока..... 534
- Власов А. Б.** Алгоритмы обучающих программ для тренажерной подготовки судовой машинной команды..... 547
- Капанский А. А.** Использование частотного регулирования для повышения энергоэффективности работы насосных агрегатов в схемах включения с водонапорной башней..... 557
- Савчук В. С., Плехов А. С.** Адаптация параметров сварочного трансформатора с учетом выходных характеристик дуги..... 568

Транспорт

- Аухадеев А. Э.** Теоретическая система уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта..... 577
- Соловьев А. А., Шугай С. Н.** Моделирование качки судна с подвешенным грузом..... 591

Обзор

- Белей В. Ф., Коротких К. В.** Повышение эффективности системы электроснабжения судостроительного завода..... 598

Технология продовольственных продуктов

- Алдаматов Н. Э., Бредихин С. А., Неверов Е. Н.** Охлаждение продукции животного происхождения в воздушно-газовой среде диоксида углерода..... 611
- Иванова К. Р., Привалова Е. А.** Скорлупа кедрового ореха как сорбент в плодово-ягодном виноделии..... 621

Книжная полка

- Власов А. Б.** Тренажерная подготовка судовой машинной команды (электроэнергетические системы)..... 631
- Власов А. Б.** Модели и методы количественной термографии в электроэнергетике..... 633

CONTENTS

Electrical Engineering

Lighting Technology

- Ashryatov A. A., Kuznetsov E. A., Pashkov M. Yu.** Study of lighting characteristics of LED analogues of domestically produced linear fluorescent lamps..... 475

Electrical Complexes and Systems

- Davydov A. E., Bochenkov B. M., Pankrats Yu. V.** Extending the range of dual-zone permanent magnet synchronous motor control..... 486
- Denisov I. V.** Development of a mathematical model of dependence of specific volumetric electrical resistance of SIW-4 insulation on factors affecting its reliability..... 501
- Petrov A. R., Gracheva E. I., Miftakhova N. K.** Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids..... 511
- Petrova R. M., Gracheva E. I.** Assessment of reliability parameters of in-plant power supply schemes with two-transformer substations..... 521

Power Industry

- Bezhik A. S., Lebedev A. K., Romanovsky V. V., Vlasov A. B.** Application of DC distributed bus bar power systems on ships..... 534
- Vlasov A. B.** Algorithms of training programs for simulator training of ship's engine room personnel..... 547
- Kapanski A. A.** Using frequency regulation to improve the energy efficiency of pumping units in switching circuits with a water tower..... 557
- Savchuk V. S., Plekhov A. S.** Adaptation of welding transformer parameters taking into account arc output characteristics..... 568

Transport

- Aukhadeev A. E.** Theoretical system of levels of constructing vehicle movement of ground urban electric transport vehicle..... 577
- Solovyov A. A., Shugay S. N.** Modeling the motion of a ship with suspended cargo..... 591

Review

- Beley V. F., Korotkikh K. V.** Efficiency increasing of a shipyard power supply system..... 598

Food Technology

- Aldamatov N. E., Bredikhin S. A., Neverov E. N.** Cooling of animal products in an air-gas environment of carbon dioxide..... 611
- Ivanova K. R., Privalova E. A.** Pine nut shell as a sorbent in fruit winemaking..... 621

Bookshelf

- Vlasov A. B.** Simulator training of ship's engine room personnel (electric power systems)..... 631
- Vlasov A. B.** Models and methods of quantitative thermography in electric power engineering..... 633

Исследование светотехнических характеристик светодиодных аналогов линейных люминесцентных ламп отечественного производства

А. А. Ашрятов, Е. А. Кузнецов*, М. Ю. Пашков

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
г. Саранск, Россия;

e-mail: kuzneczov_ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
19.08.2024;

получена
после доработки
20.09.2024;

принята
к публикации
27.09.2024

Ключевые слова:

светодиодная лампа,
колба Т8,
световой поток,
цветовая температура,
индекс
цветопередачи,
световая отдача,
коэффициент
пульсации

Светодиодные линейные лампы набирают популярность в различных областях применения благодаря своим преимуществам в энергоэффективности, долговечности и качестве освещения. В работе рассмотрены конструкции испытуемых светодиодных (СД) ламп отечественного производства фирмы AVANLED, предназначенные для замены люминесцентных ламп Т8 мощностью 18 Вт, а также исследованы их светотехнические характеристики. Конструктивно исследуемые лампы выпускаются в двух исполнениях: с прозрачной и матированной стеклянной колбой. Анализ зависимости электрических характеристик ламп от напряжения сети (U_c) доказал, что они практически не зависят от изменения U_c в пределах $\pm 15\%$. Результаты измерений светотехнических характеристик показали, что большинство параметров соответствуют заявленным значениям: погрешность цветовой температуры не превышает 5%, погрешность индекса цветопередачи – 0,1%, а показатель пульсации светового потока находится в заявленных 5% и равен 0,1%. Световой поток при номинальном напряжении сети отличается от заявленного значения 1 000 лм, причем у СД ламп с прозрачной трубкой световой поток меньше, чем с матовой. Мощность ламп варьируется от 8 до 8,7 Вт, что не соответствует заявленным 9 Вт. Световая отдача только у СД ламп с цветовой температурой 6 500 К соответствует заявленному значению. У СД ламп с цветовой температурой 4 000 К (матовая колба) световая отдача на 2,4% больше заявленного значения. У остальных ламп световая отдача меньше заявленного значения. Анализ пространственного распределения силы света показал, что СД лампы с матированной стеклянной колбой целесообразно использовать для замены люминесцентных ламп в светильниках с зеркальной оптикой, а СД лампы с прозрачной стеклянной колбой – для замены люминесцентных ламп в светильниках с рассеивателем, который позволяет снизить блескость светодиодов.

Для цитирования

Ашрятов А. А. и др. Исследование светотехнических характеристик светодиодных аналогов линейных люминесцентных ламп отечественного производства. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 475–485. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-475-485>.

Study of lighting characteristics of LED analogues of domestically produced linear fluorescent lamps

Albert A. Ashryatov, Evgeniy A. Kuznetsov*, Maxim Yu. Pashkov

*National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev, Saransk, Russia;

e-mail: kuzneczov_ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>

Article info

Received
19.08.2024;

received
in revised form
20.09.2024;

accepted
27.09.2024

Key words:

LED lamp,
T8 bulb,
luminous flux,
color temperature,
color rendering index,
luminous efficiency,
pulsation coefficient

Abstract

LED linear lamps are gaining popularity in various fields of application due to their advantages in energy efficiency, durability and lighting quality. The paper considers the designs of the tested LED lamps of domestic production by AVANLED company intended to replace fluorescent lamps T8 with a power of 18 W, and also studies their lighting characteristics. Structurally, the studied lamps are produced in two versions: with a transparent and frosted glass bulb. Analysis of the dependence of the electrical characteristics of the lamps on the network voltage (U_c) has proved that they are practically independent of changes in U_c within $\pm 15\%$. The results of measurements of lighting characteristics have shown that most parameters correspond to the declared values: the error of color temperature does not exceed 5%, the error of color rendering index is 0.1%, and the pulsation index of luminous flux is within the declared 5% and equals 0.1%. The luminous flux at the nominal voltage of the network differs from the declared value of 1,000 lm, and the luminous flux of LED lamps with a transparent tube is less than with a matte one. The power of the lamps varies from 8 to 8.7 W, which does not correspond to the declared 9 W. The luminous efficiency of LED lamps with a color temperature of 6,500 K corresponds to the declared value. For LED lamps with a color temperature of 4,000 K (matte bulb), the luminous efficiency is 2.4% higher than the declared value. The luminous efficiency of the remaining lamps is less than the declared value. Analysis of the spatial distribution of luminous intensity has shown that LED lamps with a frosted glass bulb are suitable for replacing fluorescent lamps in luminaires with mirror optics, and LED lamps with a transparent glass bulb are suitable for replacing fluorescent lamps in luminaires with a diffuser reducing the glare of LEDs.

For citation

Ashryatov, A. A. et al. 2024. Study of lighting characteristics of LED analogues of domestically produced linear fluorescent lamps. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 475–485. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-475-485>.

Введение

Светодиодные линейные лампы набирают все большую популярность в различных областях применения благодаря своим преимуществам в энергоэффективности, долговечности и качестве освещения (Гилс и др., 2012; Ryckaert et al., 2012; Амелькина и др., 2012; Лишик и др., 2010). Чтобы обеспечить оптимальную производительность и удовлетворить различные потребности пользователей, важно тщательно изучить и оценить светотехнические характеристики этих ламп.

Исследование светотехнических характеристик светодиодных линейных ламп представляет собой всесторонний анализ таких факторов, как световой поток, световая отдача, цветопередача, цветовая температура и распределение силы света в пространстве (Микаева и др., 2013; Козлов и др., 2017; Коняев и др., 2022). Исследование направлено на подробное изучение этих параметров и их влияния на эффективность, качество и применение светодиодных линейных ламп.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью анализа светотехнических характеристик светодиодных линейных ламп отечественного производства фирмы AVANLED с целью замены люминесцентных ламп типа Т8 для оценки возможности импортозамещения аналогичных импортных СД ламп, которые широко распространены на отечественном рынке световой продукции, причем часто сомнительного качества.

Научная новизна исследования заключается в тщательном и всестороннем анализе светотехнических характеристик СД ламп отечественного производства, что позволит оценить их качество по сравнению с СД лампами различных производителей и принять обоснованные решения при выборе СД ламп (Чмиль и др., 2019; Нестёркина и др., 2022а).

Цель работы – исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп отечественного производства фирмы AVANLED для замены люминесцентных ламп типа Т8.

Материалы и методы

Для экспериментальных исследований в розничной торговой сети г. Саранск были приобретены шесть типов СД ламп в колбе Т8 по три образца каждого типа фирмы AVANLED российского производства¹.

Технические параметры выбранных СД ламп для исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические параметры выбранных СД ламп для исследования
Table 1. Technical parameters of the selected LED lamps for the study

Наименование (артикул)	AVANLED AL T8-9-830-600	AVANLED AL T8-9-840-600	AVANLED AL T8-9-865-600	AVANLED AL T8-9-830-600-M	AVANLED AL T8-9-840-600-M	AVANLED AL T8-9-865-600-M
Мощность, Вт	9					
Диапазон рабочих напряжений, В	195–265					
Световой поток, лм	1 000					
Цветовая температура, К	3 000	4 000	6 500	3 000	4 000	6 500
Индекс цветопередачи, Ra	>80					
Цоколь	G13, неповоротный					
Материал колбы (покрытие колбы)	Стекло (прозрачная)			Стекло (матовая)		
Длина, мм	600					
Срок службы, ч	50 000					

По внешнему виду, согласно технической информации, приведенной на сайте производителя², образцы отличаются только покрытием колбы (табл. 1) и обозначением на цоколе. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

AVANLED AL T8 – светодиодные лампы общего назначения. Колба лампы цилиндрическая, выполненная из прозрачного стекла. Лампы AVANLED AL T8 повторяют форму и размеры стандартных линейных люминесцентных ламп мощностью 18 Вт в колбе Т8. В конструкции лампы используются

¹ Российский производитель двухцокольных линейных LED ламп. URL: <https://avanled.ru>.

² Там же.

стандартные неповоротные штырьковые цоколи G13, по одному с каждой стороны лампы, при этом на одном из них приводится бренд лампы и ее номинальные характеристики (рис. 2). На наличие матового покрытия на внутренней поверхности колбы указывает буква "M" в маркировке лампы.



Рис. 1. Внешний вид исследуемых СД ламп
Fig. 1. External appearance of the LED lamps under study

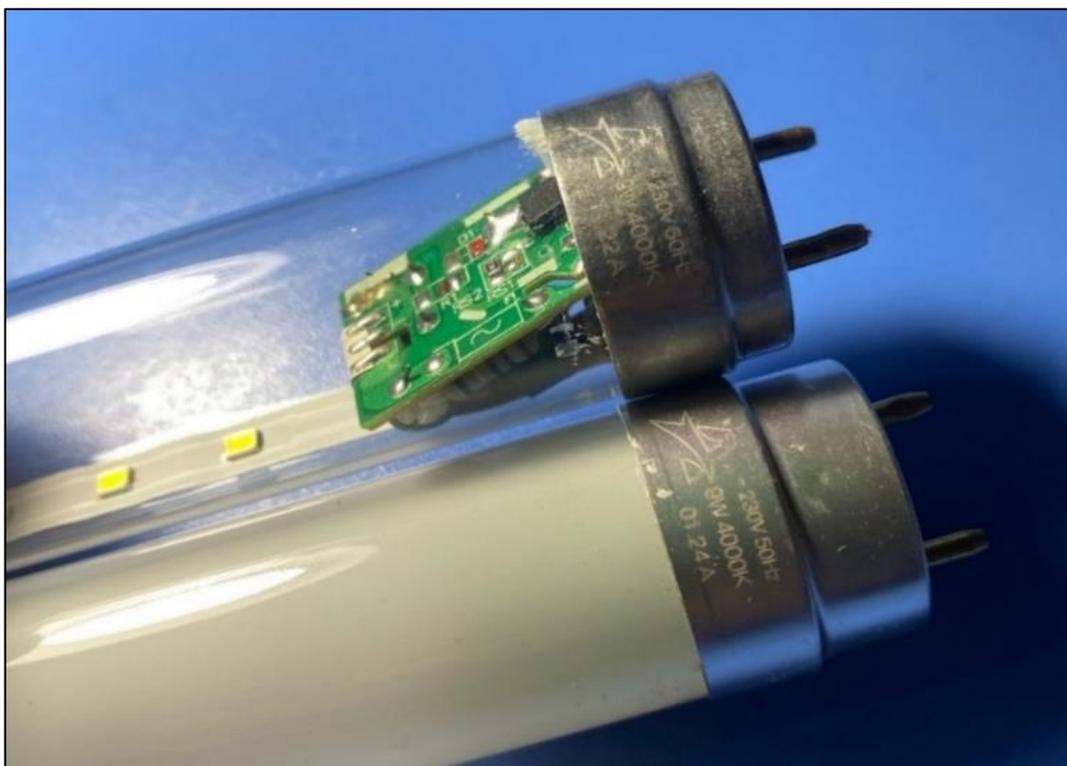
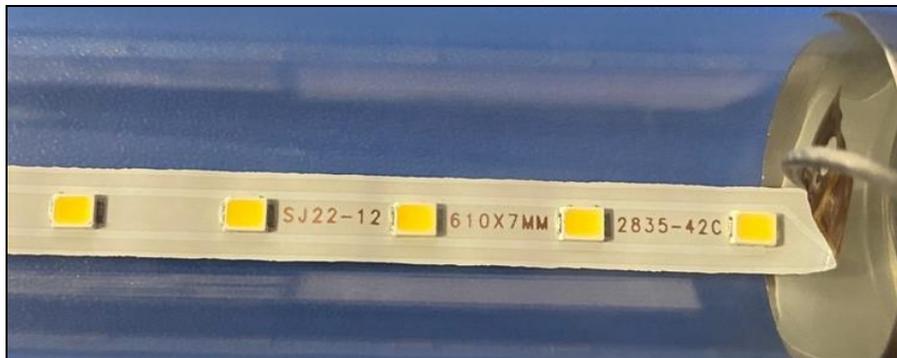


Рис. 2. Маркировка СД ламп на цоколях
Fig. 2. Marking of LED lamps on bases

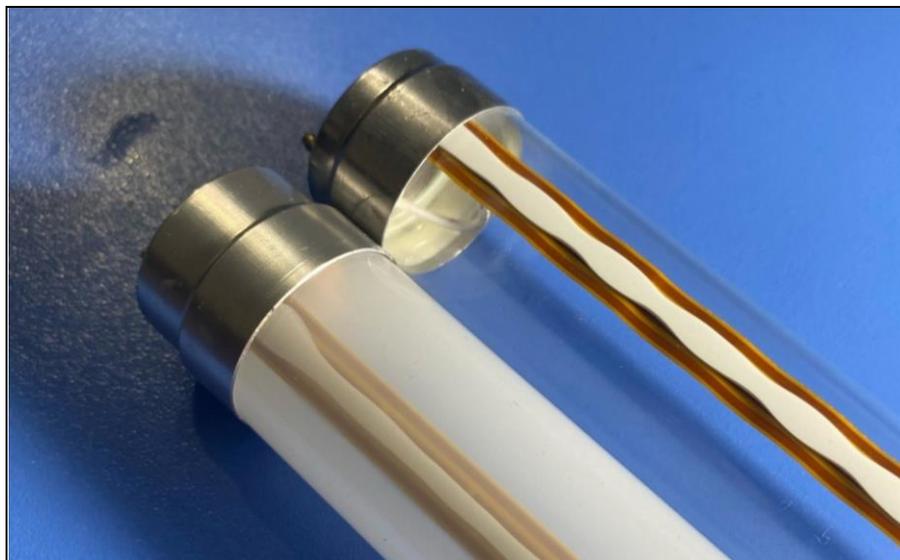
Ассортимент светодиодных ламп серии AVANLED AL T8 представлен цветовыми температурами 3000, 4000 и 6500 К. Лампы работают от сетевого напряжения 195–265 В с частотой 50 Гц без внешнего ПРА (лампы имеют встроенный драйвер). Схемы замены светодиодных ламп приведены в "Листовке продукта" на сайте производителя³.

³ Российский производитель двухцокольных линейных LED ламп. URL: <https://avanled.ru>.

В исследуемых светодиодных лампах серии AVANLED AL T8 используется специальная светодиодная лента шириной 7 мм, длиной 610 мм, на одном ее конце располагается контактная площадка "L", а на другом – три: "+", "-" и "L". По центру ленты располагаются высокоэффективные SMD светодиоды серии 2835 – 42 штуки, соединенные последовательно. Характеристики ленты приведены на ее поверхности (рис. 3, а). Лента крепится к колбе с помощью специального теплопроводящего клея белого цвета, который также используется для отвода тепла от светодиодов в стеклянную колбу (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Светодиодная лента, используемая в исследованных СД лампах: обозначение светодиодной ленты (а) и ее крепление к внутренней поверхности колбы (б)

Fig. 3. LED strip used in the studied LED lamps: LED strip designation (а) and its attachment to the inner surface of the bulb (б)

Внутри прозрачного корпуса лампы контакты цоколя замкнуты между собой (рис. 4), что повышает надежность подключения лампы к питающей сети и, соответственно, сетевое напряжение подводится к обоим цоколям лампы. Конец светодиодной ленты с одной контактной площадкой "L" с помощью припаянного к ней гибкого проводника соединяется с штырьком цоколя путем механического обжима проводника в штырьке (рис. 5).

Другой конец светодиодной ленты с тремя контактными площадками ("+", "-", и "L") припаивается к печатной плате драйвера, который через гибкий проводник соединяется со штырьком цоколя лампы, где располагается драйвер (рис. 6).

Исследования ламп проводились в лаборатории Центра коллективного пользования "Светотехническая метрология" (в Институте электроники и светотехники МГУ им. Н. П. Огарёва)⁴. Измерения электрических и световых параметров проходили при нормальных условиях, в соответствии с методикой по ГОСТ⁵. При

⁴ Центр коллективного пользования научным оборудованием "Светотехническая метрология". URL: http://www.mrsu.ru/ru/sci/labs.php?ELEMENT_ID=57865&phrase_id=1149162.

⁵ ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М., 2014. 43 с.

этом измерения параметров всех указанных СД ламп велись с помощью фотоколориметрической измерительной установки, блока питания переменного тока DPS1060, измерителя электрической мощности АКИП-2501, гониофотометрического комплекса GO-2000A и пульсметра-люксметра ТКА-ПКМ (08) (Микаева и др., 2012).

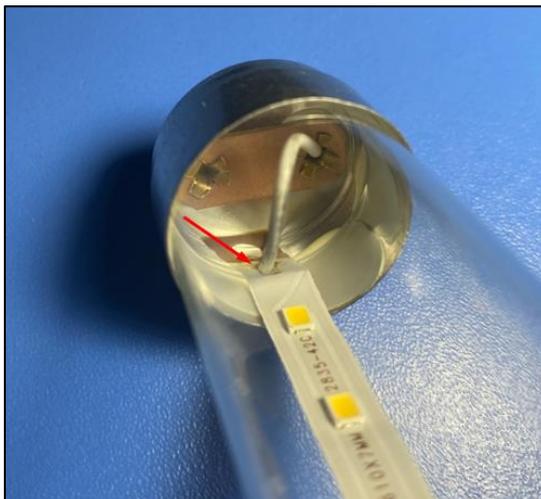


Рис. 4. Соединение ленты с штырьком цоколя с помощью гибкого проводника
Fig. 4. Connecting the tape to the base pin using a flexible conductor



Рис. 5. Механический зажим гибкого проводника с штырьком цоколя
Fig. 5. Mechanical clamping of the flexible conductor with the base pin

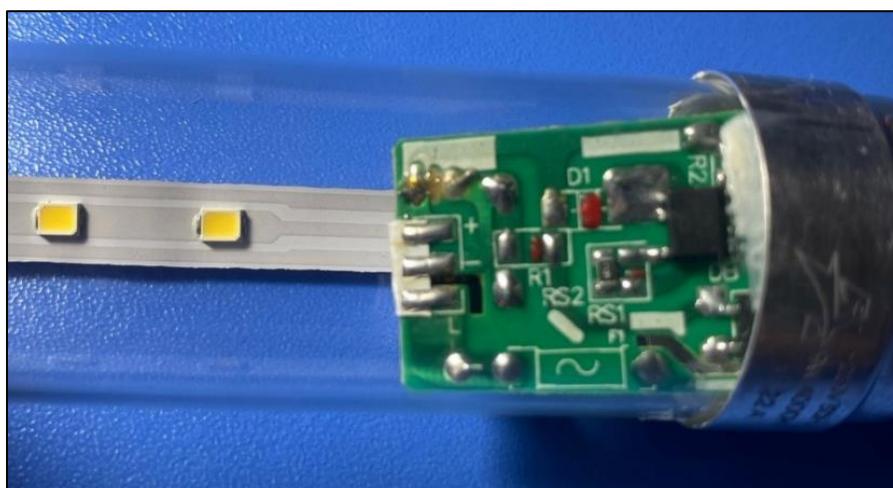


Рис. 6. Внешний вид драйвера исследуемых ламп
Fig. 6. External appearance of the driver of the lamps under study

Вначале определялось время стабилизации – время, необходимое для достижения стабильных тепловых условий работы СД лампы согласно ГОСТ⁶. При этом стабилизируются электрические и световые параметры лампы. Впоследствии перед проведением исследований светотехнических характеристик испытуемых СД ламп согласно ГОСТ⁷ осуществлялся их отжиг в течение 15 мин непрерывного горения.

По методике ГОСТ⁸ пульсметром-люксметром ТКА-ПКМ (08) определялась зависимость коэффициента пульсации ламп (k_p) от напряжения сети (U_c) при изменениях последнего в пределах от минимального к максимальному, заявленному производителем ($\pm 15\%$ от номинального). Измерения k_p проводились в темной комнате при стабилизации светового потока в течение 15 мин и типовом размещении контрольных точек на плане помещения. В каждой контрольной точке проводилось трехкратное измерение освещенности в течение 5 мин.

Использовались также методы измерения коррелированной цветовой температуры $T_{цк}$ согласно ГОСТ⁹.

Измерения изменений светового потока ламп в период стабилизации их электрических и световых характеристик при номинальном U_c проводились на гониофотометрическом комплексе GO-2000A. Также на данном комплексе были произведены замеры пространственного распределения силы света каждой лампы.

После стабилизации на измерителе электрической мощности АКПП-2501 проводились исследования электрических характеристик испытуемых ламп¹⁰.

На фотоколориметрической измерительной установке фирмы Gooch&Housego, содержащей фотометрический шар OL IS7600 диаметром 2 м, многоканальный спектро радиометр OL 770 VIS/NIR, оптоволоконный кабель 770-7G-3.0, арматуру для крепления ламп и ПК, проводились исследования индекса цветопередачи и спектральных характеристик и светового потока.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерения светового потока $\pm 9\%$, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения $T_{цк} = \pm 25$ К, относительная погрешность установки выходного тока $\pm 0,02\%$.

Обработка результатов всех измерений осуществлялась с помощью встроенного программного обеспечения GQ-Soft с выводом результатов на ПК.

Принцип действия фотоколориметрической измерительной установки основан на измерении абсолютной спектральной плотности потока излучения, интегрировании ее и нахождении таким образом потока излучения, попадающего на фотометрическую площадку – торец оптоволоконного ввода, связанного со спектрометром с ПЗС-линейкой. Все вычисления выполнялись автоматически. Программное обеспечение установки выполняет функции отображения на экране управляющего компьютера информации и задания условий измерений¹¹.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения электрических характеристик исследуемых ламп представлены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение электрических характеристик СД ламп при изменении напряжения сети U_c
Table 2. Changes in the electrical characteristics of LED lamps when changing the network voltage U_c

Название лампы	U_c , В	195	200	210	220	230	240	250	260	265
AVANLEDAL T8-9-830-600	P, Вт	8,576	8,585	8,603	8,633	8,673	8,695	8,728	8,763	8,782
	I, mA	77,8	76,56	74,25	72,23	70,46	68,94	67,43	66,07	65,43
	PF	0,565	0,561	0,552	0,543	0,535	0,525	0,518	0,510	0,506
AVANLEDAL T8-9-830-600-M	P, Вт	7,946	7,948	7,948	7,963	7,977	7,982	8,002	8,035	8,047
	I, mA	73,00	71,79	69,56	67,57	65,95	64,22	62,75	61,49	60,87
	PF	0,558	0,553	0,544	0,536	0,527	0,518	0,510	0,502	0,499
AVANLEDAL T8-9-840-600	P, Вт	8,499	8,505	8,521	8,543	8,569	8,599	8,630	8,667	8,732
	I, mA	77,21	75,98	73,66	71,66	69,84	68,22	66,72	65,38	64,86
	PF	0,564	0,560	0,551	0,542	0,533	0,526	0,517	0,510	0,508

⁶ ГОСТ Р 54815–2011. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. М., 2012. 11 с.

⁷ ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М., 2014. 43 с.

⁸ ГОСТ 33393–2015. Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности. М., 2019. 11 с.

⁹ ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М., 2014. 43 с.

¹⁰ Технические характеристики на измерители электрической мощности. URL: https://akiptm.nt-rt.ru/images/manuals/izmeriteli_moshnosty.pdf.

¹¹ Федеральная государственная информационная система Росстандарта. URL: http://fundmetrology.ru/10_tipy_si/11/qJbKqJpWgBeM/.

AVANLEDAL T8-9-840-600-M	P, Вт	7,920	7,924	7,918	7,930	7,947	7,982	7,992	8,024	8,036
	I, mA	72,55	71,34	69,06	67,11	65,44	63,99	62,39	61,12	60,50
	PF	0,560	0,555	0,546	0,537	0,528	0,520	0,512	0,505	0,501
AVANLEDAL T8-9-865-600	P, Вт	8,149	8,142	8,148	8,124	8,165	8,187	8,206	8,234	8,244
	I, mA	74,52	73,21	70,93	68,75	67,04	65,48	63,99	62,62	61,98
	PF	0,561	0,556	0,547	0,537	0,529	0,521	0,513	0,506	0,502
AVANLEDAL T8-9-865-600-M	P, Вт	8,044	8,061	8,069	8,157	8,333	8,074	8,091	8,111	8,123
	I, mA	73,46	72,27	69,97	68,12	66,62	64,59	63,12	61,80	61,17
	PF	0,561	0,557	0,549	0,544	0,544	0,521	0,512	0,505	0,501

Анализ результатов измерений зависимости электрических характеристик ламп от U_c показал, что:

- мощность (P) прозрачных ламп выше, чем у матовых; ни одна из ламп не достигла заявленной мощности в 9 Вт; при снижении U_c на 15 % мощность уменьшается на 0,05 Вт (0,45 %), при повышении U_c на 15 % мощность увеличивается на 0,09 Вт (1 %);

- ток (I) прозрачных ламп выше, чем у матовых; при номинальном U_c у всех ламп ток приближен к номинальному в 70 мА; при снижении U_c на 15 % ток увеличивается на 7,2 мА (10,3 %), при повышении U_c на 15 % ток уменьшается на 5,9 мА (8,4 %);

- при снижении U_c на 15 % или повышении U_c на 15 % коэффициент мощности (PF) увеличивается на 0,03 или уменьшается на 0,03 соответственно.

Таким образом, электрические характеристики СД ламп практически не зависят от изменения U_c в пределах ± 15 %.

Время стабилизации электрических параметров и светового потока СД ламп составило 10–12 мин.

Результаты измерений светотехнических характеристик образцов ламп при номинальном напряжении питающей сети приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты измерений светотехнических характеристик
Table 3. Results of measurements of lighting characteristics

Тип СД лампы	Значения величин	Φ , лм	$T_{цк}$, К	R_a	η , лм/Вт	k_n , %
Матовая 3 000 К	заявленные	1 000	3 000	>80	125	<5
	измеренные	953	3 057	80,03	119	0,1
Прозрачная 3 000 К	заявленные	1 000	3 000	>80	125	<5
	измеренные	930	3 107	80,75	107	0,1
Матовая 4 000 К	заявленные	1 000	4 000	>80	125	<5
	измеренные	1 027	4 180	79,71	128	0,1
Прозрачная 4 000 К	заявленные	1 000	4 000	>80	125	<5
	измеренные	975	4 170	81,57	114	0,1
Матовая 6 500 К	заявленные	1 000	6 500	>80	125	<5
	измеренные	1 013	6 413	79,92	125	0,1
Прозрачная 6 500 К	заявленные	1 000	6 500	>80	125	<5
	измеренные	1 005	6 497	80,81	124	0,1

Анализ результатов измерений светотехнических характеристик ламп при номинальном U_c позволяет заключить, что:

- световой поток (Φ) всех исследованных ламп отличается от заявленных значений (с учетом пределов допускаемой относительной погрешности измерения светового потока ± 9 %): с цветовой температурой ($T_{цк}$) 3 000 К у матовой лампы меньше на 48 лм (4,8 %), у прозрачной лампы меньше на 70 лм (7,0 %); с цветовой температурой 4 000 К у матовой лампы больше на 27 лм (2,7 %), у прозрачной лампы меньше на 25 лм (2,5 %); с цветовой температурой 6 500 К у матовой лампы больше на 13 лм (1,3 %), у прозрачной лампы больше на 4 лм (0,4 %). Таким образом, у прозрачных ламп световой поток меньше, чем у матовых;

- световая отдача (η) у СД ламп с цветовой температурой 6 500 К соответствует заявленному значению; у СД ламп с цветовой температурой 4 000 К световая отдача у лампы с матовой колбой на 2,4 % больше заявленного значения, а у лампы с прозрачной колбой – на 8,8 % меньше заявленного значения; у СД ламп с цветовой температурой 3 000 К световая отдача меньше заявленного значения: у лампы с матовой колбой – на 4,8 %, а у лампы с прозрачной колбой – на 14,4 %;

- измеренные $T_{цк}$ матовой и прозрачной СД ламп с цветовой температурой 3 000 К больше от заявленных на 57 К (1,9 %) и 107 К (3,5 %) соответственно; с цветовой температурой 4 000 К больше от заявленных на 180 К (4,5%) и 170 К (4,3 %); с цветовой температурой 6 500 К меньше от заявленных на 87 К (1,3%)

и 3 К (0,04 %); т. е. у ламп с цветовой температурой 6 500 К показания с заявленными расходятся меньше остальных (с учетом пределов допускаемой абсолютной погрешности измерения $T_{цк} = \pm 25$ К);

– общий индекс цветопередачи (R_a) всех исследованных СД ламп близок к заявленному, отличие составляет 0,1 %.

Анализ результатов измерений коэффициента пульсаций (k_p) показал, что k_p исследуемых СД ламп при изменении U_c в пределах ± 15 % не меняется, равняясь 0,1 %, что согласно¹² и с учетом пределов допускаемой основной относительной погрешности измерений пульсации освещенности $\pm 10,0$ % прибора ТКА-ПКМ (08) позволяет использовать их для освещения любых помещений.

Пространственное распределение силы света исследуемых СД ламп при номинальном напряжении сети представлено на рис. 7 и 8.

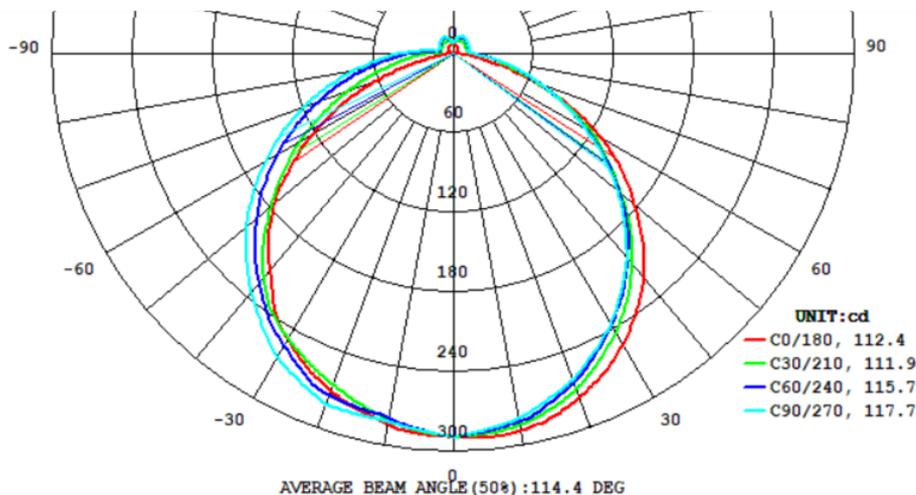


Рис. 7. Кривая силы света СД ламп с прозрачной трубкой
Fig. 7. Light intensity curve of LED lamps with a tube

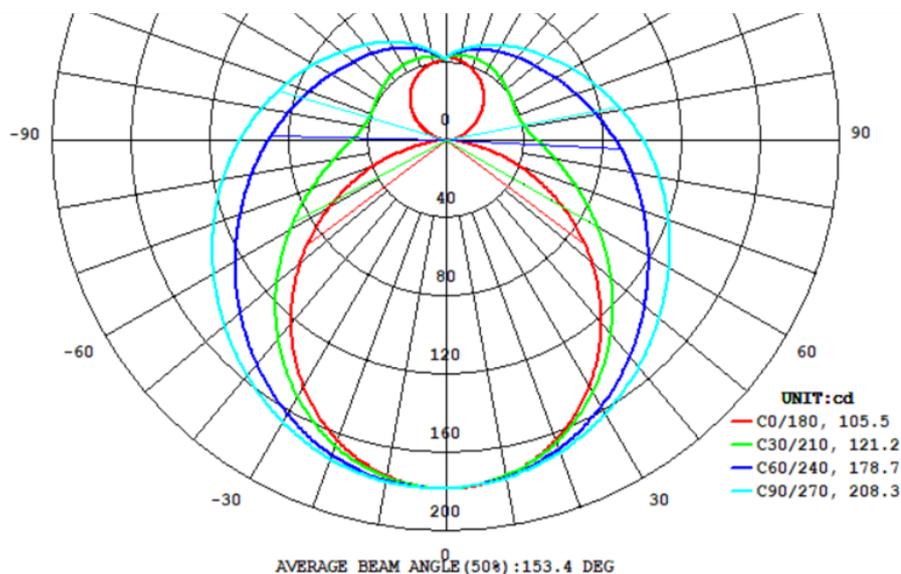


Рис. 8. Кривая силы света СД ламп с матовой трубкой
Fig. 8. Light intensity curve of LED lamps with a frosted tube

Исследования показали, что у СД ламп с прозрачной стеклянной колбой световой поток, излучаемый светодиодами, направляется в нижнюю полушару (рис. 7), соответственно, двойной угол половинной яркости излучения ($2\theta_{0,5}$) СД лампы в плоскости С 90/270 составляет 117,7 градуса, что характеризует косинусный тип излучения SMD-светодиодов, используемых в СД лампах (Агаева и др., 2015; Нестёркина и др., 2022б).

¹² СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95; введ. 2017-05-08. М. : НИИСФ РААСН и ООО "ЦЕРЕРА-ЭКСПЕРТ", 2016. 135 с.

СД лампы с матированной стеклянной колбой имеют КСС, двойной угол половинной яркости излучения которой в плоскости С 90/270 составляет 208,3 градуса, что значительно превышает величину $2\Theta_{0,5}$ у лампы с прозрачной колбой. Это происходит в результате многократных отражений излучения светодиодов от диффузно рассеивающего матового слоя на внутренней поверхности стеклянной трубки. В результате этого свечение матированной стеклянной колбы внешне приближается к свечению люминесцентной лампы Т8 мощностью 18 Вт, которые широко используются в светильниках типа Армстронг¹³. С учетом результатов исследований, приведенных в работах (Ашратов и др., 2012; Нестёркина и др., 2019; Коваленко и др., 2019), СД лампы с матированной стеклянной колбой целесообразно использовать для замены люминесцентных ламп в светильниках с зеркальной оптикой. СД лампы с прозрачной стеклянной колбой целесообразно использовать для замены люминесцентных ламп в светильниках с рассеивателем, который позволяет снизить блескость светодиодов.

Заключение

Результаты исследования показали, что

- время стабилизации электрических параметров и светового потока СД ламп составило 10–12 мин;
- электрические характеристики СД ламп практически не зависят от изменения U_c в пределах $\pm 15\%$;
- световой поток при номинальном напряжении сети отличается от заявленного значения 1 000 лм (может быть меньше на 7 или больше на 2,7 %), причем у СД ламп с прозрачной трубкой световой поток меньше, чем с матовой;
- световая отдача только у СД ламп с цветовой температурой 6 500 К соответствует заявленному значению. Максимальное отклонение в меньшую сторону от заявленного значения было выявлено у СД ламп с прозрачной колбой с цветовой температурой 3 000 К – на 14,4 %;
- только у ламп с цветовой температурой 6 500 К измеренные показания $T_{\text{цк}}$ с заявленными расходятся меньше остальных;
- общий индекс цветопередачи (R_a) всех исследованных СД ламп близок к заявленному, отличие составляет 0,1 %;
- k_p исследуемых СД ламп при изменении U_c в пределах $\pm 15\%$ не меняется, равняясь 0,1 %, что позволяет использовать их для освещения любых помещений.

Анализ пространственного распределения силы света исследуемых СД ламп при номинальном напряжении сети показал, что СД лампы с матированной стеклянной колбой целесообразно использовать для замены люминесцентных ламп в светильниках с зеркальной оптикой, а СД лампы с прозрачной стеклянной колбой – для замены люминесцентных ламп в светильниках с рассеивателем, который позволяет снизить блескость светодиодов.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что отечественные светодиодные линейные лампы фирмы AVANLED для прямой замены люминесцентных ламп типа Т8 мощностью 18 Вт являются высокоэффективными и энергосберегающими источниками света с хорошими светотехническими характеристиками. Они могут успешно применяться для освещения промышленных, офисных, торговых и жилых помещений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Агаева М. В., Чуракова Д. К., Ашратов А. А. Изучение характеристик светодиодных модулей на примере модуля Acgich2 и модуля Оптоган // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : материалы XII всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Саранск, 28–29 мая 2015 г. Саранск : Афанасьев В. С., 2015. С. 145–150. EDN: UJCUMV.
- Амелькина С., Амелькин Э. Исследование возможности замены люминесцентных ламп в светильниках на светодиодные лампы типа Т8 // Полупроводниковая светотехника. 2012. Т. 4, № 18. С. 64–66. EDN: PBULWF.
- Ашратов А. А., Кокинов А. М., Микаева С. А. Исследование линейных светодиодных ламп // Естественные и технические науки. 2012. № 6(62). С. 338–353. EDN: PUJWRB.
- Гилс М. В., Дюринк Г., Оденат Я., Рикаерт В. Р. [и др.]. Характеристики линейных светодиодных ламп прямой замены // Светотехника. 2012. № 1. С. 37–45. EDN: OPFZZZ.
- Коваленко О. Ю., Журавлёва Ю. А., Микаева С. А., Немов В. В. Исследование изменения светотехнических характеристик полупроводниковых источников света различного конструктивного исполнения в процессе

¹³ Громов К. Замена люминесцентных ламп на светодиодные: 2 варианта. URL: <https://m-strana.ru/articles/zamena-lyuminestsentnykh-lamp-na-svetodiodnye/>.

- эксплуатации // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 471–476. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-4-471-476>. EDN: LMVROY.
- Козлов И. Н., Горбунов А. А. Исследование характеристик линейных светодиодных ламп-ретрофитов // XLV Огарёвские чтения : материалы науч. конф., Саранск, 08–13 декабря 2016 г. : в 3 ч. Ч. 1. Саранск : Мордов. гос. ун-т, 2017. С. 305–308. EDN: YRCTWP.
- Коняев, Н. В., Бузылев С. С. К исследованию линейных светодиодных ламп // Роль аграрной науки в устойчивом развитии АПК : материалы II междунар. науч.-практ. конф., г. Курск, 26 мая 2022 г. Курск : Изд-во Курской гос. с.-х. акад. им. И. И. Иванова, 2022. С. 356–360. EDN: SDQGYD.
- Лишик С. И., Паутино А. А., Поседько В. С., Трофимов Ю. В. [и др.]. О светодиодных лампах прямой замены // Светотехника. 2010. № 1. С. 48–54. EDN: MBZUDX.
- Микаева С. А., Ашрятов А. А. Контроль и диагностика исследования светодиодных ламп // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2013. № 47. С. 25–41. EDN: QZHUXD.
- Микаева С. А., Железникова О. Е., Синицына Л. В. Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33–36. EDN: PUWORL.
- Нестёркина Н. П., Журавлёва Ю. А., Савонин А. О., Коваленко О. Ю. [и др.]. Анализ изменения характеристик светодиодных ламп с колбой Т8 в процессе горения // Светотехника. 2022б. № 3. С. 19–24. EDN: IJKAVW.
- Нестёркина Н. П., Коваленко О. Ю., Журавлёва Ю. А. Анализ характеристик светодиодных ламп с колбой Т8 разных производителей // Светотехника. 2019. № 3. С. 59–63. EDN: ZXVHZZ.
- Нестеркина Н. П., Кузнецов Е. А., Журавлева Ю. А. Исследование изменений светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов в результате длительных испытаний // Вестник МГТУ. 2022а. Т. 25, № 4. С. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-305-312>. EDN: VUAFEC.
- Чмилль К. А., Нестёркина Н. П. О создании линейной двухцокольной светодиодной лампы // Междунар. выставка декоративного и технич. освещения, электротехники и автоматизации зданий : докл. XXV науч.-техн. конф. "Молодые светотехники России", Москва, 12 сентября 2019 г. М. : Изд-во МЭИ, 2019. С. 142–146. EDN: NLSYLP.
- Ryckaert W. R., Smet K. A. G., Roelandts I. A. A., Van Gils M. [et al.]. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 49. P. 429–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.042>.

References

- Agayeva, M. V., Churakova, D. K., Ashryatov, A. A. 2015. Studying the characteristics of LED modules using the example of the Acrich2 module and the Optogan module. Proceedings of the XII All-Russ. scien. and techn. conf. with intern. participation *Problems and Prospects for the Development of Domestic Lighting Engineering, Electrical Engineering, and Energy*. Saransk, 28–29 May, 2015. Saransk, pp. 145–150. EDN: UJCUMV. (In Russ.)
- Amelkina, S., Amelkin, E. 2012. Study of the possibility of replacing fluorescent lamps in luminaires with T8 type LED lamps. *Solid-State Lighting*, 4(18), pp. 64–66. EDN: PBULWF. (In Russ.)
- Ashryatov, A. A., Kokinov, A. M., Mикаева, S. A. 2012. Study of linear LED lamps. *Natural and Technical Sciences*, 6(62), pp. 338–353. EDN: PUJWRB. (In Russ.)
- Gils, M. V., Duryk, G., Odenat, Ya., Ryckaert, V. R. et al. 2012. Characteristics of linear LED retrofit lamps. *Light & Engineering*, 1, pp. 37–45. EDN: OPFZZZ. (In Russ.)
- Kovalenko, O. Yu., Zhuravlyova, Yu. A., Mикаева, S. A., Nemov, V. V. 2019. Investigation of changes in the lighting characteristics of semiconductor light sources of various designs during operation. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 471–476. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-4-471-476>. EDN: LMVROY. (In Russ.)
- Kozlov, I. N., Gorbunov, A. A. 2017. Study of the characteristics of linear LED retrofit lamps. Proceedings of the scien. conf. *XLV Ogarev Readings*. In 3 Parts, Part 1, Saransk, 08–13 December, 2016. Saransk, pp. 305–308. EDN: YRCTWP. (In Russ.)
- Konyaev, N. V., Buzylyev, S. S. 2022. On the study of linear LED lamps. Proceedings of the II Intern. scien. and pract. conf. *The Role of Agricultural Science in the Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex*. Kursk, 26 May, 2022, Kursk, pp. 356–360. EDN: SDQGYD. (In Russ.)
- Lishik, S. I., Pautino, A. A., Posedko, B. S., Trofimov, Yu. V. et al. 2010. On LED direct replacement lamps. *Light & Engineering*, 1, pp. 48–54. EDN: MBZUDX. (In Russ.)
- Mикаева, S. A., Ashryatov, A. A. 2013. Control and diagnostics of LED lamps. *Bulletin of Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science*, 47, pp. 25–41. EDN: QZHUXD. (In Russ.)
- Mикаева, S. A., Zheleznikova, O. E., Sinitsyna, L. V. 2012. A complex of modern research equipment for light measurements. *Automation. Modern Technologies*, 12, pp. 33–36. EDN: PUWORL. (In Russ.)
- Nesterkina, N. P., Zhuravlyova, Yu. A., Savonin, A. O., Kovalenko, O. Yu. et al. 2022б. Analysis of the characteristics of T8 LED lamps during operation. *Light & Engineering*, 3, pp. 19–24. EDN: IJKAVW. (In Russ.)

- Nesterkina, N. P., Kovalenko, O. Yu., Zhuravlyova, Yu. A. 2019. Analysis of the characteristics of T8 LED lamps from different manufacturers. *Light & Engineering*, 3, pp. 59–63. EDN: ZXVHZZ. (In Russ.)
- Nesterkina, N. P., Kuznetsov, E. A., Zhuravlyova, Yu. A. 2022a. Investigation of changes in the lighting characteristics of LED retrofit lamps as a result of long-term testing. *Vestnik of MSTU*, 25(4), pp. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-305-312>. EDN: VUAFEC. (In Russ.)
- Chmil, K. A., Nesterkina, N. P. 2019. On the creation of a linear two-cap LED lamp. International Exhibition of Decorative and Technical Lighting, Electrical Engineering, and Building Automation. Moscow, 12 September, 2019. Moscow, pp. 142–146. EDN: NLSYLP. (In Russ.)
- Ryckaert, W. R., Smet, K. A. G., Roelandts, I. A. A., Van Gils, M. et al. 2012. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. *Energy and Buildings*, 49, pp. 429–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.042>.

Сведения об авторах

Ашрятов Альберт Аббясович – ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Россия, 430005;
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
д-р техн. наук, доцент; e-mail: ashryatov@rambler.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>

Albert A. Ashryatov – 68 Bolshevistskaya Str., Saransk, Russia, 430005;
National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev,
Dr Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: ashryatov@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>

Кузнецов Евгений Александрович – ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Россия, 430005;
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
аспирант; e-mail: kuznecov_ea@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>

Evgeny A. Kuznetsov – 68 Bolshevistskaya Str., Saransk, Russia, 430005;
National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev, PhD Student;
e-mail: kuznecov_ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>

Пашков Максим Юрьевич – ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Россия, 430005;
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва, бакалавр; e-mail: genius_extreme@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9065-016X>

Maxim Yu. Pashkov – 68 Bolshevistskaya Str., Saransk, Russia, 430005;
National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev, Bachelor;
e-mail: genius_extreme@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9065-016X>

УДК 62-589.1

Расширение диапазона двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

А. Е. Давыдов*, Б. М. Боченков, Ю. В. Панкрац

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия;
e-mail: nobody.one911@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
20.08.2024;

получена
после доработки
29.09.2024;
принята
к публикации
13.11.2024

Ключевые слова:

металлорежущие станки,
синхронный двигатель
с постоянными
магнитами,
математическое
моделирование,
преобразователь частоты,
двухзонное управление,
индуктивность

Достижение двукратного увеличения скорости вращения синхронного двигателя с постоянными магнитами при сохранении его мощностных характеристик на исходном уровне позволяет повысить производительность и качество обработки материалов на металлорежущих станках. Теоретическое исследование проведено с использованием математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами. Новый алгоритм управления предусматривает две рабочие зоны: зону номинальной скорости, где поддерживаются требуемые мощностные параметры (первую зону), и зону повышенной скорости с увеличением частоты вращения в два раза относительно номинальной (вторую зону). Для оценки эффективности разработанного алгоритма выполнены численное моделирование и сравнительный анализ с традиционными методами управления синхронного двигателя с постоянными магнитами. Полученные результаты продемонстрировали преимущества предложенного подхода, позволяющего обеспечить двукратный рост скорости привода главного движения металлорежущего станка без ухудшения его энергетических характеристик. Данные теоретического исследования подтверждены имитационным моделированием замкнутой системы в программном комплексе SimInTech. Разработанный алгоритм управления может применяться для оптимизации работы электроприводов главного движения на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе металлообрабатывающего оборудования.

Для цитирования

Давыдов А. Е. и др. Расширение диапазона двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 486–500. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-486-500>.

Extending the range of dual-zone permanent magnet synchronous motor control

Artem E. Davydov*, Boris M. Bochenkov, Yuriy V. Pankrats

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;
e-mail: nobody.one911@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Article info

Received
20.08.2024;

received
in revised
29.09.2024;

accepted
13.11.2024

Key words:

CNC machines,
permanent magnet
synchronous motor,
mathematical modeling,
frequency converter,
dual-zone control,
inductance

Abstract

Achieving a twofold increase in the rotation speed of a permanent magnet synchronous motor while maintaining its power characteristics at the original level permits to increase the productivity and quality of material processing on metal-cutting machines. The theoretical study has been conducted using the mathematical model of a permanent magnet synchronous motor. The new control algorithm provides for two working zones: a nominal speed zone where the required power parameters are maintained (the first zone), and a high speed zone with a twofold increase in the rotation speed relative to the nominal (the second zone). To assess the efficiency of the developed algorithm, numerical modeling and comparative analysis with traditional control methods for a permanent magnet synchronous motor have been performed. The obtained results have demonstrated the advantages of the proposed approach permitting a twofold increase in the speed of the main drive of a metal-cutting machine without deteriorating its energy characteristics. The data of the theoretical study have been confirmed by simulation modeling of a closed system in the SimInTech software package. The developed control algorithm can be used to optimize the operation of main drives based on a permanent magnet synchronous motor as part of metalworking equipment.

For citation

Davydov, A. E. et al. 2024. Extending the range of dual-zone permanent magnet synchronous motor control. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. x–x. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-xxx-xxx>.

Введение

В современной промышленности в качестве приводных узлов используются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) (Фираго, 2011; Коваль и др., 2019; Davydov et al., 2022). Электронное регулирование СДПМ определяет степень качества обработки деталей и способствует повышению общей производительности станков (Грубый, 2020; Давыдов и др., 2024; Щагин и др., 2022). Наличие двумерного вектора управления СДПМ позволяет, наряду с решением основной задачи формирования желаемого момента, решать дополнительную задачу двухзонного управления. При двухзонном управлении появляется возможность расширения диапазона регулирования СДПМ посредством ослабления потока двигателя, благодаря чему увеличивается скорость вращения ротора. Однако диапазон регулирования во второй зоне ограничен параметрами двигателя (прежде всего индуктивностью), поэтому скорость можно увеличить на 20–30 % (Коваль и др., 2019; Davydov et al., 2022; Грубый, 2020; Давыдов и др., 2024).

Начальный этап решения проблемы расширения диапазона регулирования СДПМ представлен в статьях (Davydov et al., 2022, 2021; Kotin et al., 2023). Данная статья является продолжением исследования, проведенного в работе (Давыдов и др., 2024), где были выполнены первичные расчеты ослабления магнитного потока для синхронных двигателей с постоянными магнитами. В ходе настоящего исследования: 1) рассмотрен метод расширения диапазона регулирования во второй зоне, включающий новый алгоритм управления при внедрении дополнительных индуктивностей в цепь питания СДПМ, что позволило достичь двукратного увеличения диапазона скоростей без ухудшения мощностных характеристик двигателя; 2) проведены численные эксперименты и сравнительный анализ, демонстрирующий эффективность предложенного подхода.

Научная значимость исследования состоит в преодолении ограничений расширения диапазона регулирования скорости, обусловленных конструкцией СДПМ, для чего предлагается рассмотреть возможность введения дополнительного блока индуктивностей в цепь питания статора, способствующего расширению диапазона до удвоения номинальной скорости вращения.

Практическая значимость исследования заключается во внедрении в производство технологии ослабления магнитного потока с использованием дополнительных индуктивностей в электроприводах с СДПМ, что представляет собой перспективное направление развития машиностроения. Оптимизация конструкции СДПМ способствует повышению производительности и эффективности работы фрезерных станков. Проводимые в этой области исследования могут стать основой для создания более точных и высокоэффективных систем фрезерования, что позволит значительно улучшить качество обработанных поверхностей деталей и снизить интенсивность износа режущего инструмента (Давыдов и др., 2024).

Материалы и методы

При проведении моделирования использованы параметры СДПМ, представленные в таблице. Расчеты и имитационное моделирование осуществлены с помощью специализированного программного комплекса SimInTech (ООО "ЗВ Сервис", Россия). Применяемые в данной работе модели СДПМ, а также ПИ-регуляторов системы управления были предварительно выполнены и верифицированы разработчиками этого программного обеспечения.

Таблица. Характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами
Table. Characteristics of permanent magnet synchronous motor

Характеристика	Значение
Количество пар полюсов	2
Номинальная мощность	5 500 Вт
Напряжение	325 В
Номинальная скорость	1 500 об/мин
Номинальная частота	50 Гц
КПД	93,1 %
Номинальный ток	10,6 А
Номинальный момент	35 Нм
Максимальный момент (2 мин)	100 Нм
Коэффициент мощности η	0,99
Фазное сопротивление Ω	0,65 Ом
Индуктивность двигателя	8,2 мГн
Индуктивность дополнительных обмоток	16,4 мГн

График перехода от первой зоны управления, где преобладает максимальный момент, ко второй зоне, где момент снижается, а скорость увеличивается, представлен на рис. 1.

Из графика видно, что для реализации второй зоны управления необходимо ослабить потокосцепление двигателя; в результате этого уменьшается максимальный момент M , Нм, в то время как угловая

скорость ω , рад/с, увеличивается. Важно отметить, что при таких изменениях мощность P , кВт, остается на уровне номинальной.

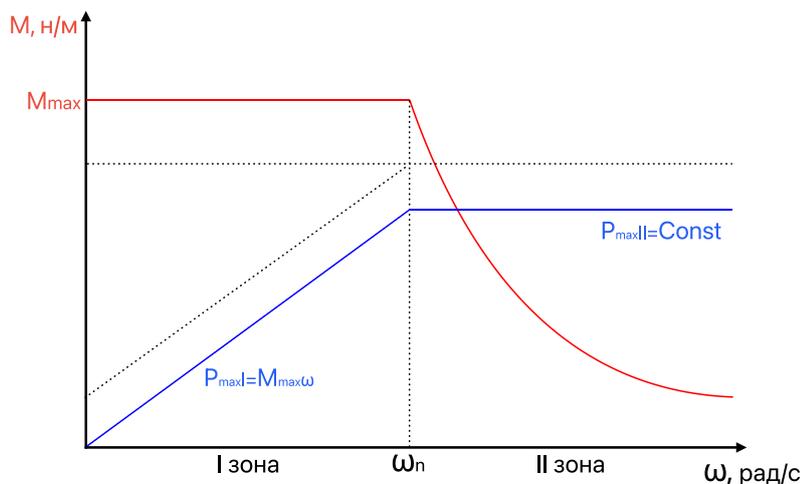


Рис. 1. Схема перехода синхронного двигателя с постоянными магнитами во вторую зону управления
 Fig. 1. Transition diagram of the permanent magnet synchronous motor to the second control zone

Устройство электропривода главного движения металлорежущего станка (рис. 2) имеет структуру, включающую контроллер управления, инвертор, источник постоянного напряжения и СДПМ. Для расширения диапазона регулирования предлагается добавить блок с дополнительными индуктивностями.

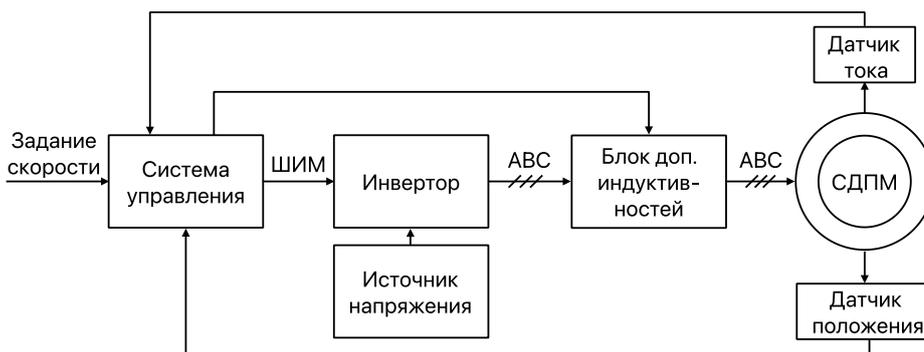


Рис. 2. Структурная схема электропривода
 Fig. 2. Block diagram of the electric drive

В качестве системы координат выбрана система dq , на основе которой построена структурная схема электропривода (рис. 3).

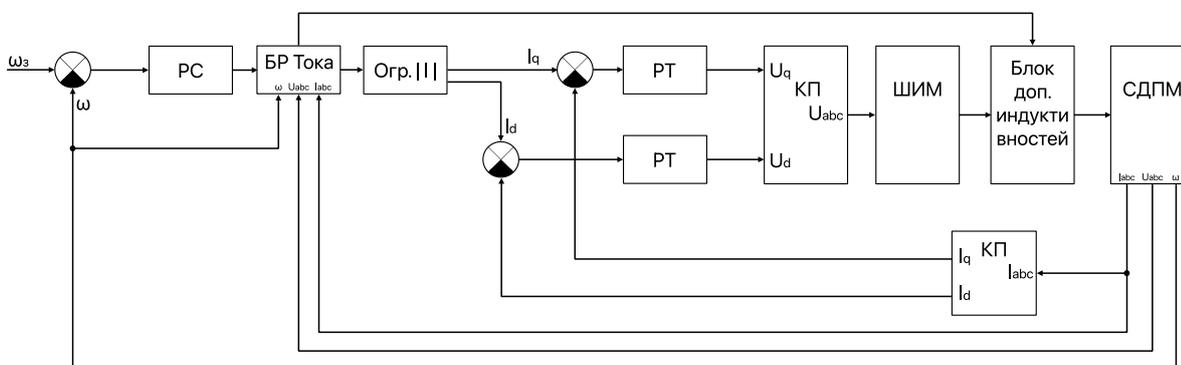


Рис. 3. Блок-схема dq системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами
 Fig. 3. Block diagram of dq control system permanent magnet synchronous motor

Для перехода во вторую зону управления требуется ослабить магнитный поток двигателя, для чего необходимо увеличить d -составляющую контура регулирования скорости. Это решение позволяет увеличить диапазон скоростей вращения во второй зоне на 33 % по сравнению с номинальной скоростью без ухудшения мощностных характеристик. В отличие от предыдущего исследования (Давыдов и др., 2024), в данной работе внедрены дополнительные индуктивности в цепь питания СДПМ, способствующие расширению диапазона регулирования скоростей во второй зоне. Для моделирования использовано программное обеспечение (ПО) SimInTech, разработанное в России, которое продемонстрировало свою эффективность в предыдущих исследованиях. В рамках работы проведено моделирование различных режимов работы двигателя, что позволило более детально изучить влияние ослабления магнитного потока с дополнительными индуктивностями на его характеристики. Детали диаграммы (рис. 3) следуют в порядке слева направо: настройка желаемой скорости двигателя, обратная связь по скорости, регулирование скорости, блок расчета (БР) тока, ограничение тока по модулю, обратные связи по току q и d , регуляторы тока в координатах dq , координатный преобразователь dq в ABC , блок преобразования ШИМ, блок дополнительных обмоток, СДПМ, координатный преобразователь ABC в dq и итоговая скорость (Давыдов и др., 2024; Davydov et al., 2021; Костыгов и др., 2014; Li et al., 2012). Блок расчета тока, помимо формирования необходимого задания тока I_d в первой и второй зоне, выдает сигнал на включение дополнительных обмоток.

Из уравнения равновесия статора (Давыдов и др., 2024) выводится уравнение формирования напряжения СДПМ:

$$\begin{cases} U_{sd} = -\omega_e L_s I_{sq}; \\ U_{sq} = \Psi_f \omega_e + \omega_e L_s I_{sd}, \end{cases} \quad (1)$$

из которого выводится ограничение по напряжению U_s , описываемое формулой

$$U_s = \sqrt{U_{sd}^2 + U_{sq}^2} \leq U_{\max} = U_n. \quad (2)$$

Формирование тока I_d рассчитывается как

$$I_d = \sqrt{\frac{U_s^2}{\omega_e^2 L_s^2} - (I_q)^2} - \frac{\Psi_f}{L_s}, \quad (3)$$

где L_s – индуктивность СДПМ; I_q – ток по оси q ; Ψ_f – потокосцепление ротора; ω_e – угловая скорость магнитного поля статора.

При этом ток I_q ограничивается во второй зоне в соответствии с формулой

$$|I_q| = \sqrt{i_n^2 - i_q^2}, \quad (4)$$

где I_n – номинальное значение тока.

Передаточная функция $W_i = I/U$ для СДПМ определяется по формуле

$$W_i = W_{pt} k W_{di} W_{oy}, \quad (5)$$

где W_{pt} – передаточная функция регулятора тока; k – коэффициент преобразователя; W_{di} – передаточная функция дополнительной индуктивности; W_{oy} – передаточная функция объекта управления.

Математическая модель системы управления СДПМ в координатах dq представлена на рис. 3 (Carpaneto et al., 2010; Kolano, 2023).

Блок расчета тока в первой зоне задает стандартное значение тока $I_d = 0$, что необходимо для формирования максимального момента при работе СДПМ в первой зоне (Давыдов и др., 2024). По математическому описанию была составлена блок-схема системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в координатах dq (рис. 3) (Фираго, 2011; Коваль и др., 2019; Грубый, 2020; Zhang et al., 2022; Chau et al., 2008; Lee et al., 2018).

На основе математического описания системы построены диаграммы работы СДПМ в первой и второй зонах (рис. 4–8).

Векторная диаграмма (рис. 4) иллюстрирует работу СДПМ в номинальном режиме с номинальной угловой частотой вращения, при котором поперечная составляющая тока ротора I_q равна номинальному току I_{sn} . В этом режиме модуль вектора ЭДС E_s , наведенной вращающимся полем статора в обмотке ротора, достигает своего предельного значения E_{sn} . Вектор E_s ограничен окружностью радиуса $r = E_{sn}$, что соответствует максимально допустимому напряжению на статоре.

На векторной диаграмме (рис. 4) также изображены следующие векторные величины и проекции: E_q – проекция вектора ЭДС E_s на ось q вращающейся системы координат; $L_q I_q \omega$ – проектируемый на ось q вектор ЭДС реакции якоря, создаваемой током I_q .

Векторная диаграмма (рис. 5) демонстрирует режим работы, при котором угловая скорость ω больше номинальной ω_n и вращающий момент M меньше максимального M_{\max} . В этом режиме вектор ЭДС E_s ,

наведенной в обмотке ротора, сохраняет неизменное значение. Однако вектор результирующей ЭДС E_g увеличивается и превышает номинальное значение E_{SH} .

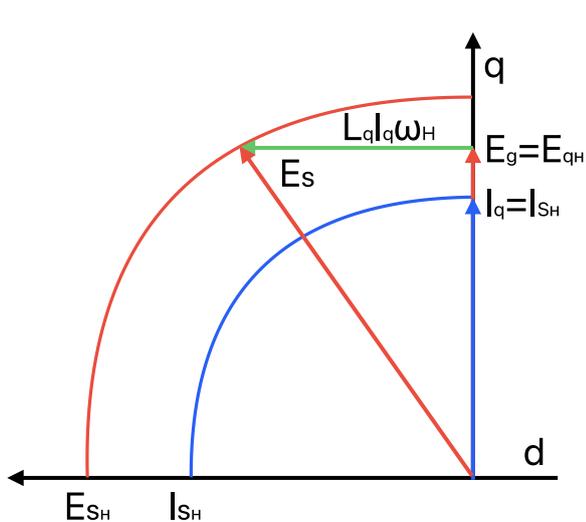


Рис. 4. Диаграмма в первой зоне
Fig. 4. Diagram in the first zone

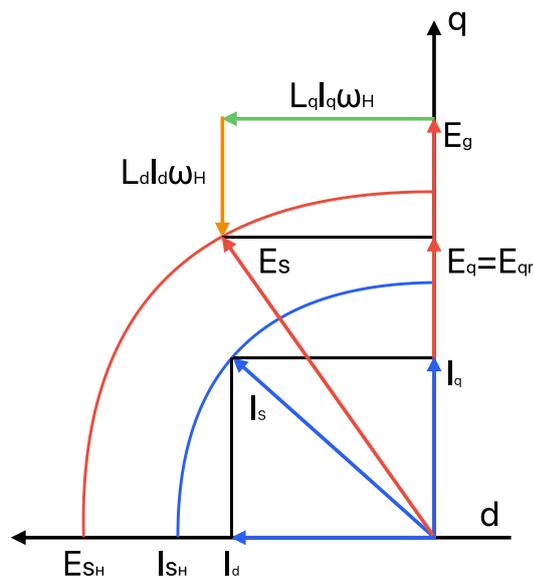


Рис. 5. Диаграмма во второй зоне
Fig. 5. Diagram in the second zone

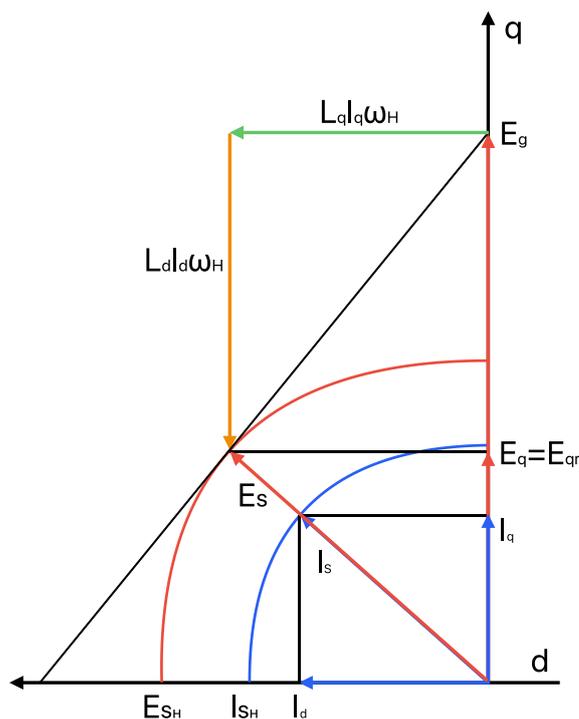


Рис. 6. Диаграмма при расширении диапазона во второй зоне
Fig. 6. Diagram with range expansion in the second zone

В данном режиме в дополнение к поперечному току I_q вводится продольный ток I_d по оси d . При этом поперечный ток I_q уменьшается так, что вектор $L_q I_q \omega$ остается постоянным и равным $L_q I_{SH} \omega_H$. Введение тока I_d приводит к появлению дополнительной ЭДС реакции якоря $L_d I_d \omega$ по оси d , которая компенсирует увеличение результирующей ЭДС E_g , сохраняя неизменной проекцию E_q .

На диаграмме (рис. 5) также показаны следующие векторные величины: E_{qr} – номинальная ЭДС по оси q ; E_d – ЭДС по оси d ; I_s – модуль полного вектора тока статора.

Векторная диаграмма, отражающая режим работы с угловой скоростью $\omega > \omega_n$ и вращающим моментом $M < M_{max}$, представлена на рис. 6. При данном режиме векторы ЭДС $L_q I_q \omega$ и $L_d I_d \omega$ увеличиваются за счет изменения составляющих L_q и L_d , что позволяет управлять коэффициентом сдвига фаз $\cos \varphi$ между векторами тока и напряжения, доводя его до единицы. Вследствие чего можно увеличить значение результирующей ЭДС E_g до 2 раз в соответствии с уравнением (4).

Предложенный алгоритм способствует при ограниченной ЭДС вращения достижению более высоких скоростей вращения ротора за счет создания дополнительного магнитного поля, направленного против постоянных магнитов. В результате ослабления результирующего поля расширяется диапазон регулирования скорости до 33 % с сохранением постоянства мощности.

При ограничении номинального тока изменение векторов $L_q I_q \omega$ и $L_d I_d \omega$ не может происходить за счет изменения тока, поэтому предлагается добавить дополнительные индуктивности в цепь питания СДПМ. При их включении снижается потребляемый ток, необходимый для поддержания скорости, которую двигатель уже развил. В результате чего появляются дополнительный диапазон для увеличения тока до номинального значения СДПМ и возможность увеличить скорость вращения более чем в 2 раза.

Представленная математическая модель предназначена для оценки возможностей управления двигателем, задействованным в приводе главного движения металлорежущего станка, в режиме ослабления поля с расширением диапазона. Анализ работы в данном режиме критически важен, так как регулирование потокосцепления двигателя влияет на коэффициент мощности $\cos \varphi$. При неизменной полной мощности двигателя этот режим позволяет увеличить скорость вращения ротора еще в несколько раз (по сравнению с классической второй зоной) за счет уменьшения критического момента. Таким образом, данная система управления способствует повышению производительности и точности обработки материалов с помощью металлорежущего станка (Фираго, 2011; Коваль и др., 2019; Yu et al., 2020; Carpaneto et al., 2010; Kolano, 2023; Zhang et al., 2022; Chau et al., 2008; Lee et al., 2018; Xu et al., 1992; Joshi et al., 2022).

Результаты и обсуждение

Данная математическая модель применена для расчета увеличения частоты вращения ротора до максимальных 33 % и до 2 раз с использованием дополнительных индуктивностей.

На рис. 7–9 представлены графики моделирования: график скорости (рис. 7), график нагрузки двигателя до номинального значения (рис. 8), график тока в координатах ABC (рис. 9). Графики моделирования подтверждают верификацию измененной модели СДПМ с обновленной структурой управления, включающей модифицированные регуляторы. Данные изменения отличают систему управления от модели, представленной ранее (Давыдов и др., 2024), улучшая ее характеристики устойчивости и точности на высоких скоростях.

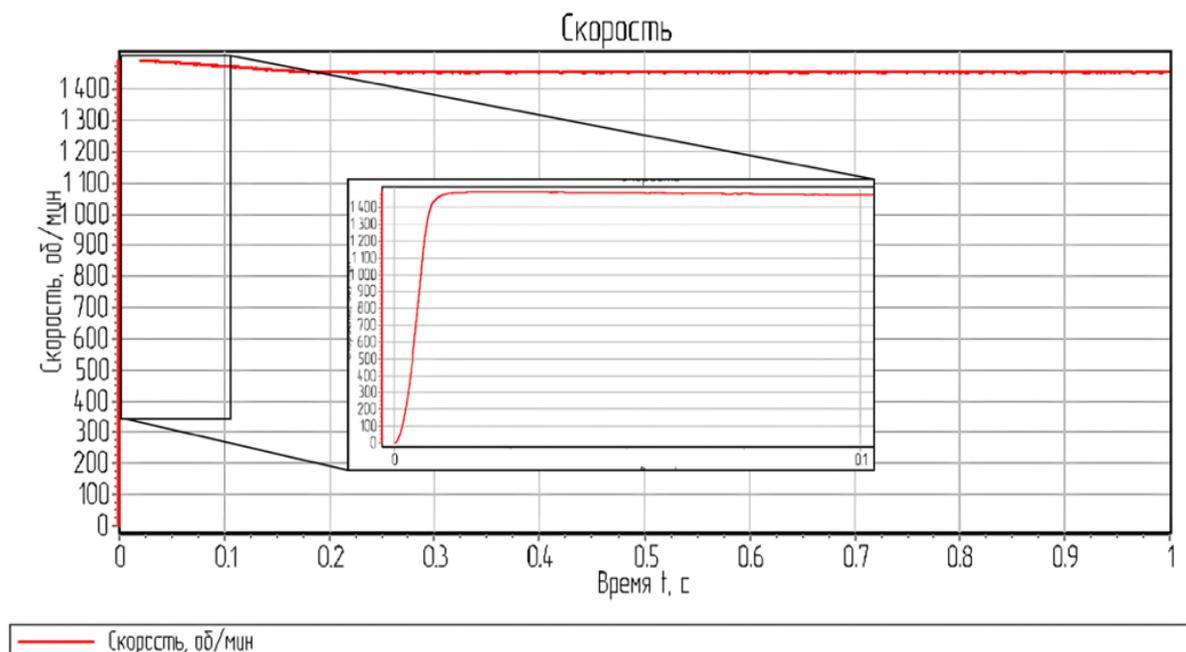


Рис. 7. График скорости СДПМ в номинальном режиме
Fig. 7. PMSM speed graph in the nominal mode

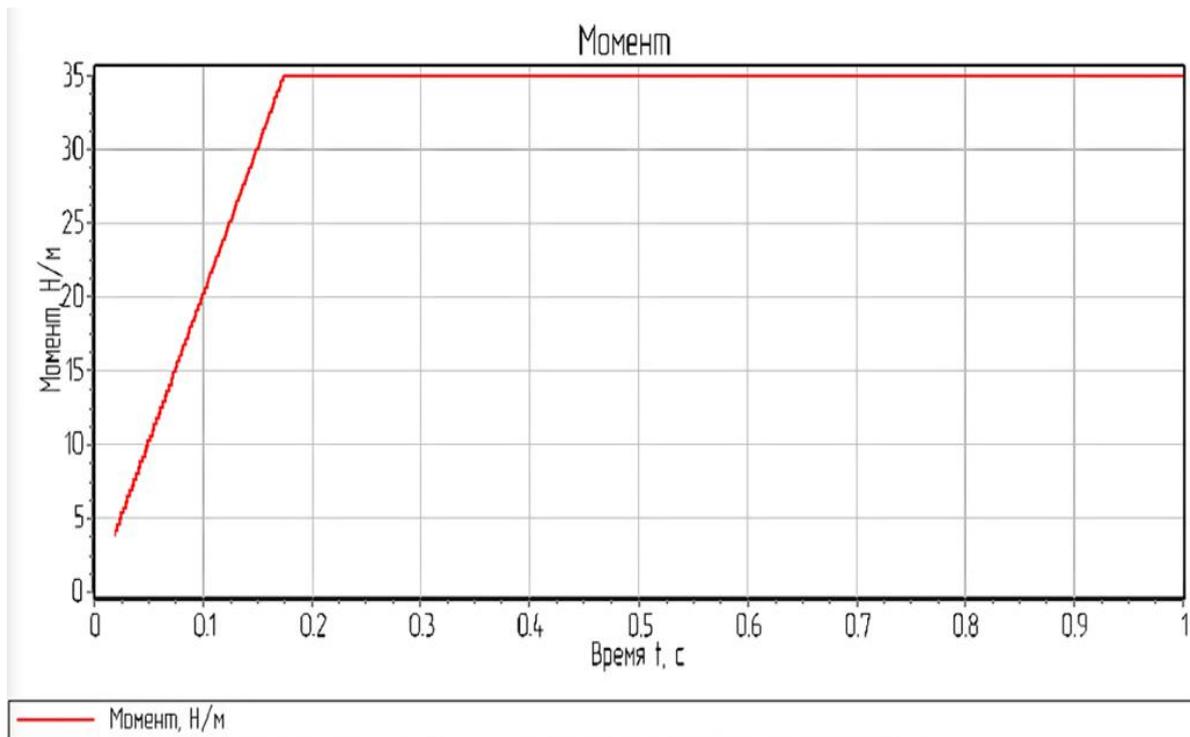


Рис. 8. График нагрузки СДПМ до номинального значения
Fig. 8. Graph of PMSM load to the rated value

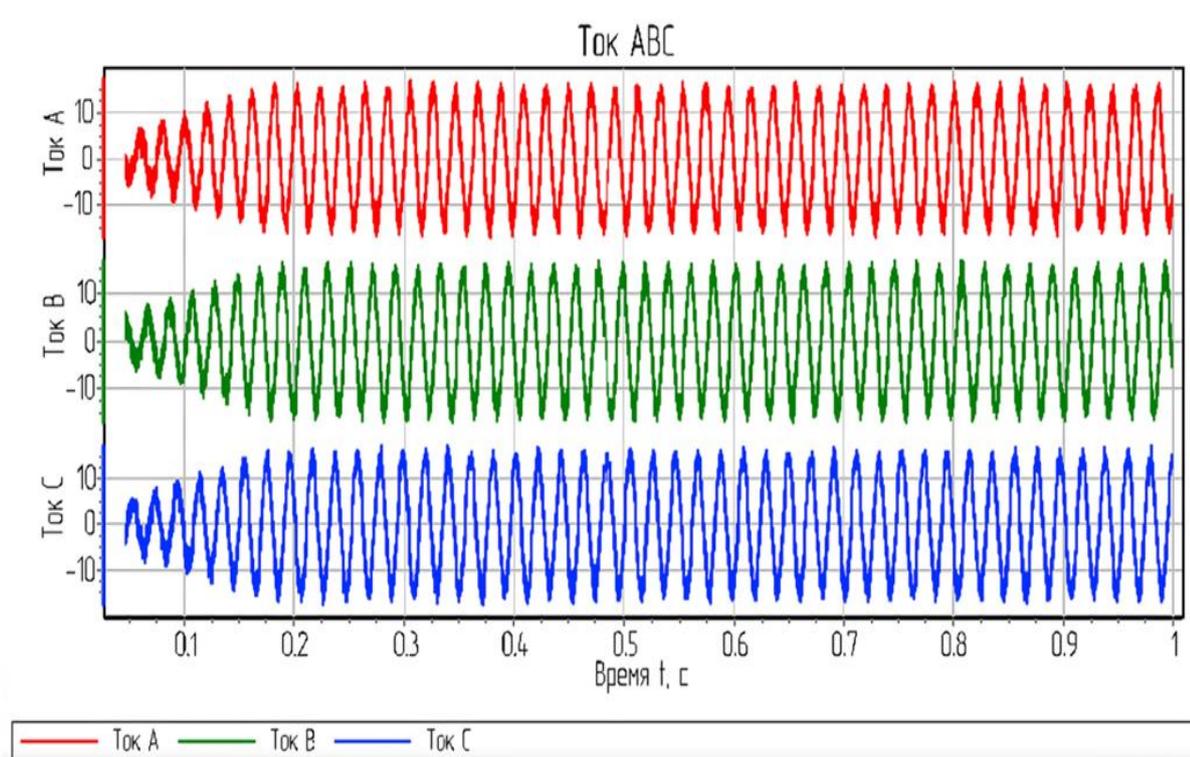


Рис. 9. График тока ABC
Fig. 9. ABC current graph

Из графиков видно, что модель соответствует номинальным значениям: двигатель держит номинальную нагрузку (35 Нм) при номинальном амплитудном токе (15 А).

На рис. 10–14 представлены графики моделирования второй зоны регулирования: график скорости (рис. 10); график нагрузки двигателя для определения максимального значения момента во второй зоне регулирования (рис. 11); графики тока в координатах ABC (рис. 12, 13); график тока в координатах dq (рис. 14).

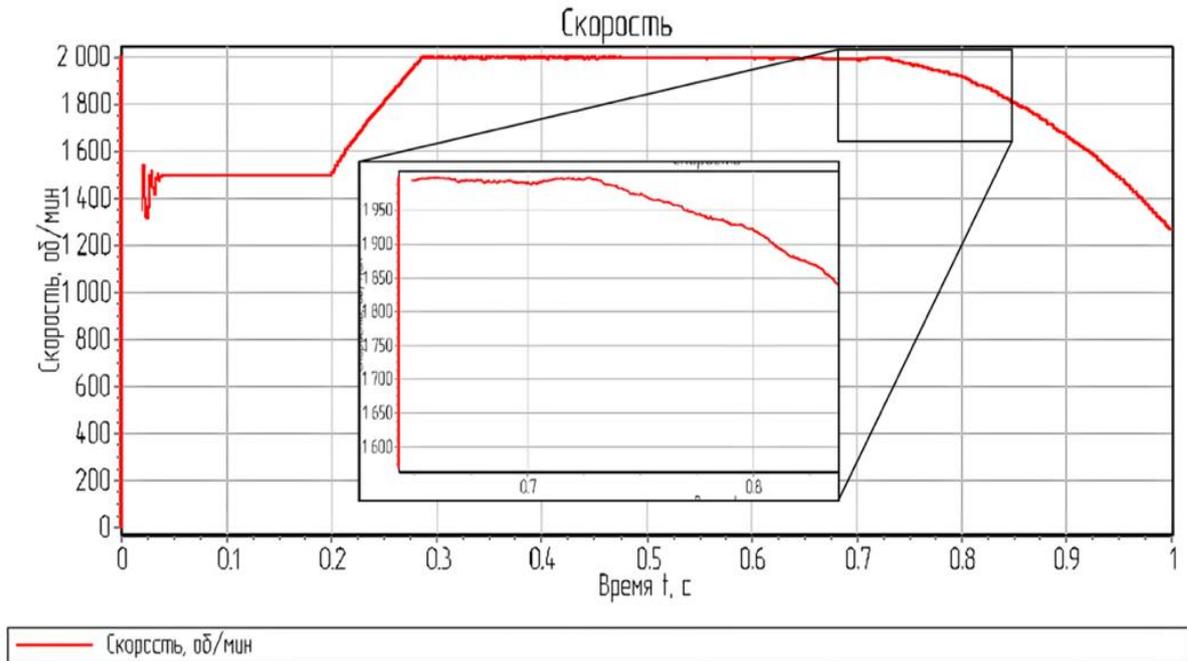


Рис. 10. График скорости СДПМ во второй зоне
Fig. 10. PMSM speed graph in the second zone

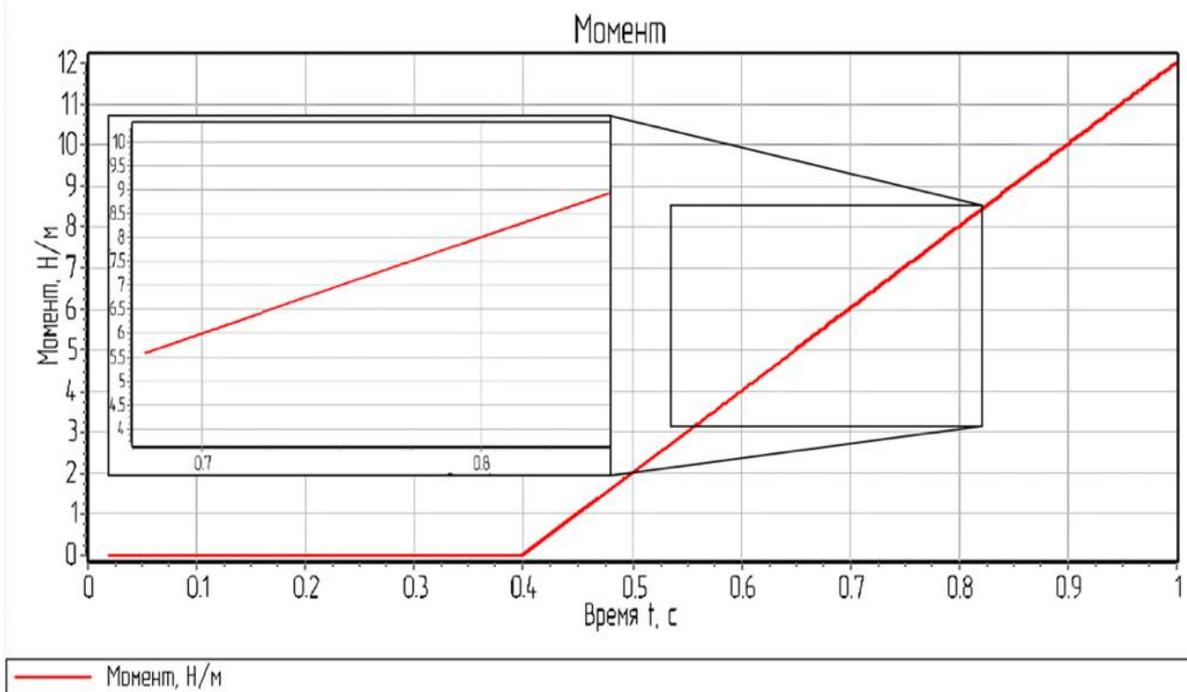


Рис. 11. График нагрузки СДПМ во второй зоне
Fig. 11. Graph of PMSM load in the second zone

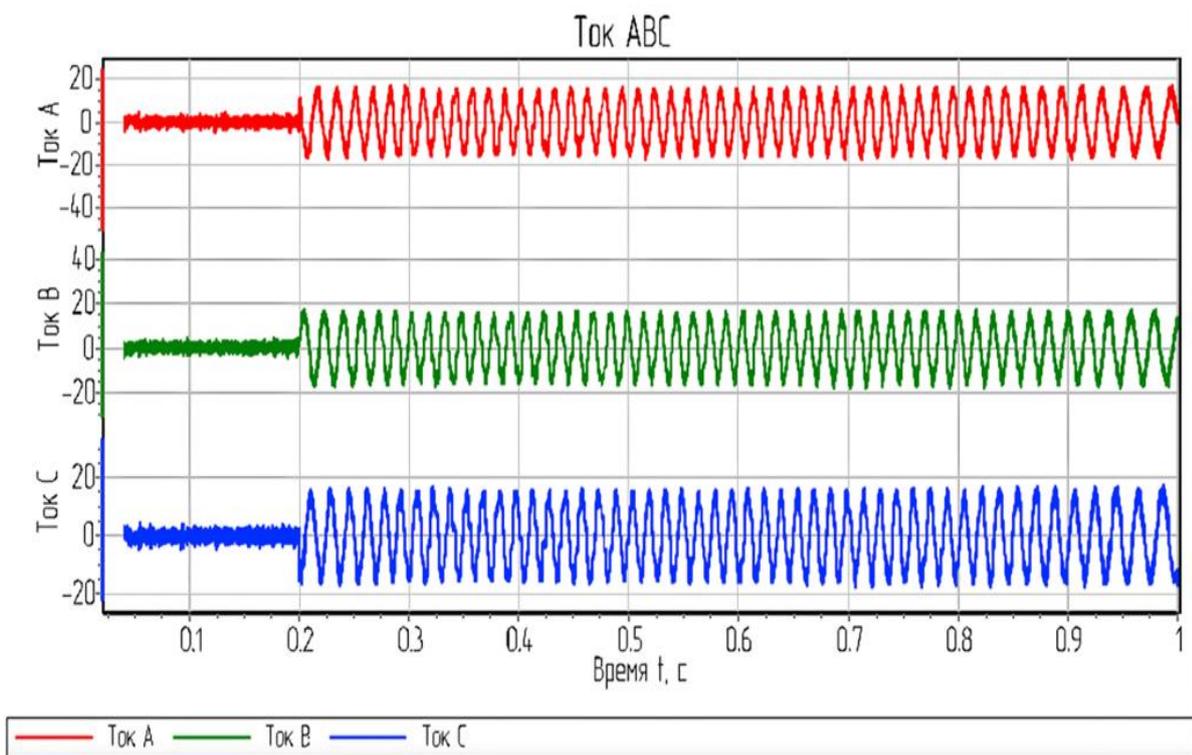


Рис. 12. График тока ABC во второй зоне
Fig. 12. ABC current graph in the second zone

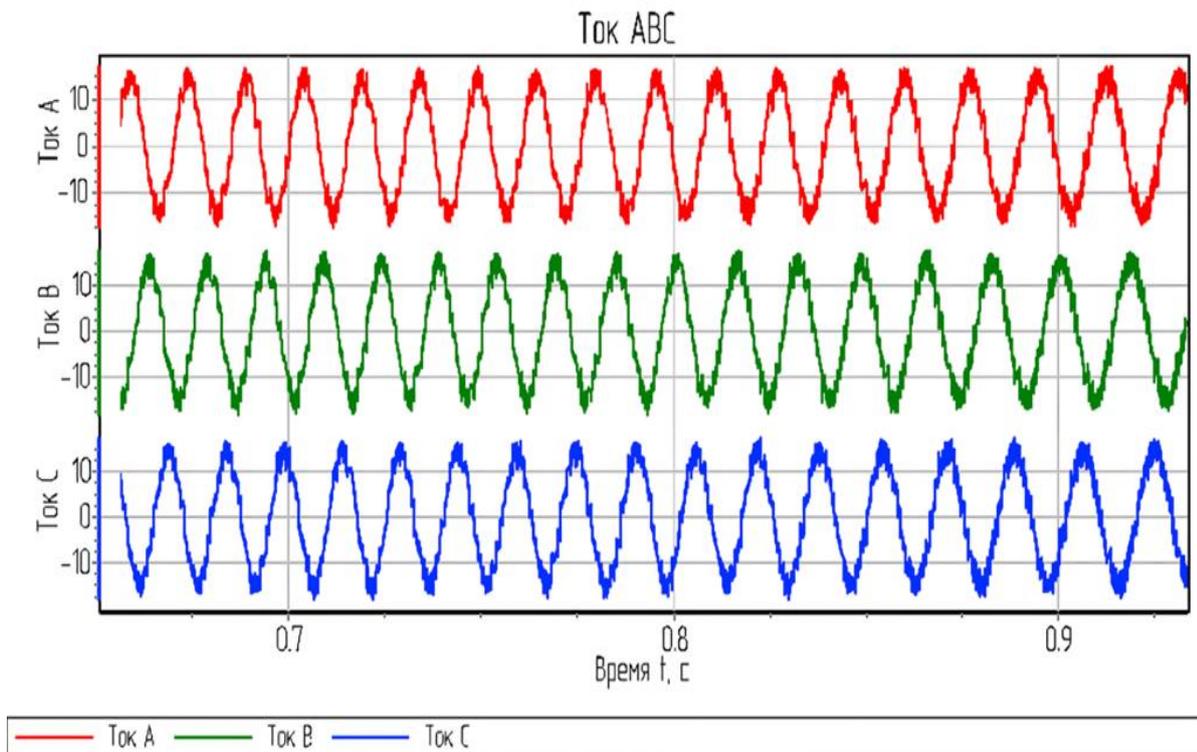


Рис. 13. График тока ABC во второй зоне (зоне перегрузки двигателя)
Fig. 13. ABC current graph in the second zone (the engine overload zone)

Из графиков видно, что СДПМ переходит во вторую зону регулирования, где ток I_q поддерживается на нулевом уровне, а ток I_d задается на максимально возможное значение, равное амплитудному значению тока. Двигатель в данном режиме способен разогнаться до 2 000 об/мин, что приблизительно равняется 133 % от номинального значения, а также удерживать значение момента, приблизительно равное 6,5 Нм, не превышая номинальное значение тока.

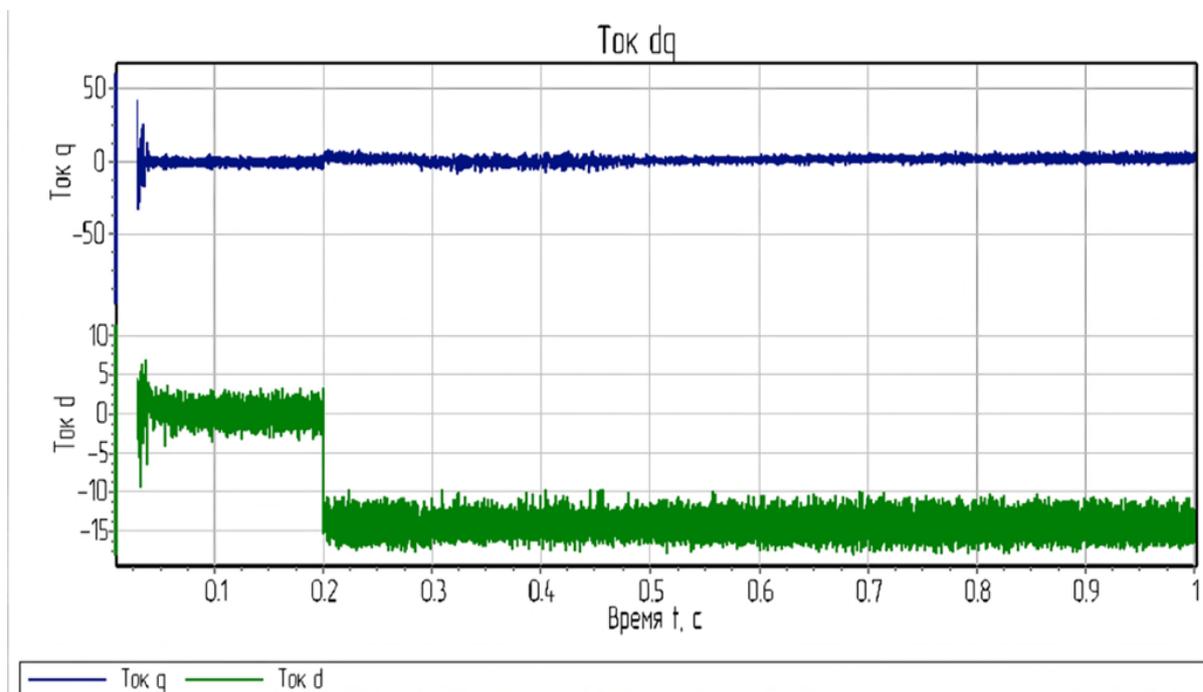


Рис. 14. График тока dq во второй зоне
Fig. 14. dq current graph in the second zone

На рис. 15–19 представлены графики моделирования процесса регулирования СДПМ во второй зоне с использованием дополнительных индуктивностей: график скорости (рис. 15); график нагрузки двигателя для определения максимального значения момента во второй зоне регулирования (рис. 16); графики тока в координатах ABC (рис. 17, 18); график тока в координатах dq (рис. 19).

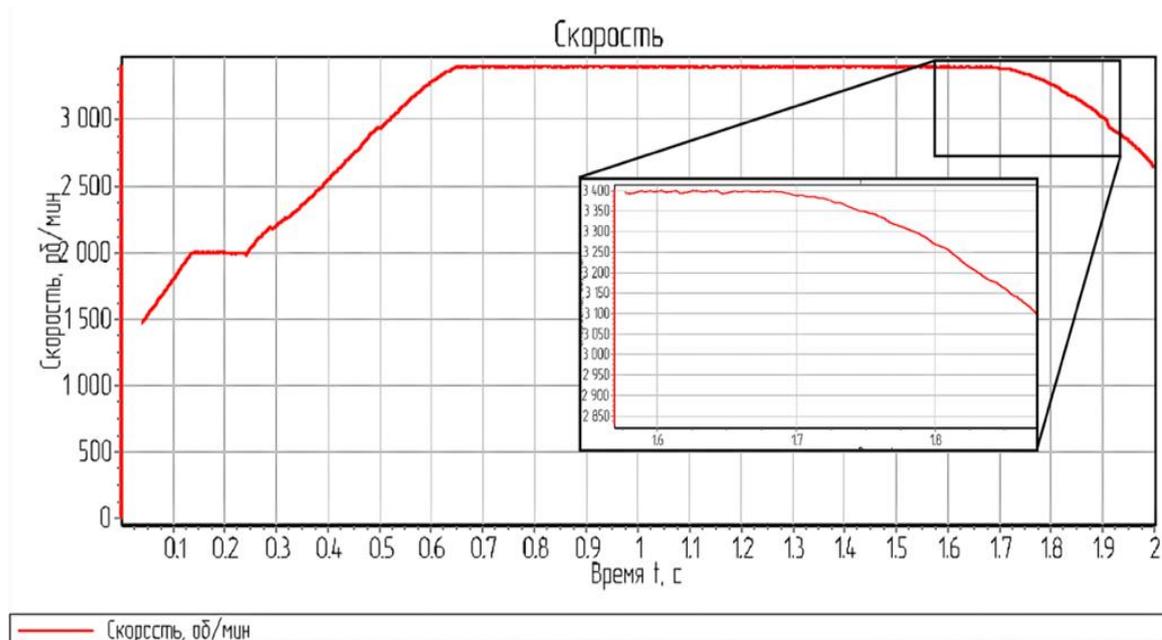


Рис. 15. График скорости СДПМ с расширением диапазона во второй зоне
Fig. 15. PMSM speed graph with range expansion in the second zone

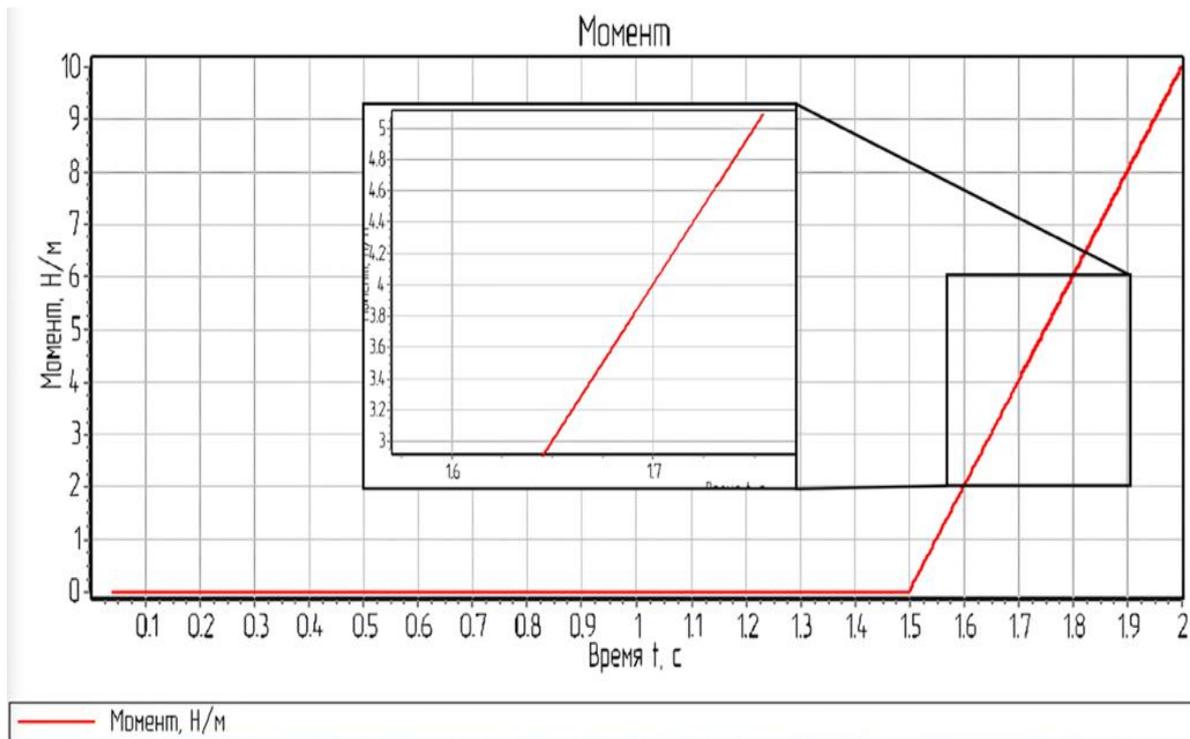


Рис. 16. График нагрузки СДПМ с расширением диапазона во второй зоне
Fig. 16. Graph of PMSM load with range expansion in the second zone

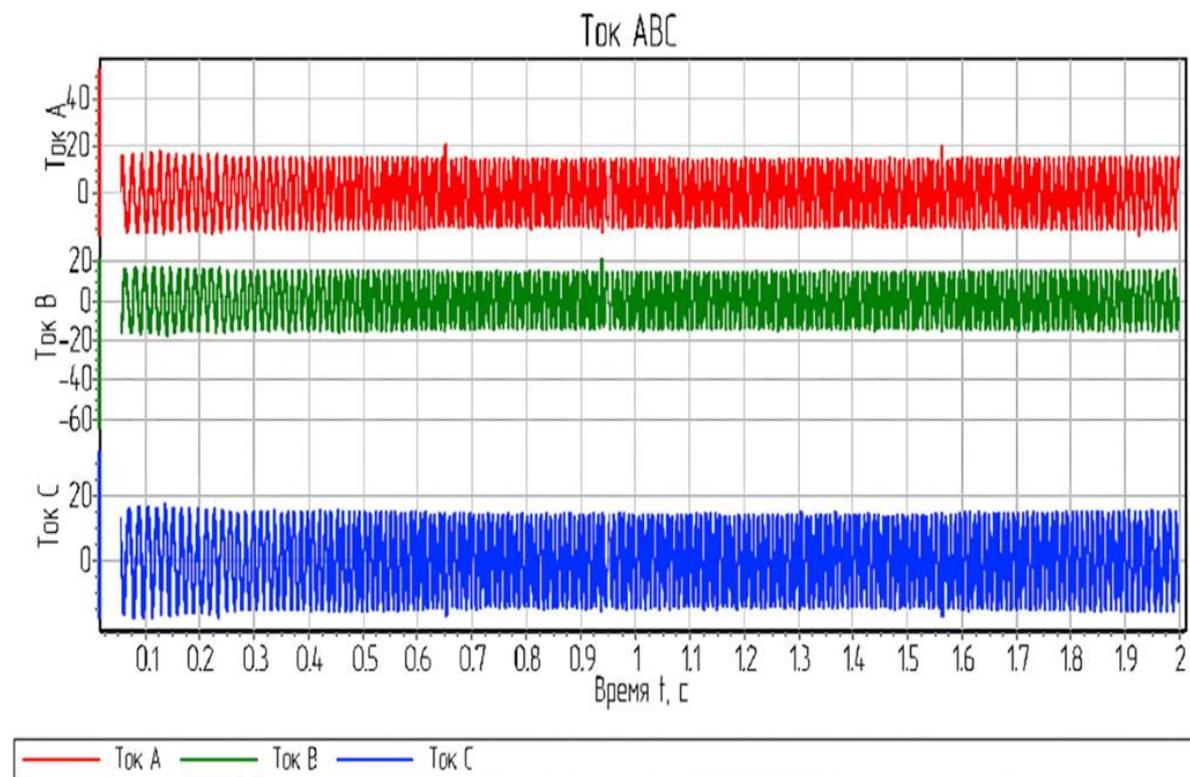


Рис. 17. График тока ABC с расширением диапазона во второй зоне
Fig. 17. ABC current graph with range expansion in the second zone

Графики моделирования показывают, что расширение диапазона регулирования во второй зоне СДПМ возможно. СДПМ развивает скорость до 3 400 об/мин, что приблизительно равняется 227 % от номинального значения. Двигатель в данном режиме удерживает значение момента, приблизительно равное 4 Нм, при этом не превышает номинальное значение тока.

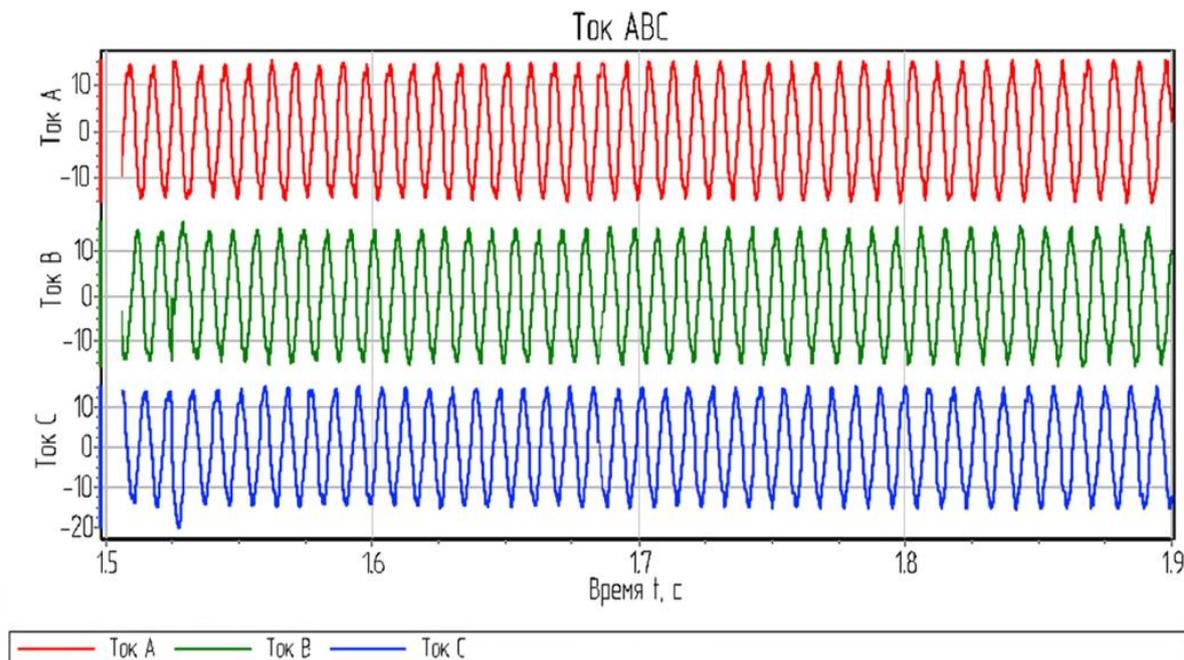


Рис. 18. График тока *ABC* с расширением диапазона во второй зоне (зоне перегрузки двигателя)
Fig. 18. *ABC* current graph with range expansion in the second zone (the engine overload zone)

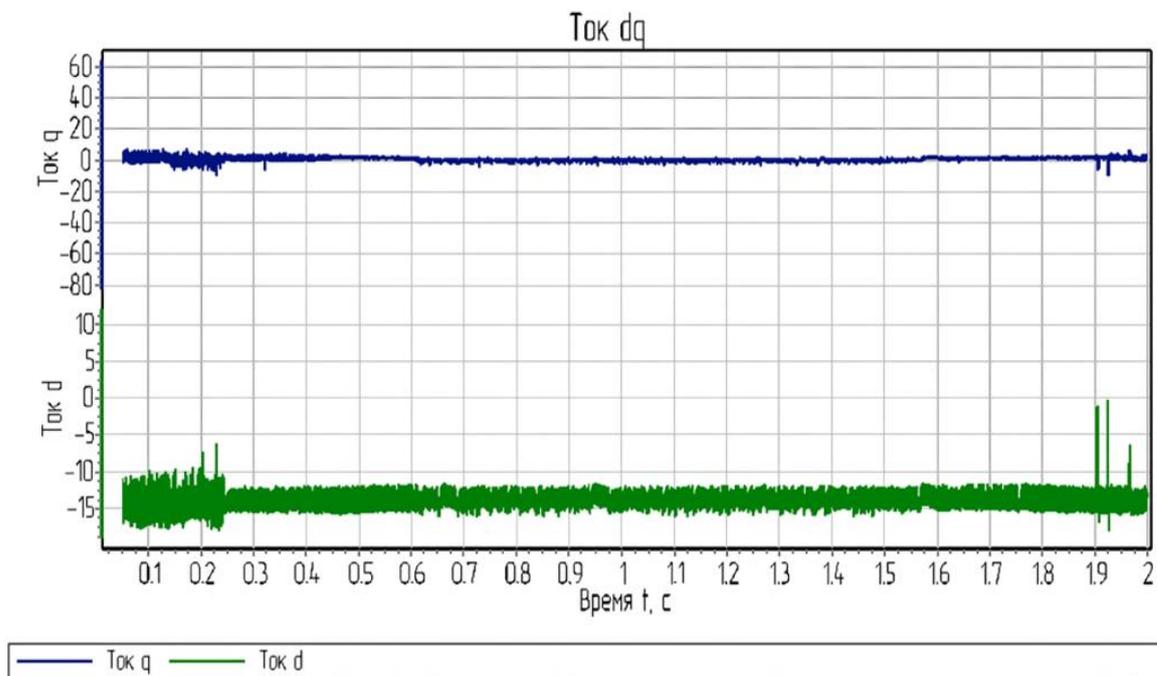


Рис. 19. График тока *dq* с расширением диапазона во второй зоне
Fig. 19. *dq* current graph with range expansion in the second zone

Разработанный подход к управлению синхронными двигателями с постоянными магнитами показал свою эффективность, обеспечивая двукратное увеличение скорости привода главного движения металлорежущего станка без ухудшения энергетических характеристик. Внедрение дополнительных индуктивностей позволило расширить диапазон регулирования скоростей, улучшив точность и качество обработки, особенно при работе с мягкими металлами. Эти результаты подтверждены в ходе моделирования

и имеют значительную практическую ценность для повышения производительности станков и качества обработки деталей на промышленных предприятиях.

Заключение

Система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами играет важную роль в работе электропривода главного движения металлорежущего станка. Созданная математическая модель позволила провести симуляцию работы двигателя как на номинальных, так и на повышенных оборотах, а также изучить возможность расширения диапазона скоростей с использованием дополнительных обмоток. Результаты показали, что система управления при работе в зоне ослабления поля обеспечивает поддержание энергопотребления в пределах номинальных значений. Таким образом, предложенная система векторного управления способствует эффективному регулированию электропривода главного движения, обеспечивая надежную и безопасную эксплуатацию станка.

Металлорежущие станки, оснащенные данной системой, демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики, включая высокую точность и качество обработки деталей, особенно при работе с мягкими металлами. Это способствует повышению производительности и точности механической обработки материалов.

Интеграция предложенного метода также позволяет настраивать параметры работы станков в соответствии с конкретными задачами, делая производство более гибким и экономически выгодным. Повышение точности управления и уменьшение колебаний мощности обеспечивают высокое качество обработки сложных деталей, что особенно важно для высокоточных производств.

Применение разработанного метода не ограничивается фрезерными станками. Алгоритм управления может быть адаптирован для других типов металлообрабатывающих станков (токарных и шлифовальных), где требуется расширение диапазона скоростей при сохранении точности и стабильности работы.

Предложенный подход может быть использован в приводах с числовым программным управлением (ЧПУ), а также в робототехнических системах, где необходимо точное и динамическое регулирование скоростных характеристик и момента, что делает предложенную систему универсальной и открывает возможности для ее внедрения в другие промышленные системы.

Научная и практическая значимость исследования заключается в его применении в различных промышленных сферах. Внедрение предложенных улучшений в управление электроприводами на базе СДПМ может стать основой для будущих разработок, направленных на повышение эффективности и точности работы металлообрабатывающего оборудования. Таким образом, результаты исследования являются важным вкладом в развитие технологий автоматизированного управления электроприводами и их адаптации к современным производственным требованиям.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Грубый С. В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // Известия вузов. Машиностроение. 2020. № 10(727). С. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG.
- Давыдов А. Е., Боченков Б. М., Панкрац Ю. В. Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28, № 1. С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU.
- Коваль А. С., Яшин В. С., Артеменко А. И. Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока // Вестник Белорусско-Российского университета. 2019. № 3(64). С. 121–128. DOI: https://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121. EDN: AGLUAI.
- Костыгов А. М., Солодкий Е. М., Даденков Д. А. Синтез регуляторов тока и скорости в системе векторного управления вентильным электроприводом // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. Ч. 7. С. 1490–1495. EDN: SZUHEF.
- Фираго Б. И. Работа трехфазных вентильных двигателей переменного тока при скорости выше основной // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2011. № 4(16). С. 12–16. EDN: QNRKFD.
- Щагин А. В., Нгуен Т. З., Чжо С. В. Сравнительный анализ электроприводов производственных станков // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 2. С. 193–204. EDN: BZZGAV.
- Carpaneto M., Marchesoni M., Vallini G. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter // SPEEDAM 2010, Pisa, Italy, 2010. P. 318–323. DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2010.5545088>.
- Chau K. T., Chan C. C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, Iss. 6. P. 2246–2257. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2008.918403>.

- Davydov A., Bochenkov B., Anosov V. Compact inverter for single-phase induction motor // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021. P. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1109/rusautocon52004.2021.9537331>. EDN: QIVVPC.
- Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I., Bayanov E. [et al.]. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles // Электротехнические комплексы и системы : материалы междунауч.-практ. конф. : в 2 т. Уфа : УУНТ, 2022. Т. 1. С. 235–243. URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-219.pdf.
- Joshi D., Deb D., Muyeen S. M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles // Frontiers in Energy Research. 2022. Article number: 10:752012. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
- Kolano K. New method of vector control in PMSM motors // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 43882–43890. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3272273>.
- Kotin D., Pankrats Y., Davydov A., Ivanov I. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2023. Vol. 10, Iss. 105. P. 1093–1102. DOI: <https://doi.org/10.19101/ijatee.2022.10100564>.
- Lee S. G., Bae J., Kim W.-H. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28, Iss. 3. Article number: 5200705. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2775561>.
- Li C., Kou B. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle // 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Beijing, China, 2012. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/eml.2012.6325049>.
- Xu X., Novotny D. W. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. 1992. Vol. 28, Iss. 6. P. 1353–1358. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.175288>.
- Yu Y., Cong L., Tian X., Mi Z. [et al.]. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2020. Vol. 4, N 3. P. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.30941/cestems.2020.00021>.
- Zhang Y., Qi R. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control // Energies. 2022. Vol. 15, Iss. 7. Article number: 2543. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15072543>.

References

- Grubiy, S. V. 2020. Calculation of cutting forces and moment when milling with end mills. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 10(727), pp. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG. (In Russ.)
- Davydov, A. E., Bochenkov, B. M., Pankrats, Yu. V. 2024. Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor. *iPolytech Journal*, 28(1), pp. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU. (In Russ.)
- Koval, A. S., Yashin, V. S., Artemenko, A. I. 2019. Model of an electric drive based on a PMSM with a surface arrangement of magnets on the rotor and flux control. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 3(64), pp. 121–128. DOI: https://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121. EDN: AGLUAL. (In Russ.)
- Kostygov, A. M., Solodkiy, E. M., Dadenkov, D. A. 2014. Synthesis of current and speed controllers in a vector control system for a valve electric drive. *Fundamentalnye Issledovaniya*, 11(7), pp. 1490–1495. EDN: SZUHEF. (In Russ.)
- Firago, B. I. 2011. Operation of three-phase AC motors at speeds higher than the main. *Electromechanical Energysaving System*, 4(16), pp. 12–16. EDN: QNRKFD. (In Russ.)
- Shchagin, A. V., Nguyen, T. D., Kyaw, S. V. 2022. Comparative analysis of electric drives of production machines. *Proceedings of Universities. Electronics*, 27(2), pp. 193–204. EDN: BZZGAV. (In Russ.)
- Carpaneto, M., Marchesoni, M., Vallini, G. 2010. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter. SPEEDAM 2010, Pisa, Italy, 2010, pp. 318–323. DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2010.5545088>.
- Chau, K. T., Chan, C. C., Liu, C. 2008. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), pp. 2246–2257. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2008.918403>.
- Davydov, A., Bochenkov, B., Anosov, V. 2021. Compact inverter for single-phase induction motor. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021, pp. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1109/rusautocon52004.2021.9537331>. EDN: QIVVPC.
- Davydov, A., Pankrats, Yu., Ivanov, I., Bayanov, E. et al. 2022. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles. Proceedings of the international scientific-practical conf. *Electrical engineering*

- complexes and systems*. In 2 Vol., Ufa, 2022. Vol. 1, pp. 235–243. URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-219.pdf.
- Joshi, D., Deb, D., Muyeen, S. M. 2022. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles. *Frontiers in Energy Research*. Article number: 10:752012. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
- Kolano, K. 2023. New method of vector control in PMSM motors. *IEEE Access*, 11, pp. 43882–43890. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3272273>.
- Kotin, D., Pankrats, Y., Davydov, A., Ivanov, I. 2023. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 10(105), pp. 1093–1102. DOI: <https://doi.org/10.19101/ijatee.2022.10100564>.
- Lee, S. G., Bae, J., Kim, W.-H. 2018. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3). Article number: 5200705. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2775561>.
- Li, C., Kou, B. 2012. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle. 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Beijing, China, 2012, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/eml.2012.6325049>.
- Xu, X., Novotny, D. W. 1992. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(6), pp. 1353–1358. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.175288>.
- Yu, Y., Cong, L., Tian, X., Mi, Z. et al. 2020. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 4(3), pp. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.30941/cestems.2020.00021>.
- Zhang, Y., Qi, R. 2022. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control. *Energies*, 15(7). Article number: 2543. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15072543>.

Сведения об авторах

Давыдов Артем Евгеньевич – пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073;
Новосибирский государственный технический университет, аспирант;
e-mail: nobody.one911@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Artem E. Davydov – 20 K. Marksa Ave., Novosibirsk, Russia, 630073;
Novosibirsk State Technical University, PhD Student;
e-mail: nobody.one911@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Боченков Борис Михайлович – пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073;
Новосибирский государственный технический университет, канд. техн. наук;
e-mail: bochenkov@ngs.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

Boris M. Bochenkov – 20 K. Marksa Ave., Novosibirsk, Russia, 630073;
Novosibirsk State Technical University, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: bochenkov@ngs.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

Панкрац Юрий Витальевич – пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073;
Новосибирский государственный технический университет, канд. техн. наук;
e-mail: pankrats79@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

Yuriy V. Pankrats – 20 K. Marksa Ave., Novosibirsk, Russia, 630073;
Novosibirsk State Technical University, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: pankrats79@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

УДК 621.31

Разработка математической модели зависимости удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от факторов, влияющих на ее надежность

И. В. Денисов

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия;
e-mail: denisoviv2@mail.ru*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.09.2024;

получена
после доработки
25.11.2024;

принята
к публикации
29.11.2024

Ключевые слова:

надежность изоляции
проводов,
удельное объемное
сопротивление,
контроль изоляции,
старение изоляции,
срок службы
изоляция

Для цитирования

Изоляция самонесущего изолированного провода (СИП-4) является объектом исследования, предмет исследования – математическая модель зависимости удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от факторов, влияющих на ее надежность. Полученная математическая модель позволит перейти к разработке методики прогнозной оценки остаточного ресурса материала изоляции исследуемого проводника. На первом этапе работы изучалось влияние действия внешних факторов на электрические параметры материала изоляции СИП-4. При формировании цели исследования, а именно получения математической модели зависимости удельного объемного сопротивления изоляции провода от влияния внешних факторов, учитывались трудные условия эксплуатации. Применение СИП-4 предусматривается снаружи зданий, т. е. он подвергается воздействиям солнечной радиации, ветровой нагрузке, атмосферным осадкам, температурным перепадам и т. д. В рамках данного исследования рассматривались следующие наиболее значимые факторы: электрический переменный ток, температура окружающей среды и период эксплуатации. Указанные факторы выбирались с учетом возможности проведения многофакторного эксперимента и в полной мере характеризуют такие свойства надежности изделия, как долговечность и безотказность работы. В ходе проведения многофакторного анализа задача состояла в выборе минимальных и максимальных значений каждого исследуемого фактора с последующим составлением матрицы планирования полного факторного эксперимента. Полученная математическая модель позволяет определить действующее значение удельного объемного электрического сопротивления материала изоляции СИП-4 в зависимости от его эксплуатации в заданных конкретных условиях и открывает возможность разработки второго этапа исследования, связанного с построением алгоритма методики прогнозной оценки остаточного ресурса материала изоляции исследуемого проводника.

Денисов И. В. Разработка математической модели зависимости удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от факторов, влияющих на ее надежность. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 501–510. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-501-510>.

Development of a mathematical model of dependence of specific volumetric electrical resistance of SIW-4 insulation on factors affecting its reliability

Ivan V. Denisov

*Vladimir State University named after Alexander Grigorievich
and Nikolai Grigorievich Stoletovs, Vladimir, Russia;
e-mail: denisoviv2@mail.ru*

Article info

Received
25.09.2024;

received
in revised form
25.11.2024;

accepted
29.11.2024

Key words:

wire insulation
reliability,
volume resistivity,
insulation control,
insulation ageing,
insulation service life

For citation

Abstract

Insulation of self-supporting insulated wire (SIW-4) is the object of the study, and the subject of the study is a mathematical model of the dependence of the specific volume electrical resistance of the SIW-4 insulation on the factors affecting its reliability. The resulting mathematical model will allow us to proceed to the development of a method for predictive assessment of the residual life of the insulation material of the conductor under study. At the first stage of the work, the influence of external factors on the electrical parameters of the SIW-4 insulation material has been studied. When forming the goal of the study, namely, obtaining a mathematical model of the dependence of the specific volume resistance of the wire insulation on the influence of external factors, difficult operating conditions have been taken into account. SIW-4 is intended for use outside buildings, i. e. it is exposed to solar radiation, wind load, precipitation, temperature changes, etc. Within the framework of this study, the following most significant factors have been considered: alternating electric current, ambient temperature and period of operation. These factors have been selected taking into account the possibility of conducting a multifactorial experiment and fully characterize such properties of product reliability as durability and failure-free operation. During the multifactorial analysis, the task was to select the minimum and maximum values of each factor under study, followed by the compilation of a planning matrix for a full factorial experiment. The resulting mathematical model allows us to determine the effective value of the specific volume electrical resistance of the SIW-4 insulation material depending on its operation under the given specific conditions. It also opens up the possibility of developing the second stage of the study, associated with the construction of an algorithm for the method of predictive assessment of the residual life of the insulation material of the conductor under study.

Denisov, I. V. 2024. Development of a mathematical model of dependence of specific volumetric electrical resistance of SIW-4 insulation on factors affecting its reliability. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 501–510. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-501-510>.

Введение

Как один из способов повышения безотказной работы оборудования, используемого при передаче электрической энергии и электрических проводников, следует рассматривать методики, имеющие возможность прогнозировать остаточный ресурс. Полученные результаты оценки остаточного ресурса позволят применить к соответствующему оборудованию или упреждающий ремонт или его замену, чтобы не допустить отказа функционирования. При написании научной работы автором статьи были рассмотрены модели старения изоляции Журкова, Крайна, модифицированная модель старения изоляции проводов, основанная на законе Аррениуса и обратной степенной модели, а также модель старения изоляции Г. С. Кучинского, которая учитывает два основных фактора – температуру и электрическое поле (Дубяго, 2021; Поляков, 2017). Однако большинство рассмотренных моделей не имеют возможности косвенного определения остаточного ресурса, используя для этого, к примеру, параметры работоспособности системы, такие как сила тока, напряжение, мощность, температура и т. д. Это затрудняет их использование в реальных эксплуатационных условиях. Использование предлагаемой автором методики прогнозной оценки остаточного ресурса материала изоляции СИП-4 позволит посредством разработанной математической модели осуществить мгновенную оценку значения удельного объемного электрического сопротивления изоляции и скорректировать ее безопасную эксплуатацию по времени.

В статье рассматривается один из этапов реализации предлагаемой методики, а именно результаты проведения полного факторного эксперимента, в процессе которого получена математическая зависимость удельного объемного электрического сопротивления от действия внешних факторов, таких как переменный электрический ток, температура окружающей среды и продолжительность эксплуатации.

Материалы и методы

Анализ математических моделей, дающих прогнозную оценку остаточного срока эксплуатации, позволил установить два наиболее значимых фактора – напряжение и напряженность электрического поля. Поскольку напряжение в сети составляет 230 В согласно ГОСТ 29322-2014¹, то варьировать им при проведении многофакторного эксперимента не имеет смысла. При потреблении электрической энергии потребители, как правило, могут увеличить мощность потребления, следовательно, электрический ток в сети увеличится прямо пропорционально. В результате анализа ГОСТа 31946-1012² и ТУ 16-705.500-2006³ получена следующая информация: допустимая токовая нагрузка СИП-4 2х16, рассчитанная при температуре окружающего воздуха (среды) 25 °С, скорости ветра 0,6 м/с и интенсивности солнечной радиации 1000 Вт/м², составляет не более 100 А. Значение силы тока короткого замыкания при условии действия его в течение 1 с составляет не более 1,5 кА. В нашем многофакторном эксперименте мы не будем брать в расчет электрический ток короткого замыкания, так как это уже относится к разрушающим методам контроля, а воспользуемся таблицей 9, находящейся в ТУ 16-705.500-2006 (табл. 1).

Согласно табл. 1 максимальная температура, для которой представлен поправочный коэффициент, составляет 50 °С.

Таблица 1. Поправочные коэффициенты расчета электрического тока в зависимости от температуры окружающей среды

Table 1. Correction factors for calculating electric current depending on the ambient temperature

Температура токопроводящей жилы, °С	Поправочные коэффициенты при температуре окружающей среды, °С											
	–5 и ниже	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
90	1,21	1,18	1,14	1Д1	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78

В принципе, согласно пункту 6.1 ТУ 16-705.500-2006 СИП-4 допускается эксплуатировать при температуре окружающей среды от минус 60 °С до плюс 50 °С, этим объясняется отсутствие поправочных коэффициентов выше указанной температуры. Однако в пункте 1.6.4 ТУ 16-705.500-2006 написано, что изолированные провода должны быть стойкими к комплексу атмосферных факторов при их циклическом воздействии и допускаемая температура воздействия составляет 70 °С. Проведенный анализ характеристик материала изоляции провода из сшитого полиэтилена установил, что температура 90 °С является нормальной рабочей температурой данного материала, а температура в 130 °С допустима в режиме перегрузки, не превышающем 8 ч. При этом максимальная температура нагрева материала изоляции из сшитого полиэтилена в режиме короткого замыкания, не превышающем 5 с, может достигать 250 °С. На основании

¹ ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58416/?ysclid=m49t604tpo918050043>.

² ГОСТ 31946-1012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53778/?ysclid=m49t8oun85203078866>.

³ ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/48405/?ysclid=m49tb13si2576025285>.

изложенного можно предположить, что при температуре токоведущей жилы 90 °С изоляция СИП может разогреваться также до 90 °С ввиду действия внешних факторов, таких, например, как солнечная радиация. Солнечные лучи могут разогревать материал изоляции СИП до температуры 75–80 °С. Безусловно, такой перегрев материала изоляции будет способствовать ускоренному его старению.

На рис. 1 представлены экспериментальные и теоретические зависимости поправочного коэффициента от температуры нагрева изоляции СИП.

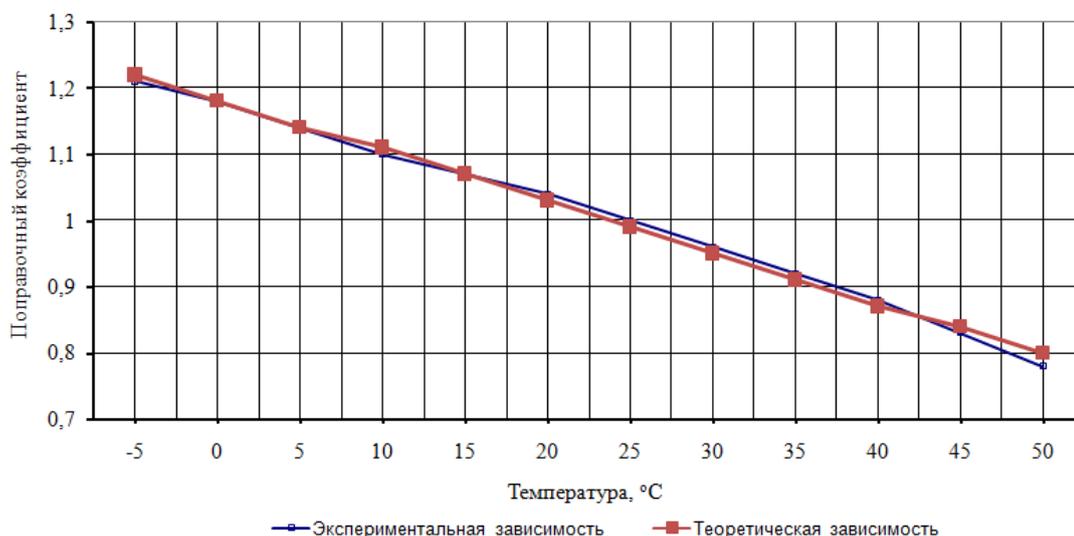


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости поправочного коэффициента от температуры нагрева изоляции СИП

Fig. 1. Experimental and theoretical dependences of the correction factor on the heating temperature of the SIW insulation

Используя метод наименьших квадратов, получена формула теоретической зависимости вида $y = kx + b$:

$$y = -0,00767T + 1,1817. \quad (1)$$

Используя полученную формулу зависимости поправочного коэффициента от температуры окружающей среды, можно определить допустимую токовую нагрузку. Так, для температуры окружающей среды 90 °С допустимая токовая нагрузка составляет 49,1 А, а для температуры 130 °С уже 18,4 А, что составляет эквивалент активной мощности 4,23 кВт.

Таким образом, минимально допустимая токовая нагрузка будет нами принята равной 4,0 А (нижний уровень), что соответствует 1 кВт активной мощности, а максимальная токовая нагрузка – 16,59 А (верхний уровень), что соответствует активной мощности в 4 кВт.

В пункте 6.1 ТУ 16-705.500-2006 дана информация о диапазоне температур эксплуатации СИП, она составляет диапазон от минус 60 °С до плюс 50 °С. Однако ввиду сложности проведения многофакторного анализа при отрицательных температурах условимся считать нижним уровнем температуру, равную 20 °С. Проведенный анализ верхней и нижней токовой нагрузки позволяет нам принять за верхний уровень температуру, равную 130 °С. Это максимально близко воспроизведет наиболее тяжелые условия эксплуатации, характерные для жаркого летнего периода. Именно в данный период времени происходят наиболее активные термохимические реакции разрушения молекул полиэтилена, составляющие материал изоляции СИП-4.

В исследовании использовалось 30 м СИП-4, приобретенные в магазине, также несколько десятков метров бывшего в употреблении СИП-4 было предоставлено сотрудниками АО "ОРЭС – Владимирская область". Дата производства наиболее "свежего" СИП-4 – март 2024 г., "старого" – июль 2009 г. Таким образом, нижний уровень периода эксплуатации составляет 0,16 года. Верхний уровень периода эксплуатации СИП-4 равен 14,4 года. Данный фактор позволит учесть влияние накопленной наработки, что эквивалентно приобретенным за этот период усталостным разрушениям материала изоляции от действия как совокупности атмосферных факторов, так и перенапряжения и напряженности электрического поля, которые способствовали разрушению молекул полиэтилена, а следовательно потере изоляцией диэлектрических свойств. В процессе отбора исследуемые образцы СИП-4 подвергались визуальному осмотру на предмет механического повреждения изоляции. У образцов, чей срок службы составлял 10 и более лет, на поверхности изоляции в местах закругления можно было наблюдать "паутину", что говорит об образовании мельчайших трещин, впоследствии переходящих в макротрещину (рис. 2).

Изоляция таких проводов характеризовалась повышенной жесткостью и твердостью, что говорило о снижении пластических свойств. Выполненные измерения твердости поверхности изоляционного материала

дюрOMETром (твёрдость по Шору, методом вдавливания) подтверждают этот факт. Образец СИП-4 производства 2024 г. имеет твёрдость поверхности изоляции 44,9 Н_Р, а образец 2012 г. 60,1 Н_Р. Установленная повышенная твёрдость изоляции в последующем приведет к появлению микротрещин при воздействии циклических знакопеременных нагрузок, в дальнейшем – к образованию макротрещин, а учитывая переход через ноль при попадании в них влаги, это будет способствовать ускоренному ее разрушению и, как следствие, снижению электрического сопротивления.

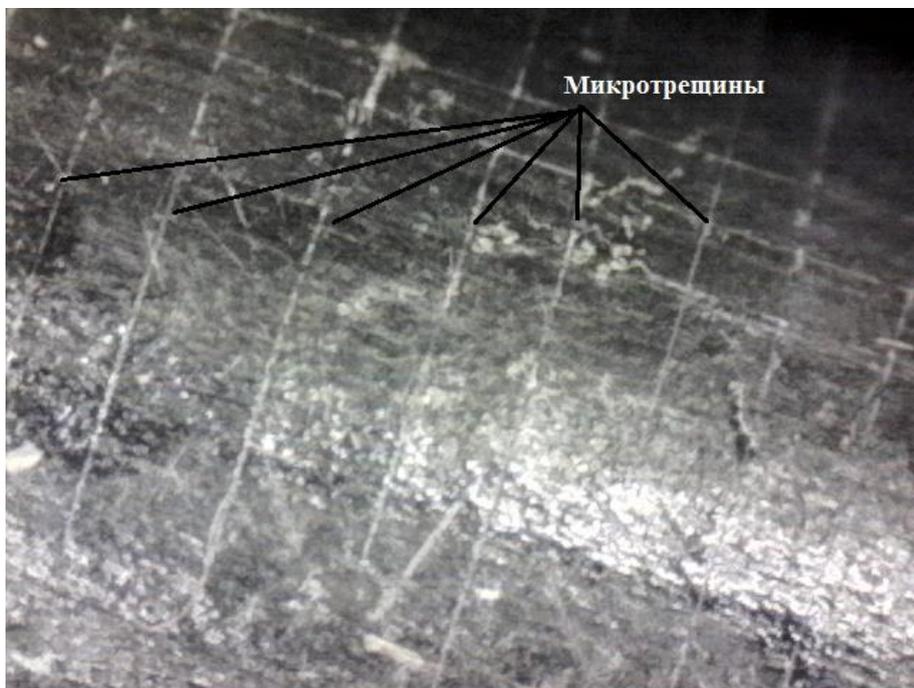


Рис. 2. Снимок поверхности материала изоляции исследуемого образца СИП-4 производства 2012 года под микроскопом

Fig. 2. The surface of the insulation material of the studied SIW-4 sample produced in 2012. The photo made by a microscope

Жесткость – это способность сопротивления деформации, а твердость – способность сопротивления проникновению, но поскольку СИП подвергается механическим знакопеременным нагрузкам, это приводит к ломкости материала изоляции. Это отчетливо видно на образцах, чей срок службы переходил рубеж в 10 лет. Кроме этого, образцы, имеющие следы прокола от прокалывающего ответственного зажима, также имели по результатам измерений меньшее значение сопротивления, что можно объяснить отсутствием у этих проводов водоблокирующего элемента. Алюминиевая жила у таких проводов имела следы коррозионного воздействия. Также в процессе визуального осмотра изоляции проводов попадались образцы, на поверхности изоляции которых находились следы химической коррозии. Удельное объемное сопротивление таких проводов было значительно меньше указанного значения по ГОСТ 31946-2012⁴.

Для проведения линейного полного факторного эксперимента в качестве объекта исследования был взят СИП-4 2×16 с изоляцией из светостабилизированного сшитого полиэтилена. Измерения удельного объемного электрического сопротивления выполнялись мегаомметром МEGEON 13125. Данный измерительный прибор позволяет выполнить замеры сопротивления изоляции проводов при испытательном напряжении от 100 до 2 500 В, при этом диапазон измеряемого сопротивления составляет от 100 кОм до 50 ГОм. Погрешность измерения сопротивления ±8 % (для диапазона 100 кОм – 10 ГОм) и ±10 % (для диапазона 10–50 ГОм). Для определения температуры материала изоляции подконтрольных образцов при проведении линейного полного факторного эксперимента будет применен бесконтактный инфракрасный термометр Venetech GM320, имеющий диапазон измерения температуры от минус 50 °С до плюс 400 °С. Точность измерения прибора составляет ± 1,5 °С в диапазоне 0 ~ +400 °С; ± 3,0 °С в диапазоне –50 ~ 0 °С; спектральный диапазон 5–14 мкм.

Для проведения полного факторного эксперимента были отобраны образцы в количестве 8 штук и каждый длиной 4 м. Образцы, которые будут подвержены температурному воздействию, предварительно свернуты в бухту диаметром 220 мм. Длина образца в 4 м взята из расчета измерения сопротивления

⁴ ГОСТ 31946-1012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53778/?ysclid=m49t8oun85203078866>.

изоляции провода непосредственным погружением в воду, концы образца должны отстоять от поверхности воды на расстоянии не менее 0,5 м. В воде производились замеры удельного объемного электрического сопротивления. Испытательное напряжение прикладывалось между токонесущей жилой и водой, непосредственно контактируемой с изоляцией, что позволяло увеличить площадь контактирования и учесть невидимые глазу повреждения изоляции. Методика измерения электрического сопротивления изложена в ГОСТ 31946-2012⁵ и ГОСТ 20.57.406⁶ (метод 201-1.2). Длительность воздействия температуры в 130 °С составляет 5 ч, после чего образец постепенно остывал (не менее часа) до установления температурного баланса с окружающей средой. Перед выполнением замера сопротивления каждый образец помещался в емкость с водой и находился в ней не менее 30 мин. В качестве нагрузочного сопротивления в целях безопасности проведения эксперимента были использованы тепловентиляторы с общей мощностью 2 кВт с возможностью ступенчатого регулирования. Мощность первой и второй ступени составляет 1 кВт, что в сумме дает нагрузку в 2 кВт. Последовательно в электрическую цепь был подсоединен амперметр.

Определим интервалы варьирования исследуемых факторов, а также найдем основной уровень каждого из них. Напомним, что основной уровень фактора подразумевает собой значение, под которым мы будем понимать исходное в плане проведения эксперимента. Следует отметить, что выбор значения основного уровня указанных факторов должен соответствовать получаемому значению функции отклика. Полученные значения интервалов варьирования указанных факторов, а также верхний, нижний и основной уровни приведены в табл. 2 (Задорожная, 2018).

Таблица 2. Верхний, основной и нижний уровни факторов
Table 2. Upper, main and lower levels of factors

**Показатели	I , А	T , °С	L , год
*Уровни факторов			
ВУ(max)	16,5	130	14,4
НУ(min)	4	20	0,16
ОУ = (ВУ – НУ)/2	10,25	75	7,28
ИВ = ВУ – ОУ	6,25	55	7,12

Примечание. * ВУ – верхний уровень фактора; НУ – нижний уровень фактора; ОУ – основной уровень фактора; ИВ – интервал варьирования; ** I – электрический переменный ток, А; T – температура окружающей среды, °С; L – период эксплуатации, год.

Составим матрицу планирования полного факторного эксперимента (табл. 3).

Таблица 3. Матрица планирования факторного эксперимента типа 2^3
Table 3. Matrix for planning the factorial experiment of type 2^3

Фактор	Порядок проведения опыта							
	3	5	1	7	6	4	2	8
X_0	1	1	1	1	1	1	1	1
X_1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
X_2	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
X_3	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
X_1X_2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
X_2X_3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
X_1X_3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
$X_1X_2X_3$	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
*Параметр оптимизации								
$Y_1 \cdot 10^{11}$	6,18	9,38	14,9	13,22	11,52	12,79	16,64	17,06
$Y_2 \cdot 10^{11}$	6,39	8,95	14,5	13,65	11,94	12,37	15,78	17,49
$Y_3 \cdot 10^{11}$	6,39	8,74	14,9	13,65	11,94	13,22	16,64	17,06
$Y \cdot 10^{11}$	6,32	9,03	14,7	13,51	11,80	12,79	16,35	17,20

Примечание. * Значения параметра оптимизации (функции отклика) представлены в виде удельного объемного электрического сопротивления (размерность Ом·см) из расчета $D = 7,7$ мм; $d = 4,6$ мм; $L = 350$ мм; R – текущее значение сопротивления подконтрольного участка провода, МОм.

⁵ ГОСТ 31946-1012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53778/?ysclid=m49t8oun85203078866>.

⁶ ГОСТ 20.57.406-81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1612/?ysclid=m49tfjybpu615749663>.

Определим дисперсию опыта по данным n параллельных опытов

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (Y_n - \bar{Y}_j)^2, \quad (2)$$

где n – число параллельных опытов, $n = 3$; Y_n – значение параметра оптимизации, полученное в результате опыта; \bar{Y}_j – среднее значение параметра оптимизации.

На основании проведенных расчетов получаем: $S_1^2 = 1,51 \cdot 10^{20}$; $S_2^2 = 1,06 \cdot 10^{21}$; $S_3^2 = 6,06 \cdot 10^{20}$; $S_4^2 = 6,06 \cdot 10^{20}$; $S_5^2 = 6,07 \cdot 10^{20}$; $S_6^2 = 1,82 \cdot 10^{21}$; $S_7^2 = 2,43 \cdot 10^{21}$; $S_8^2 = 6,07 \cdot 10^{20}$.

Определим ошибку опыта по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (Y_n - \bar{Y}_j)^2}. \quad (3)$$

Получаем: $S_1 = 12,31 \cdot 10^9$; $S_2 = 32,58 \cdot 10^9$; $S_3 = 24,63 \cdot 10^9$; $S_4 = 24,63 \cdot 10^9$; $S_5 = 24,63 \cdot 10^9$; $S_6 = 42,66 \cdot 10^9$; $S_7 = 49,26 \cdot 10^9$; $S_8 = 24,63 \cdot 10^9$.

Проверим однородность дисперсии по критерию Кохрена

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2 + S_7^2 + S_8^2}, \quad (4)$$

где S_{\max}^2 – максимальная дисперсия.

Используя таблицу значений критерия Кохрена для доверительной вероятности, равной 0,95, находим $G_T = 0,51$. Расчетное значение критерия Кохрена G_p , выполненное по формуле (4), равно 0,0192, т. е. $G_p < G_T$. Это означает, что дисперсии однородны и исследуемая величина y_n подчиняется нормальному закону распределения.

Следующим шагом будет определение дисперсии воспроизводимости

$$S_v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_j^2, \quad (5)$$

где N – число опытов в матрице планирования, $N = 8$.

Тогда $S_v^2 = 9,86 \cdot 10^{20}$.

На основании результатов проведенного эксперимента определим коэффициенты модели по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j. \quad (6)$$

Получим: $b_0 = 12,73 \cdot 10^{11}$.

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяются по формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j X_{ij}. \quad (7)$$

Получаем: $b_1 = -4,09 \cdot 10^{10}$; $b_2 = -2,73 \cdot 10^{11}$; $b_3 = -1,81 \cdot 10^{11}$; $b_{12} = -5,16 \cdot 10^{10}$; $b_{23} = -4,98 \cdot 10^{10}$; $b_{13} = 5,33 \cdot 10^9$; $b_{123} = -4,8 \cdot 10^{10}$.

Выполним проверку значимости коэффициентов путем сравнения абсолютной величины коэффициентов с доверительным интервалом. Дисперсию коэффициента определяем по выражению

$$S^2(b_i) = \frac{1}{nN} S_v^2. \quad (8)$$

Тогда $S^2(b_i) = 4,1 \cdot 10^{19}$.

Ошибка в определении i -го коэффициента регрессии составляет

$$S(b_i) = 6,4 \cdot 10^9.$$

Найдем доверительный интервал для коэффициентов регрессии по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_T S(b_i), \quad (9)$$

где t_T – табличное значение критерия Стьюдента, $t_{T(0,05;21)} = 2,12$.

Получим: $\Delta b_i = 1,35 \cdot 10^{10}$.

Сравниваем модуль каждого из коэффициентов регрессии с доверительным интервалом. При этом если модуль коэффициента регрессии больше доверительного интервала, то коэффициент регрессии является значимым и исключать его из уравнения нельзя:

$$|b_0| = 1,27 \cdot 10^{12} > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим};$$

$$|b_1| = 4,09 \cdot 10^{10} > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим};$$

$$|b_2| = 2,74 \cdot 10^{11} > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим};$$

$$\begin{aligned} |b_3| &= 1,81 \cdot 10^{11} > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ |b_{12}| &= 5,16 \cdot 10^{10} < 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ |b_{23}| &= 4,98 \cdot 10^{10} > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ |b_{13}| &= 5,33 \cdot 10^9 > 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент незначим;} \\ |b_{123}| &= 4,8 \cdot 10^{10} < 1,36 \cdot 10^{10} \Rightarrow \text{коэффициент значим.} \end{aligned}$$

Выполним проверку значимости коэффициентов с помощью t -критерия Стьюдента. Вычислим t_p -критерий по выражению

$$t_p = \frac{|b_i|}{S(b_i)}. \quad (10)$$

После этого сравним его с табличным t_T . Выполним расчет критерия Стьюдента по формуле (10)

$$\begin{aligned} t_{p0} &= 198,58 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p1} &= 6,37 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p2} &= 42,71 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p3} &= 28,28 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p12} &= 8,04 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p23} &= 7,76 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим;} \\ t_{p13} &= 0,83 < 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент незначим;} \\ t_{p123} &= 7,48 > 2,12 \Rightarrow \text{коэффициент значим.} \end{aligned}$$

Определим дисперсию адекватности по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}{N - (k + 1)}, \quad (11)$$

где k – число факторов.

Найдем Y_i по полученному уравнению

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (12)$$

Тогда

$$\begin{aligned} Y_1 &= 6,28 \cdot 10^{11}; Y_5 = 11,85 \cdot 10^{11}; \\ Y_2 &= 9,08 \cdot 10^{11}; Y_6 = 12,74 \cdot 10^{11}; \\ Y_3 &= 14,73 \cdot 10^{11}; Y_7 = 16,41 \cdot 10^{11}; \\ Y_4 &= 13,56 \cdot 10^{11}; Y_8 = 17,15 \cdot 10^{11}. \end{aligned}$$

Теперь рассчитаем дисперсию адекватности: $S_{ad}^2 = 1,7 \cdot 10^{20}$.

Произведем проверку гипотезы адекватности найденной модели по F -критерию Фишера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_v^2}. \quad (13)$$

Если $F_p < F_T$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считается адекватной. В противном случае гипотеза адекватности отвергается. Для определения табличного значения F_T критерия Фишера необходимо найти значение коэффициентов f_1 и f_2 . Значение f_1 равно числу факторов, в нашем случае $f_1 = 3$. Значение f_2 равно $N - k - 1$, т. е. $f_2 = 8 - 3 - 1 = 4$. В итоге табличное значение критерия Фишера $F_T = 6,6$, расчетное значение критерия Фишера $F_p = 0,173$, т. е. $F_p < F_T$ ($0,173 < 6,6$), следовательно, модель адекватна.

Результаты и обсуждение

Теперь получим окончательное уравнение удельного объемного сопротивления изоляции СИП

$$\begin{aligned} \rho &= 1,27 \cdot 10^{12} - 4,09 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{I - OY}{IB} \right) - 2,74 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{T - OY}{IB} \right) - 1,81 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{L - OY}{IB} \right) - \\ &- 5,16 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{I - OY}{IB} \right) \cdot \left(\frac{T - OY}{IB} \right) - 4,98 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{T - OY}{IB} \right) \cdot \left(\frac{L - OY}{IB} \right) - \\ &- 4,8 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{I - OY}{IB} \right) \cdot \left(\frac{T - OY}{IB} \right) \cdot \left(\frac{L - OY}{IB} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

В табл. 4 представлены результаты расчета удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП в зависимости от переменного электрического тока, температуры окружающей среды и продолжительности эксплуатации.

Таблица 4. Результаты расчета удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4
Table 4. Results of calculation of specific volumetric electrical resistance of SIW-4 insulation

Удельное объемное электрическое сопротивление изоляции, Ом·см	Фактор I, А	Удельное объемное электрическое сопротивление изоляции, Ом·см	Фактор T, °C	Удельное объемное электрическое сопротивление изоляции, Ом·см	Фактор L, год
$9,08 \cdot 10^{11}$	4	$14,73 \cdot 10^{11}$	20	$11,86 \cdot 10^{11}$	0,16
$8,63 \cdot 10^{11}$	6	$13,19 \cdot 10^{11}$	40	$10,96 \cdot 10^{11}$	2,46
$8,18 \cdot 10^{11}$	8	$11,66 \cdot 10^{11}$	60	$10,05 \cdot 10^{11}$	4,76
$7,73 \cdot 10^{11}$	10	$10,12 \cdot 10^{11}$	80	$9,15 \cdot 10^{11}$	7,06
$7,28 \cdot 10^{11}$	12	$8,58 \cdot 10^{11}$	100	$8,25 \cdot 10^{11}$	9,36
$6,83 \cdot 10^{11}$	14	$7,04 \cdot 10^{11}$	120	$7,35 \cdot 10^{11}$	11,66
$6,38 \cdot 10^{11}$	16	$5,50 \cdot 10^{11}$	140	$6,44 \cdot 10^{11}$	13,96

На рис. 3–5 построены графики зависимости среднеарифметического отклонения удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от выше исследуемых факторов.

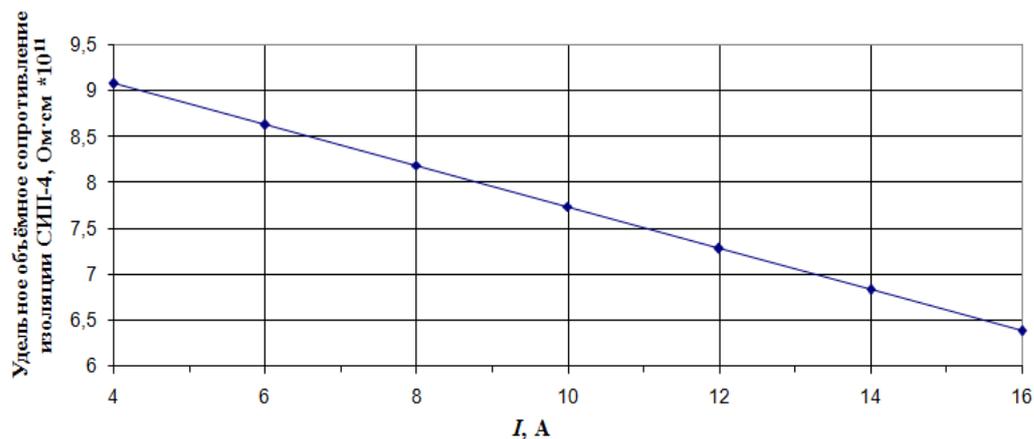


Рис. 3. График зависимости среднеарифметического отклонения удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от переменного электрического тока
Fig. 3. Graph of the dependence of the arithmetic mean deviation of the specific volume electrical resistance of SIW-4 insulation on alternating electric current

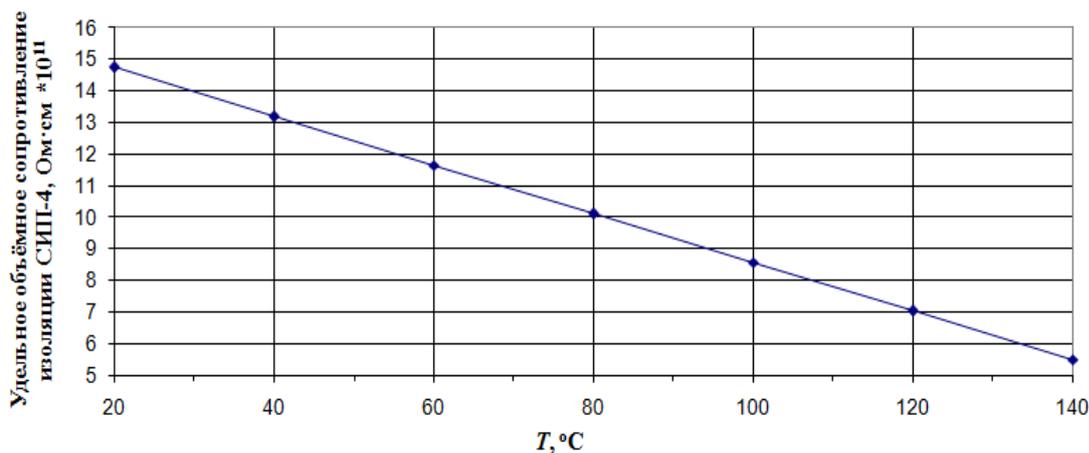


Рис. 4. График зависимости среднеарифметического отклонения удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от температуры окружающей среды
Fig. 4. Graph of the dependence of the arithmetic mean deviation of the specific volume electrical resistance of SIW-4 insulation on the ambient temperature

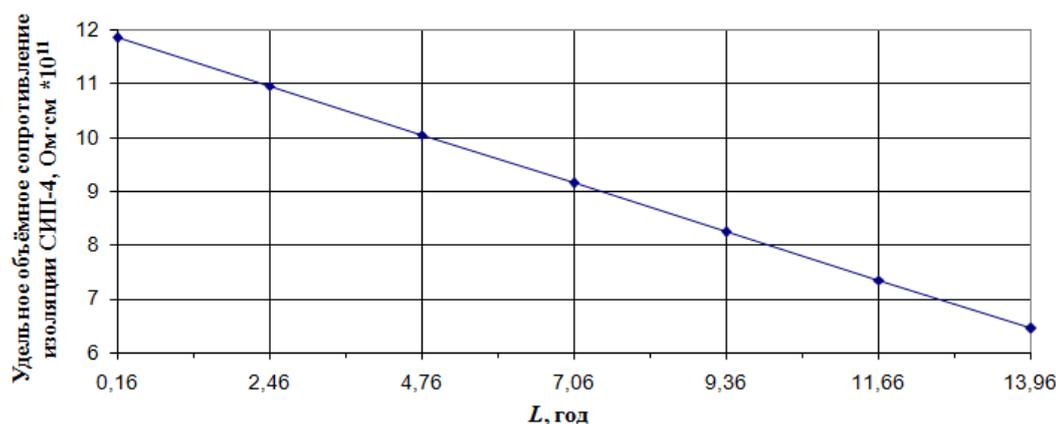


Рис. 5. График зависимости среднеарифметического отклонения удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 от периода (продолжительности) эксплуатации

Fig. 5. Graph of the dependence of the arithmetic mean deviation of the specific volume electrical resistance of SIW-4 insulation on the period (duration) of operation

На основании выполненных исследований определены верхние и нижние уровни исследуемых факторов: переменный электрический ток, НУ – 4 А, ВУ – 16,5 А; температура окружающей среды, НУ – 20 °С, ВУ – 130 °С; период (продолжительность) эксплуатации, НУ – 0,16 год, ВУ – 14,4 год (лет). Подобраны необходимые измерительные инструменты, обеспечивающие точность проведения полного факторного эксперимента. Так, для измерения сопротивления материала изоляции СИП-4 был использован мегаомметр МЕГЕОН 13125, обеспечивающий достаточную точность в измерении, для измерения температуры исследуемых образцов СИП-4 – бесконтактный инфракрасный термометр Venetech GM320, для контроля параметров переменного электрического тока – два амперметра АМА-801. Проведен линейный полный факторный эксперимент, в результате которого получена математическая модель, отображающая зависимость удельного объемного электрического сопротивления изоляции СИП-4 в зависимости от исследуемых факторов. Данная модель проверена на адекватность по *F*-критерию Фишера. Построены графики, отображающие зависимость среднеарифметического отклонения удельного объемного сопротивления изоляции СИП-4 от исследуемых факторов.

Заключение

В результате проведения линейного полного факторного эксперимента получена математическая модель, отображающая зависимость удельного объемного электрического сопротивления материала изоляции СИП-4 от действия внешних факторов: переменного электрического тока, температуры окружающей среды и продолжительности эксплуатации. Полученная математическая модель может быть использована для моделирования мгновенного значения удельного объемного электрического сопротивления материала изоляции СИП-4. Полученное значение удельного объемного электрического сопротивления конкретного участка СИП-4 позволит в дальнейшем принять соответствующее управляющее техническое воздействие, необходимое для обеспечения вероятности безотказной работы электрической сети на уровне 0,95, и не допустить внезапного отказа.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему коллеге канд. техн. наук, доценту Максимова Юрию Павловичу за консультации по вопросам электропроводимости диэлектрических материалов в процессе подготовки и реализации плана научного исследования в области влияния эксплуатационных факторов на надежность изоляции СИП-4.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Дубяго М. Н. Методы диагностики и прогнозирования остаточного ресурса кабельных линий в распределительных электрических сетях 6–10 кВ : дис. ... канд. техн. наук. Таганрог, 2021. 216 с.
- Задорожная Е. А. Теория планирования эксперимента. Челябинск : ЮУрГУ, 2018. 92 с.
- Ней Зо Лин. Технологические и эксплуатационные свойства наномодифицированного полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 163 с.

- Поляков Д. А. Мониторинг остаточного ресурса изоляции кабельных линий 6(10) кВ из сшитого полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 148 с.
- Поляков Д. А., Юрчук Д. А., Кошук Г. А., Никитин К. И. Определение скорости разрушения полиэтиленовой изоляции линий электропередачи под воздействием температуры // Омский научный вестник. 2016. № 4(148). С. 105–108. EDN: WBMLSP.
- Dubyago M. N., Poluyanovich N. K. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature // *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 2019. Vol. 7, N 1. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmmm.2019.7.1.418>.

References

- Dubyago, M. N. 2021. Methods of diagnostics and forecasting of residual resource of cable lines in distribution electric networks 6–10 kV. Ph.D. Dissertation. Taganrog. (In Russ.)
- Zadorozhnaya, E. A. 2018. Theory of experimental planning. Chelyabinsk. (In Russ.)
- Ney Zo, Lin. 2017. Technological and operational properties of nano-modified polyethylene. Ph.D. Dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Polyakov, D. A. 2017. Monitoring of residual insulation life of 6(10) kV cable lines made of cross-linked polyethylene. Ph.D. Dissertation. Omsk. (In Russ.)
- Polyakov, D. A., Yurchuk, D. A., Koschuk, G. A., Nikitin, K. I. 2016. Determination of the rate of destruction of polyethylene insulation of power lines under the influence of temperature. *Omsk Scientific Bulletin*, 4(148), pp. 105–108. EDN: WBMLSP. (In Russ.)
- Dubyago, M. N., Poluyanovich, N. K. 2019. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 7(1). DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmmm.2019.7.1.418>.

Сведения об авторе

Денисов Иван Владимирович – пр. Строителей, 3/7, корпус 3, г. Владимир, Россия, 600014;
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: denisoviv2@mail.ru

Ivan V. Denisov – 3/7(3) Stroitelei Ave., Vladimir, Russia, 600014;
Vladimir State University named after Alexander Grigorievich
and Nikolai Grigorievich Stoletovs, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: denisoviv2@mail.ru

Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях

А. Р. Петров*, Е. И. Грачева, Н. К. Мифтахова

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
19.08.2024;

принята
к публикации
29.08.2024

Ключевые слова:

низковольтная сеть,
потери электроэнергии,
сопротивление
контактов, нагрев
проводников,
загрузка линий

Для повышения достоверности расчетов потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях необходимо учитывать влияние основных параметров электрооборудования. В ходе исследования предложены структурная схема и алгоритм определения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети; выявлены основные факторы, определяющие эквивалентное сопротивление схемы (сопротивления низковольтных коммутационных аппаратов, температура нагрева проводников, температура окружающей среды, коэффициент загрузки оборудования); показаны графические зависимости изменения эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков схемы от среднеквадратического коэффициента загрузки оборудования и температуры нагрева проводников. Общая погрешность оценки эквивалентного сопротивления при расчете без учета основных исследуемых параметров оборудования для радиальных, магистральных и смешанных схем составляет 40 % и более. Погрешность результатов вычислений без учета сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов может достигать 80 %. Полученные зависимости эквивалентного сопротивления от основных параметров оборудования рекомендуются к использованию для повышения достоверности оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях.

Для цитирования

Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids

Almaz R. Petrov*, Elena I. Gracheva, Naila K. Miftakhova

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Article info

Received
19.08.2024;

accepted
29.08.2024

Key words:

low-voltage network,
power losses,
contact resistance,
conductor heating,
line loading

Abstract

To improve the reliability of calculations of electric power losses in low-voltage electric networks, it is necessary to take into account the influence of the main parameters of electrical equipment. In the course of the study, a structural diagram and an algorithm for determining the equivalent resistance of the section of the shop network have been proposed; the main factors determining the equivalent resistance of the circuit (resistance of low-voltage switching devices, heating temperature of conductors, ambient temperature, equipment load factor) have been identified; graphical dependencies of the change in the equivalent resistance of the radial and trunk sections of the circuit on the mean square equipment load factor and the heating temperature of conductors have been shown. The total error in estimating the equivalent resistance when calculating without taking into account the main studied parameters of equipment for radial, trunk and mixed circuits is 40 % or more. The error in the results of calculations without taking into account the resistance of contact connections of switching devices can reach 80 %. The obtained dependencies of the equivalent resistance on the main parameters of the equipment are recommended for use to improve the reliability of estimating electric power losses in intra-plant electric networks.

For citation

Petrov, A. R. et al. 2024. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

Введение

Современные темпы развития технологий промышленной отрасли и рост потребления электроэнергии (ЭЭ) обуславливают необходимость повышения качества учета потерь ЭЭ в низковольтных сетях промышленных систем электроснабжения (Grigoras et al., 2018). В условиях экономических санкций актуализируется проблема разработки эффективных методов энергосбережения в электроэнергетике и промышленности РФ (Jizhou et al., 2021; Петрова и др., 2023; Рахимов и др., 2021; Абдуллазянов и др., 2021).

Оценка эффективности функционирования систем электроснабжения производится на основе анализа их схемных и режимных параметров. Определение потерь ЭЭ в низковольтных цеховых сетях является более сложной задачей по сравнению с расчетом потерь в сетях высоких напряжений, что объясняется особенностями электрических сетей напряжением до 1 кВ:

- большим объемом схемной и режимной информации с низкой достоверностью;
- большой протяженностью линий и разветвленностью схем сетей электроснабжения;
- различным исполнением участков (двух/трех/четырёх/пятипроводные участки);
- неравномерностью загрузки участков сети и пр.

Перечисленные особенности необходимо учитывать при оценке и моделировании потерь активной мощности в низковольтных электрических сетях (Грачева и др., 2018; Ivanov et al., 2019; Наумов и др., 2023). Реализуемые современные модели эффективны и при асимметричной нагрузке с применением балансировки нагрузки по фазам в низковольтной электрической сети (Atanasov et al., 2022; Oramas-Piero et al., 2018).

При выборе параметров линий цеховых сетей необходимо учитывать основные характеристики эксплуатации – условия окружающей среды, загрузку линий и т. д. Компоновка оборудования цеховых сетей определяется следующими техническими факторами:

- 1) числом, плотностью, характером размещения и мощностью приемников ЭЭ;
- 2) числом участков цеховой сети и длиной линий схемы;
- 3) температурой окружающей среды;
- 4) подвижностью приемников при применении троллейных токопроводов или гибких проводов и кабелей.

Точное определение величины потерь ЭЭ при проектировании важно для оптимизации структуры схемы сети, выбора мест и количества распределительных устройств, а также определения сечений кабелей и проводов. Статистические данные показывают, что потери ЭЭ в низковольтных распределительных сетях составляют примерно от 4 до 20 % от общего электропотребления (Armas et al., 2019; Абдуллазянов и др., 2021; Грачева и др., 2018).

На основе расчетных данных величины потерь ЭЭ сотрудники отделов эксплуатации проводят анализ имеющихся "очагов наибольших потерь" для эффективного внедрения мероприятий по экономии ЭЭ (Shengyan et al., 2011). Для эффективного снижения потерь в системе электроснабжения и повышения эффективности эксплуатации оборудования в настоящее время используются нейронные сети на основе алгоритма кластеризации графов (Chen et al., 2023). Возможно уточнение топологии низковольтных сетей при использовании программного обеспечения для расчета потерь в кабельных линиях (Wang et al., 2023; Hasan et al., 2020).

Для повышения достоверности величины потерь ЭЭ в сетях 0,4 кВ следует определять потери в низковольтных коммутационных аппаратах (НКА). Техническое состояние НКА в значительной степени определяет надежность системы электроснабжения (Петров и др., 2023). Для уменьшения финансовых расходов на эксплуатацию электрооборудования необходимо построение рациональных схем цеховых сетей низкого напряжения (Kerckhove et al., 2023).

Целью настоящего исследования является определение эквивалентного сопротивления цеховой сети с учетом влияния основных параметров электрооборудования: загрузки линий; температуры окружающей среды; температуры нагрева проводников и сопротивлений НКА.

Материалы и методы

Величина потерь мощности или ЭЭ в электрической сети определяется произведением квадрата среднеквадратичного тока головного участка сети и эквивалентного сопротивления R_{ekv} схемы. Погрешность расчета R_{ekv} может быть сопоставима с погрешностью определения величины среднеквадратичного тока.

Объектом исследования является участок цеховой сети системы электроснабжения промышленного предприятия.

Схема участка цеховой сети для установления эквивалентного сопротивления R_{ekv} схемы без учета основных параметров электрооборудования показана на рис. 1, где использованы следующие обозначения: Т – трансформатор; АВ – автоматический выключатель; ПМ – пускатель магнитный; К – контактор; Д – электродвигатель.

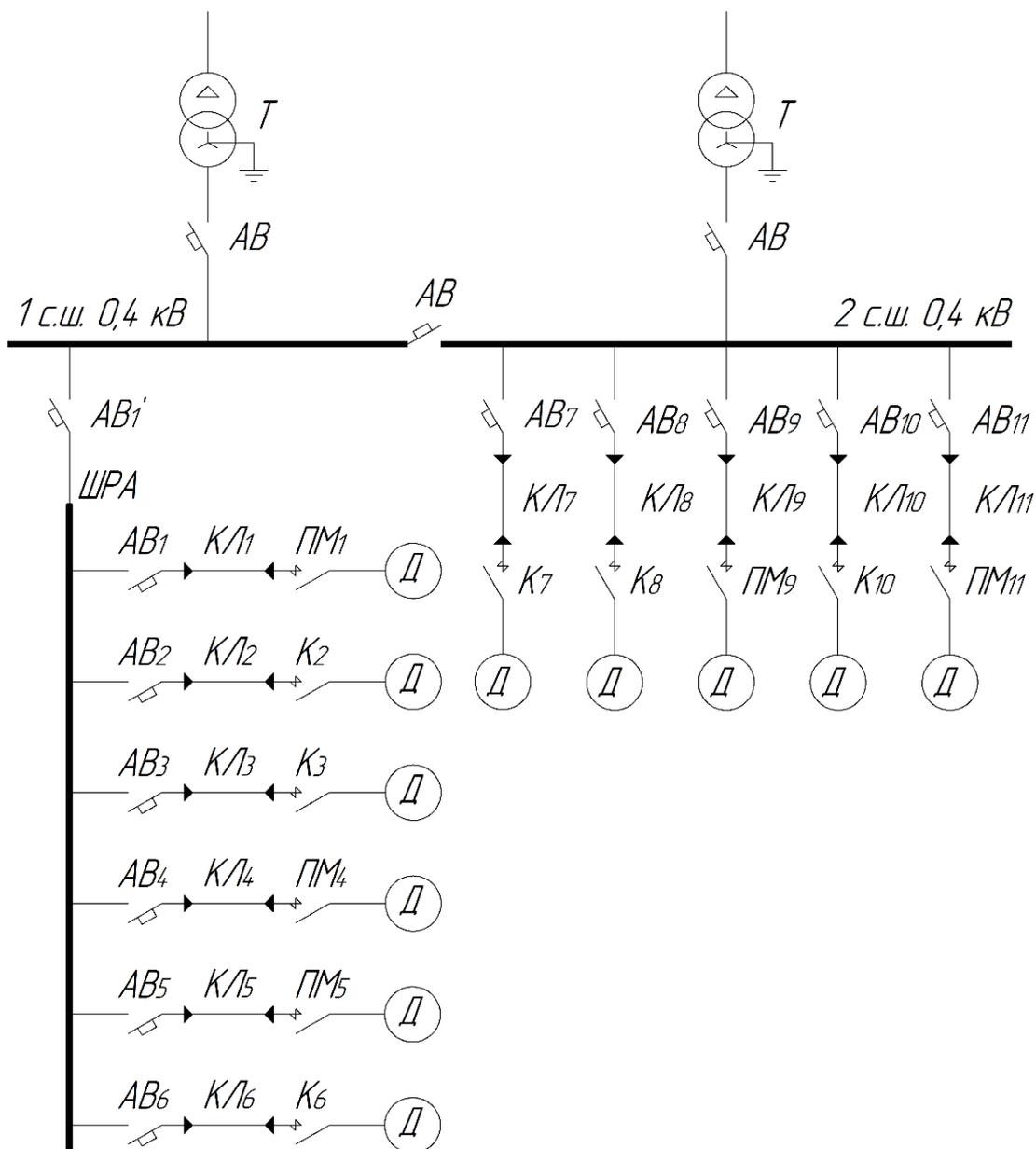


Рис. 1. Схема электроснабжения участка цеховой сети
 Fig. 1. Electricity supply scheme of the workshop network section

Значения основных параметров электрооборудования участка цеховой сети приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры электрооборудования участка цеховой сети
 Table 1. Main parameters of electrical equipment of the workshop network section

Номер	Кабельная линия		K_c^*	Электродвигатель	$P_{н}^{**}$, кВт	Автоматический выключатель	Магнитный пускатель	Контактор
	Тип	Длина l , м						
1'	–	–	–	–	–	ВА57-31-80А	–	–
1	АВВГ 3х10	20	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	ПМЛ-3100-40А	–
2	АВВГ 3х6	18	0,45	АИР132М2	11,0	ВА57-31-25А	–	КМ-22510-25А
3	АВВГ 3х4	12	0,55	АИР112М2	7,5	ВА57-31-16А	–	ПМ12-016150-16А
4	АВВГ 3х2,5	10	0,7	АИР100S2	4,0	А63-М-10А	ПМЛ-1100-10А	–
5	АВВГ 3х2,5	10	0,75	АИР100S2	4,0	А63-М-10А	ПМЛ-1100-10А	–
6	АВВГ 3х4	12	0,6	АИР112М2	7,5	ВА57-31-16А	–	ПМ12-016150-16А

7	АВВГ 3x25	18	0,5	АИР200М2	37	ВА57-31-80А	–	КМ-48012-80А
8	АВВГ 3x10	15	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	–	ПМ12-040150-40А
9	АВВГ 3x25	12	0,65	АИР180М2	30,0	ВА57-31-63А	ПМЛ-4100-63А	–
10	АВВГ 3x16	23	0,85	АИР180S2	22,0	ВА57-31-50А	–	КМ-35012-50А
11	АВВГ 3x10	15	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	ПМЛ-3100-40А	–

Примечания: * K_z – коэффициент загрузки оборудования; ** P_n – номинальная мощность электродвигателя.

Структурная схема для определения эквивалентного сопротивления участка сети с учетом основных параметров электрооборудования представлена на рис. 2: t_{os} – температура окружающей среды, °С; t – температура нагрева проводников, °С; K_z – коэффициент загрузки оборудования; R_{nka} – сопротивление контактных соединений НКА, мОм; R_{ekvr} – эквивалентное сопротивление радиального участка схемы, мОм; R_{ekvsh} – эквивалентное сопротивление магистрального участка схемы, мОм; R_{ekv} – эквивалентное сопротивление смешанной схемы, мОм.

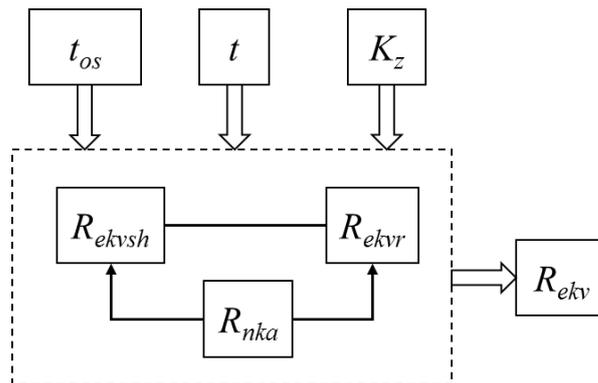


Рис. 2. Структурная схема для определения эквивалентного сопротивления участка сети R_{ekv}
 Fig. 2. Structure diagram for determining the equivalent resistance of the network section R_{ekv}

Результаты и обсуждение

Расчет эквивалентного сопротивления распределительного шинпровода

Средняя длина линий ответвлений от распределительного шинпровода (ШРА), м, вычисляется по формуле

$$l_s = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{(20 + \dots + 12)}{6} = 13,67. \quad (1)$$

Величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий ответвлений от шинпровода, мОм/м, при 20 °С равна

$$r_{e20} = 18,5 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i}, \quad (2)$$

где S_i – сечение i -й линии ответвления, мм²; величина $18,5/S_i$ представляет собой сопротивление 1 м медной линии сечением S_i при 20 °С, мОм/м; если часть линии сети выполнена проводами/кабелями с алюминиевыми жилами, то используется величина $31,3/S_i$:

$$r_{e20} = 31,3 \cdot \frac{(20 + \dots + 12)}{(20 \cdot 10 + \dots + 12 \cdot 4)} = 5,65.$$

Квадрат среднеквадратического коэффициента загрузки ответвлений от шинпровода

$$K_z^2 = \frac{\sum_{i=1}^n K_{zi}^2}{n} = \frac{0,75^2 + \dots + 0,6^2}{6} = 0,413. \quad (3)$$

Температура нагрева шинпровода, °С, определяется по выражению

$$t = K_z^2 (t_d - t_{os}) + t_{os} = 0,413 \cdot (95 - 20) + 20 = 51, \quad (4)$$

где t_d – допустимая температура нагрева проводника, °С; t_{os} – температура окружающей среды, °С.

Сопротивление коммутационных аппаратов R_{nka} зависит от типа и тока коммутационного аппарата. Для автоматических выключателей и контакторов при $I_{ном} < 60$ А сопротивление контактных соединений

определяется соотношением $R_{nka} = \frac{350}{I_n}$, при $I_{nom} \geq 60$ А – соотношением $R_{nka} = \frac{310}{I_n}$. Для магнитных пускателей при $I_{nom} < 70$ А сопротивление контактов определяется соотношением $R_{nka} = \frac{825}{I_n}$, при $I_{nom} \geq 70$ А – соотношением $R_{nka} = \frac{760}{I_n}$.

Суммарное сопротивление, мОм, коммутационных аппаратов, установленных на линиях ответвлений и отходящих от ШРА, вычисляется так:

$$R_{nka} = \frac{350}{40} + \frac{825}{40} + \dots + 2 \cdot \frac{350}{16} = 379,8.$$

Общее сопротивление, мОм, ответвлений от шинпровода

$$R_n = r_{e20} l_s [1 + 0,004(t - 20)] + R_{nka} = 5,65 \cdot 13,67 \cdot [1 + 0,004(51 - 20)] + 379,8 = 466,72. \quad (5)$$

Эквивалентное сопротивление ШРА находится по формуле

$$R_{ekvsh} = \left[r_{20} l \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) + \frac{R_n}{n} \right] [1 + \alpha(t - t_{os})] + \frac{R_{nka}}{n}, \quad (6)$$

где r_{20} – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм; l – длина шинпровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С.

Эквивалентное сопротивление ШРА, мОм, с учетом автоматического выключателя АВ'1 рассчитывается следующим образом:

$$R_{ekvsh} = \left[0,016 \cdot 9 \cdot \frac{1}{6} \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \right) \cdot \left(2 + \frac{1}{6} \right) + \frac{466,72}{6} \right] \cdot [1 + 0,004 \cdot (51 - 20)] + \frac{379,8}{6} + 3,875 = 154,69,$$

где сопротивление 1 м шинпровода ШРА, мОм, при 20 °С равно

$$r_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{5 \cdot 35 \cdot 10^{-6}} = 0,016.$$

Расчет эквивалентного сопротивления, мОм, радиального участка схемы второй секции шин (2 с. ш., 0,4 кВ) производится по формуле

$$R_{ekvr} = \left(r_{e20} l_s [1 + 0,004(t_r - 20)] + R_{nka} \right) \frac{1}{n} = \left(0,504 \cdot 16,6 \cdot [1 + 0,004(45,2 - 20)] + 86,64 \right) \cdot \frac{1}{5} = 24,02. \quad (7)$$

Эквивалентная температура нагрева проводника t_r , °С, определяется среднеквадратическим значением коэффициента загрузки:

$$t_r = K_z^2 (t_{kl} - t_{os}) + t_{os}, \quad (8)$$

где t_{kl} – допустимая температура нагрева кабельной линии (для АВВГ принимается равной 70 °С).

Эквивалентное сопротивление смешанной схемы

Определим R_{ekv} , мОм, смешанной схемы сети:

$$R_{ekv} = \frac{R_{ekvr} R_{ekvsh}}{R_{ekvr} + R_{ekvsh}} = \frac{24,02 \cdot 154,69}{24,02 + 154,69} = 20,79. \quad (9)$$

По формуле (6) рассчитаем эквивалентное сопротивление радиального участка схемы при изменении среднеквадратического значения коэффициента загрузки линий от 0 до 2,0. По выражению (7) определим эквивалентное сопротивление ШРА магистрального участка схемы при изменении среднеквадратического коэффициента загрузки ШРА от 0 до 2,0. Зависимости эквивалентного сопротивления ШРА магистрального и радиального участков схемы от среднеквадратического коэффициента загрузки представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков сети от среднеквадратического коэффициента загрузки

Table 2. Results of calculating equivalent resistance of the radial and main network sections based on the root-mean-square load factor

Участок сети	Эквивалентное сопротивление, мОм, с учетом коэффициента загрузки K_z				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
Радиальный участок схемы R_{ekvr}	23,41	23,71	24,63	26,15	28,28
Магистральный участок схемы R_{ekvsh}	143,44	150,19	171,33	209,47	268,93

Графические зависимости (рис. 3) показывают, что изменение среднеквадратической загрузки линий радиального участка от номинального до двукратного значения приводит к повышению R_{ekvr} на 14,8 %, изменение среднеквадратической загрузки ШРА магистрального участка от номинального значения до двукратного превышения приводит к увеличению R_{ekvsh} на 56,9 %.

По формулам (6) и (7) рассчитаем эквивалентное сопротивление радиального и магистрального участков схемы при изменении температуры нагрева проводников. Графические зависимости эквивалентного сопротивления R_{ekvr} радиальной схемы (кривая 1) от эквивалентной температуры нагрева линий t_r и эквивалентного сопротивления ШРА магистральной схемы R_{ekvsh} от температуры нагрева ШРА (кривая 2) представлены на рис. 4 и в табл. 3.

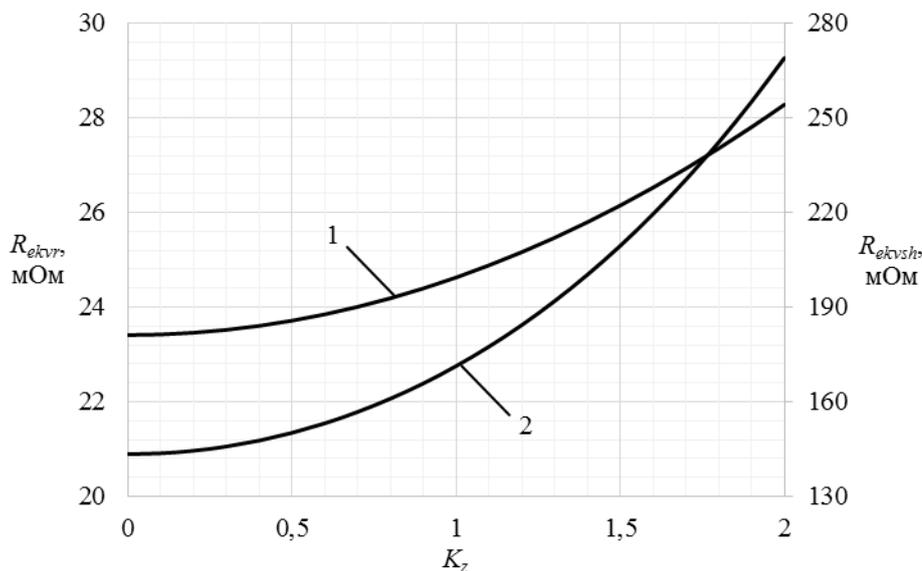


Рис. 3. Графические зависимости эквивалентного сопротивления от среднеквадратического коэффициента загрузки: 1 – радиального участка схемы R_{ekvr} ; 2 – магистрального участка схемы R_{ekvsh}
 Fig. 3. Graphical dependences of the equivalent resistance on the root-mean-square loading factor: 1 – the radial section of the scheme R_{ekvr} ; 2 – the main section of the scheme R_{ekvsh}

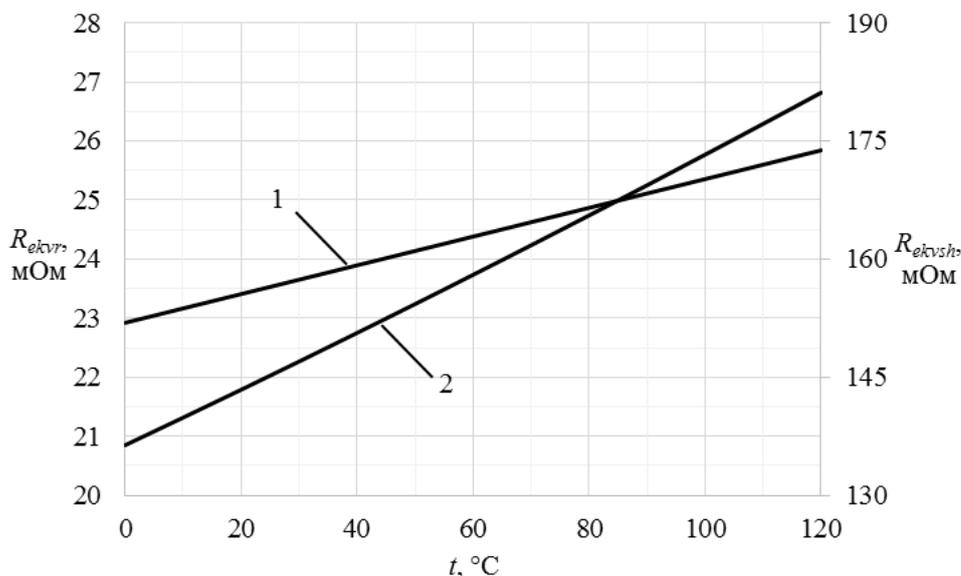


Рис. 4. Зависимости эквивалентного сопротивления от эквивалентной температуры нагрева проводников: 1 – радиального участка схемы R_{ekvr} ; 2 – магистрального участка схемы R_{ekvsh}
 Fig. 4. Dependence of equivalent resistance on equivalent heating temperature of conductors: 1 – the radial section of the scheme R_{ekvr} ; 2 – the main section of the scheme R_{ekvsh}

Таблица 3. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления участков цеховой сети от температуры нагрева проводников
Table 3. Results of calculating equivalent resistance of sections of the shop network from the heating temperature of conductors

Участок сети	Эквивалентное сопротивление, мОм, при температуре нагрева проводников t , °С						
	0	20	40	60	80	100	120
Радиальный участок схемы R_{ekvr}	22,92	23,41	23,9	24,38	24,87	25,36	25,84
Магистральный участок схемы R_{ekvsh}	136,39	143,44	150,65	158,03	165,57	173,3	181,15

В соответствии с допустимой температурой нагрева кабеля АВВГ (70 °С) нагрев до температуры перегрузки (90 °С) приводит к повышению R_{ekvr} на 2 %. Увеличение температуры ШРА от допустимого значения (95 °С) до температуры перегрузки (115 °С) ведет к повышению R_{ekvsh} на 4,6 %.

Результаты расчетов представлены в табл. 4, где показаны возможные погрешности определения R_{ekv} без учета таких факторов, как сопротивления НКА, нагрев ШРА и кабельных линий, температура окружающей среды и коэффициент загрузки проводников.

Таблица 4. Возможные погрешности при определении эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков схемы
Table 4. Possible errors in determining the equivalent resistance of the radial and main circuit sections

Расчет	Эквивалентное сопротивление участков, мОм			Погрешность, %		
	R_{ekvr} (от 2 с. ш.)	R_{ekvsh} (от 1 с. ш.)	R_{ekv}	δ_{ekvr}	δ_{ekvsh}	δ_{ekv}
С учетом всех параметров	24,02	154,69	20,79	–	–	–
Без учета:						
– сопротивления НКА R_{nka}	6,70	16,34	4,75	72,1	89,4	77,15
– температуры нагрева проводников t	22,92	136,39	19,63	4,6	11,8	5,6
– температуры окружающей среды t_{os}	24,51	162,16	21,29	2,04	4,83	2,4
– среднеквадратического коэффициента загрузки оборудования K_z	23,41	143,44	20,13	2,54	7,27	3,17

Данные результатов вычислений (табл. 4) показывают, что наибольшая погрешность (72,1 %) при определении эквивалентного сопротивления радиального участка схемы выявляется в ходе расчета без учета сопротивлений НКА, установленных на линии. Наименьшая погрешность для данного участка схемы составила 2,04 % и определена при расчете без учета температуры окружающей среды. Наибольшая погрешность (89,4 %) при определении эквивалентного сопротивления шинпровода магистрального участка схемы возникает при вычислении без учета сопротивлений НКА, а наименьшая погрешность (4,83 %) определяется при расчете без учета температуры окружающей среды.

Определим суммарную погрешность при вычислении эквивалентного сопротивления смешанной схемы с учетом рассмотренных выше составляющих. Расчетный интервал – минимальное и максимальное значения при определении эквивалентного сопротивления – вычисляется по формулам:

$$R_{\min \Sigma} = R_{ekv} (1 - 2\sigma_R), \quad R_{\max \Sigma} = R_{ekv} (1 + 2\sigma_R), \quad (10)$$

$$R_{\min \Sigma} = 20,79 \cdot (1 - 2 \cdot 0,19) = 12,74 \text{ мОм}, \quad R_{\max \Sigma} = 20,79 \cdot (1 + 2 \cdot 0,19) = 28,84 \text{ мОм},$$

где σ_R – среднеквадратическое отклонение эквивалентного сопротивления, равное

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{ekv})^2}}{4R_{ekv}} = \frac{\sqrt{(4,75 - 20,79)^2 + (19,63 - 20,79)^2 + (21,29 - 20,79)^2 + (20,13 - 20,79)^2}}{4 \cdot 20,79} = 0,19. \quad (11)$$

Границы суммарной погрешности при определении эквивалентного сопротивления смешанного участка схемы рассчитываются так:

$$\delta_- = \left(\frac{R_{\min \Sigma} - R_{ekv}}{R_{ekv}} \right) 100 \% = \left(\frac{12,74 - 20,79}{20,79} \right) 100 \% = -38,72 \%,$$

$$\delta_+ = \left(\frac{R_{\max \Sigma} - R_{ekv}}{R_{ekv}} \right) 100 \% = \left(\frac{28,84 - 20,79}{20,79} \right) 100 \% = +38,72 \%.$$

Суммарная погрешность при определении эквивалентного сопротивления радиального участка схемы составляет $\pm 36,16$ %, эквивалентного сопротивления магистрального участка схемы – $\pm 45,3$ %.

Заключение

Исследование параметров функционирования систем внутриводского электроснабжения показывает, что степень достоверности определения потерь мощности и электроэнергии зависит от точности расчета эквивалентного сопротивления схемы. Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на точность расчета эквивалентного сопротивления схемы, является учет сопротивлений контактов НКА.

Отсутствие достоверной информации о параметрах оборудования приводит к погрешности при определении эквивалентного сопротивления схемы сети. Для повышения точности расчета эквивалентного сопротивления схемы и потерь ЭЭ во внутриводских сетях необходимо учитывать влияние следующих факторов: температуры нагрева проводников, температуры окружающей среды, сопротивлений контактов НКА, а также загрузки электрооборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Горлов А. Н., Шакурова З. М. [и др.]. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13>. EDN: TVQQNU.
- Грачева Е. И., Абдуллазянов Р. Э., Алимова А. Н. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 53–65. EDN: UCZSVD.
- Наумов И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А. Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 2. С. 175–186. EDN: FEHWNS.
- Петров А. Р., Грачева Е. И., Valtchev S. Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>. EDN: FNRQJC.
- Петрова Р. М., Грачева Е. И., Valtchev S., Мифтахова Н. К. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>. EDN: MVFYKP.
- Рахимов О. С., Мирзоев Д. Н., Грачева Е. И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 209–222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>. EDN: NWISVC.
- Armas J., Ivanov A. Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks // IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982319.
- Atanasov V., Stoilov D. Influence of the asymmetrical load on losses in low voltage network // V International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/hitech56937.2022.10145568>.
- Chen L., Yaxin L., Kai W., Dongping Z. [et al.]. Research on graph clustering based line loss prediction in low-voltage distribution network // 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET), Shanghai, China, 2023. P. 540–545. DOI: <https://doi.org/10.1109/apet59977.2023.10489816>.
- Grigoras G., Gavrilas M. An improved approach for energy losses calculation in low voltage distribution networks based on the smart meter data // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2018. P. 0749–0754. DOI: <https://doi.org/10.1109/icepe.2018.8559612>.
- Hasan H., Mozumdar M., Al-Jufout S. Using 0.6 kV/1 kV low voltage in distribution systems for the reduction of the technical and non-technical energy losses // 11th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310417>.
- Ivanov O., Neagu B.-C., Gavrilas M., Grigoras G. [et al.]. Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms // International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/sielmen.2019.8905900>.
- Jizhou L., Jixian R., Ran H., Wen Y. [et al.]. Research on low voltage does not power cut operation refined collection of line loss data in distribution network // IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Dalian, China, 2021. P. 450–454. DOI: <https://doi.org/10.1109/iciscae52414.2021.9590796>.

- Kerckhove S., D’Hulst R., Hertem D. V. Reconfiguration method for low voltage distribution networks // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Grenoble, France, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/isgteurope56780.2023.10407763>.
- Oramas-Piero C., Vega-Fuentes E., Déniz F. Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks // AEIT International Annual Conference, Bari, Italy, 2018. DOI: <https://doi.org/10.23919/aeit.2018.8577460>.
- Shengyan S., Xiaoliu S., Yawei G. Research on calculation of low voltage distribution network theoretical line loss based on matpower // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011. P. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.1109/apap.2011.6180516>.
- Wang W., Wang T., Cai D., Dong H. [et al.]. Analysis on technical loss reduction of typical low-voltage distribution areas // 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Tianjin, China, 2023. P. 696–700. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpet59380.2023.10367564>.

References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Gorlov, A. N., Shakurova, Z. M. et al. 2021. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(3), pp. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13>. EDN: TVQQNU. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Abdullazyanov, R. E., Alimova, A. N. 2018. Analysis and methods for calculating active power and electricity losses in low-voltage shop networks. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 4(40), pp. 53–65. EDN: UCZSVD. (In Russ.)
- Naumov, I. V., Fedorinova, E. S., Yakupova, M. A. 2023. A device for controlling anbalancing modes in components of low-voltage power supply systems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 16(2), pp. 175–186. EDN: FEHWNS. (In Russ.)
- Petrov, A. R., Gracheva, E. I., Valtchev, S. 2023. Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>. EDN: FNRQJC. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Gracheva, E. I., Valtchev, S., Miftakhova, N. K. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>. EDN: MVFYKP. (In Russ.)
- Rakhimov, O. S., Mirzoev, D. N., Gracheva, E. I. 2021. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(3), pp. 209–222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>. EDN: NWISVC. (In Russ.)
- Armas, J., Ivanov, A. 2019. Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks. *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982319.
- Atanasov, V., Stoilov, D. 2022. Influence of the asymmetrical load on losses in low voltage network. *V International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, Sofia, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1109/hitech56937.2022.10145568>.
- Chen, L., Yaxin, L., Kai, W., Dongping, Z. et al. 2023. Research on graph clustering based line loss prediction in low-voltage distribution network. *2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET)*, Shanghai, China, pp. 540–545. DOI: <https://doi.org/10.1109/apet59977.2023.10489816>.
- Grigoras, G., Gavrilas, M. 2018. An improved approach for energy losses calculation in low voltage distribution networks based on the smart meter data. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania, pp. 0749–0754. DOI: <https://doi.org/10.1109/icepe.2018.8559612>.
- Hasan, H., Mozumdar, M., Al-Jufout, S. 2020. Using 0.6 kV/1 kV low voltage in distribution systems for the reduction of the technical and non-technical energy losses. *11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia. DOI: <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310417>.
- Ivanov, O., Neagu, B.-C., Gavrilas, M., Grigoras, G. et al. 2019. Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms. *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/sielmen.2019.8905900>.
- Jizhou, L., Jixian, R., Ran, H., Wen, Y. et al. 2021. Research on low voltage does not power cut operation refined collection of line loss data in distribution network. *IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*, Dalian, China, pp. 450–454. DOI: <https://doi.org/10.1109/iciscae52414.2021.9590796>.
- Kerckhove, S., D’Hulst, R., Hertem, D. V. 2023. Reconfiguration method for low voltage distribution networks. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, Grenoble, France. DOI: <https://doi.org/10.1109/isgteurope56780.2023.10407763>.

- Oramas-Piero, C., Vega-Fuentes, E., Déniz, F. 2018. Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks. *AET International Annual Conference*, Bari, Italy. DOI: <https://doi.org/10.23919/aet.2018.8577460>.
- Shengyan, S., Xiaoli, S., Yawei, G. 2011. Research on calculation of low voltage distribution network theoretical line loss based on matpower. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, China, pp. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.1109/apap.2011.6180516>.
- Wang, W., Wang, T., Cai, D., Dong, H. et al. 2023. Analysis on technical loss reduction of typical low-voltage distribution areas. *5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET)*, Tianjin, China, pp. 696–700. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpet59380.2023.10367564>.

Сведения об авторах

Петров Алмаз Радикович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Almaz R. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, PhD Student; e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Грачева Елена Ивановна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Elena I. Gracheva – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Мифтахова Наиля Камильевна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, ст. преподаватель;
e-mail: nailya_miftahovna@mail.ru

Nailya K. Miftakhova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Senior Lecturer;
e-mail: nailya_miftahovna@mail.ru

Оценка параметров надежности схем внутриводского электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями

Р. М. Петрова*, Е. И. Грачева

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.08.2024;

получена
после доработки
05.09.2024;

принята
к публикации
06.09.2024

Ключевые слова:

система
электроснабжения,
трансформатор,
подстанция, параметры
надежности,
резервирование,
кабельные линии

В процессе проектирования систем внутриводского электроснабжения необходимо определение их рационального резервирования. Надежность системы электроснабжения установлена для следующих вариантов схемы двухтрансформаторных подстанций 10/0,4 кВ: без резервирования; с резервированием (при установке секционного выключателя); с двойным резервированием (при установке секционного выключателя и резервной перемычки на 0,4 кВ). Данные расчетов показали, что надежность схемы без резервирования в 1,87 раза ниже по сравнению со схемой с резервированием и в 3,17 раза ниже – со схемой с двойным резервированием. Получены графические зависимости времени наработки на отказ схем электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями от различной номинальной мощности цеховых трансформаторов для трех вариантов: без резервирования; с резервированием; с двойным резервированием. Оптимальным условием является использование меньшего числа трансформаторных подстанций (соответственно, трансформаторов) при соблюдении значения коэффициента загрузки 0,8. При сравнении графиков установлено, что наибольшее время наработки на отказ достигается при двойном резервировании, наименьшее – при отсутствии резервирования. Результаты исследований могут быть рекомендованы к использованию в процессе проектирования систем внутриводского электроснабжения для оценки и повышения надежности и эффективности эксплуатации оборудования.

Для цитирования

Петрова Р. М. и др. Оценка параметров надежности схем внутриводского 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>.

Assessment of reliability parameters of in-plant power supply schemes with two-transformer substations

Renata M. Petrova*, Elena I. Gracheva

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Article info

Received
01.08.2024;

received
in revised
05.09.2024;

accepted
06.09.2024

Key words:

power supply system,
transformer,
substation,
reliability parameters,
redundancy,
cable lines

Abstract

In the process of designing in-plant power supply systems, it is necessary to determine their rational redundancy. The reliability of the power supply system has been established for the following variants of the circuit of two-transformer 10/0.4 kV substations: without redundancy; with redundancy (when installing a sectional switch); with double redundancy (when installing a sectional switch and a backup jumper for 0.4 kV). The calculation data have shown that the reliability of the circuit without redundancy is 1.87 times lower compared to the circuit with redundancy and 3.17 times lower than with the circuit with double redundancy. Graphic dependencies of the mean time between failures of power supply circuits with two-transformer substations from different rated capacities of shop transformers have been obtained for three variants: without redundancy; with redundancy; with double redundancy. The optimal condition is to use a smaller number of transformer substations (respectively, transformers) while maintaining the load factor of 0.8. When comparing the graphs, it has been found that the longest mean time between failures is achieved with double redundancy, and the shortest – with no redundancy. The research results can be recommended for use in the process of designing in-plant power supply systems to assess and improve the reliability and efficiency of equipment operation.

For citation

Petrova, R. M. et al. 2024. Assessment of reliability parameters of in-plant power supply schemes with two-transformer substations. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 521–533. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

Введение

Оценка надежности работы систем электроснабжения производится при проектировании, реконструкции и эксплуатации оборудования (Багаутдинов, 2017; Ivanova et al., 2022). Методы оценки надежности позволяют использовать достаточный минимум исходных данных и обеспечивать достоверные результаты (Садыков, 2017). Элементы систем электроснабжения восстанавливаются после отказа и отключаются при обслуживании и подготовке к ремонту (Петрова и др., 2023); параметры надежности элементов изменяются с течением времени.

Рост нагрузки потребителей и сложность систем электроснабжения (увеличение числа элементов схемы и функциональных взаимосвязей между ними) требуют разработки новых методов расчета надежности сложных многосвязанных систем (Зацепина и др., 2020; Shpigunovich et al., 2021). Расчеты параметров надежности схем низковольтных электрических сетей имеют свои особенности: низковольтное электрооборудование подвержено износу и может выходить из строя (Gasparyan et al., 2018). Так, работа (Абдуллазянов и др., 2023) посвящена анализу основных технико-экономических показателей надежности производств промышленных предприятий.

Одной из основных задач анализа надежности электроэнергетических систем относительно узлов нагрузки является разработка методов определения вероятностей появления отказа и безотказной работы системы (Gracheva et al., 2023; Шпиганович и др., 2018). С увеличением взаимосвязей между элементами расчетной схемы усложняется задача ее преобразования в схему с последовательно-параллельным или параллельно-последовательным соединением элементов (Конюхова и др., 2001; Конюхова, 2018а, 2018б). Например, для схем "мостик" (Шпиганович и др., 2024) и "двойной мостик" правила преобразования последовательно-параллельных или параллельно-последовательных схем надежности неприменимы. Для определения показателей надежности сложных систем используют расчетные элементы с учетом логики функционирования сети.

Целью данного исследования является оценка параметров надежности схемы системы внутриводского электроснабжения. Объектом исследования послужила система внутриводского электроснабжения Казанского завода медицинской аппаратуры. Научная новизна предлагаемой статьи – определение рационального резервирования для системы внутриводского электроснабжения.

Материалы и методы

Участок схемы цеховой сети внутриводского электроснабжения представлен на рис. 1, где указаны следующие исходные данные:

- кабельные линии 0,4 кВ: $L_1 = 10$ м, $L_2 = 10$ м, $L_3, \dots, L_{11} = 5$ м;
- силовые трансформаторы T_1, T_2 ;
- автоматические выключатели АВ₁, АВ₂, АВ₃-секционный, АВ₄, ..., АВ₁₅;
- рубильник Р;
- шкаф распределительный силовой ШРС;
- пункт распределительный силовой ПРС;
- магнитные пускатели ПМ₁, ..., ПМ₄;
- контакторы K_1, \dots, K_5 ;
- двигатели D_1, \dots, D_9 .

Минимально допустимый уровень надежности для коммутационных низковольтных аппаратов согласно ГОСТ 12434-83¹ равен $P_{\text{доп}} = 0,85$.

Предположим, что характеристики надежности элементов оборудования схемы (рис. 1) подчиняются показательному закону распределения (Грачева и др., 2018). Показательный закон распределения параметров надежности оборудования можно принять справедливым на небольшом интервале времени по сравнению с ресурсом долговечности отдельных компонентов системы, когда наблюдается старение материалов, но закончен период приработки.

Рассмотрим показатели надежности элементов схемы электроснабжения (рис. 1):

1) параметр потока отказов $\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t}$, определяемый вероятностью появления отказа

$Q(t, \Delta t)$ в интервале времени $(t, t + \Delta t)$. Если параметр потока отказов элементов $\omega(t)$ обладает ограниченным последствием (вероятность отказа элементов зависит только от продолжительности их работы с момента последнего отказа), то он совпадает с интенсивностью отказов $\lambda(t)$;

¹ ГОСТ 12434-83. Межгосударственный стандарт. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия. Введен 01.01.1985 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012546>.

- 2) вероятность безотказной работы $P = e^{-\omega}$, где ω – параметр потока отказов;
- 3) вероятность появления отказа $Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega}$;
- 4) время наработки на отказ $T_{нар.отк} = \frac{1}{\omega}$.

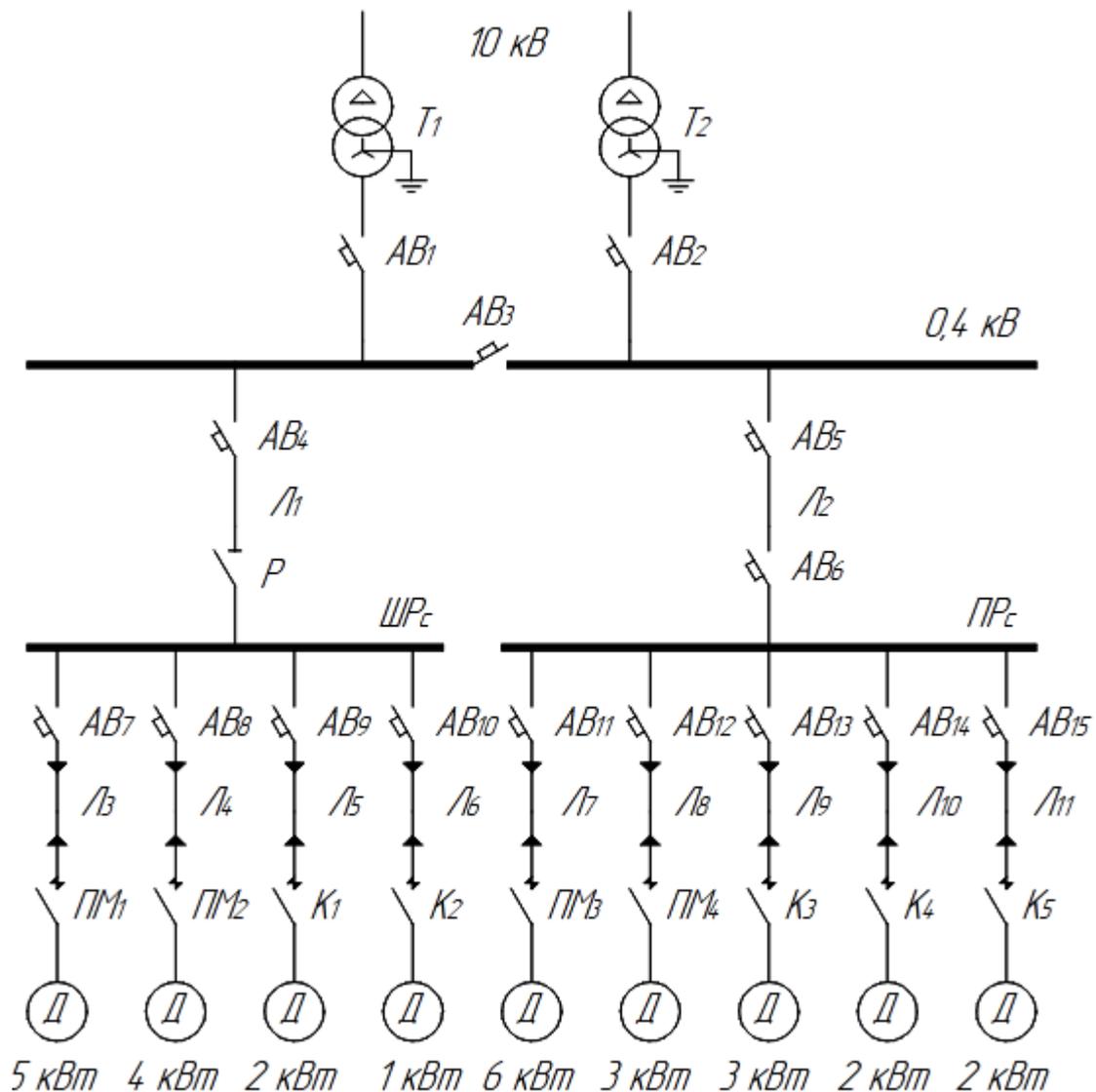


Рис. 1. Схема системы внутризаводского электроснабжения
 Fig. 1. Scheme of the in-plant power supply system

В ходе исследования проанализируем возможные виды электрической схемы, представленной на рис. 1:

- без резервирования;
- с резервированием (с секционным выключателем AB_3);
- с двойным резервированием (с секционным выключателем AB_3 и резервной перемычкой на 0,4 кВ).

Результаты и обсуждение

Логическая схема надежности для участка сети (рис. 1) без резервирования

Логическая схема надежности без резервирования показана на рис. 2. Все элементы, расположенные ниже ШРс, соединены последовательно, так как отказ одного элемента вызывает отказ всей системы. Система называется последовательной (системой с основным соединением элементов), если она работает

безотказно при условии исправности каждого элемента. Эффективность работы такой системы зависит от начального состояния системы и последовательности возникновения отказов элементов (узлов).

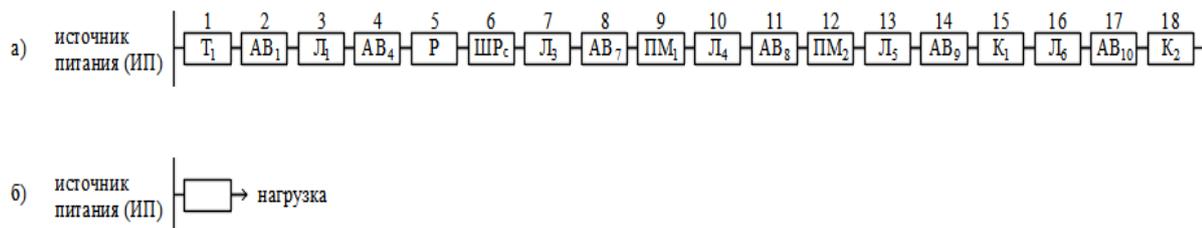


Рис. 2. Логическая схема надежности без резервирования (а) и ее преобразование (б)
Fig. 2. Logical scheme of reliability without redundancy (a) and its transformation (b)

Параметр потока отказов для цепи ИП-нагрузка схемы без резервирования $\omega_{\text{без рез}}$ определим так:

$$\omega_{\text{без рез}} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 + \omega_8 + \omega_9 + \omega_{10} + \omega_{11} + \omega_{12} + \omega_{13} + \omega_{14} + \omega_{15} + \omega_{16} + \omega_{17} + \omega_{18} =$$

$$= \omega_{T1} + \omega_{AB1} + \omega_{L1} + \omega_{AB4} + \omega_P + \omega_{ШРс} + \omega_{Л3} + \omega_{AB7} + \omega_{ПМ1} + \omega_{Л4} + \omega_{AB8} + \omega_{ПМ2} + \omega_{Л5} + \omega_{AB9} + \omega_{K1} +$$

$$+ \omega_{L6} + \omega_{AB10} + \omega_{K2} = \omega_T + 6\omega_{AB} + 5\omega_L + \omega_P + \omega_{ШРс} + 2\omega_{ПМ} + 2\omega_K,$$

где ω_T – параметр потока отказов трансформатора; ω_{AB} – параметр потока отказов автоматического выключателя; ω_L – параметр потока отказов кабельной линии; ω_P – параметр потока отказов рубильника; $\omega_{ШРс}$ – параметр потока отказов шкафа распределительного силового; $\omega_{ПМ}$ – параметр потока отказов магнитного пускателя; ω_K – параметр потока отказов контактора.

Параметр потока отказов кабельной линии ω_L (АВВГ-0,4 кВ) зависит от длины и рассчитывается с учетом данных на 100 м:

- для L_1, L_2 : $\omega = 0,026 \cdot (10 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0026$ откл./год;
- для L_3, \dots, L_{11} : $\omega = 0,026 \cdot (5 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0013$ откл./год.

В табл. 1 приведены технические данные исследуемого оборудования, а также расчетные значения параметров потока отказа элементов схемы.

Таблица 1. Исходные данные оборудования и результаты расчета параметров потоков отказов для элементов схемы
Table 1. Initial equipment data and results of calculating failure flow parameters for circuit elements

Элементы схемы	Марка, производитель ²	Параметр потока отказов ω , откл./год
T_1, T_2	ТМ-1600/10/0,4; "Элтехком", г. Нижний Новгород	0,015
$AB_1, AB_2, AB_3, AB_4, AB_5, AB_6$	ВА51-39; Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), г. Курск	0,051
$AB_7, AB_8, AB_9, AB_{10}, AB_{11}, AB_{12}, AB_{13}, AB_{14}, AB_{15}$	ВА51-35, КЭАЗ	0,051
P	РЕ19-37, КЭАЗ	0,038
$ШРс$	ШРС-1; "Абсолютэнерго", г. Пермь	0,001
$ПРс$	ПР-11; "Абсолютэнерго"	0,001
L_1, L_2	АВВГ-0,4 кВ; сечение $S = 16 \text{ мм}^2$; длина 10 м; "Эксперт-кабель"; гг. Орел, Москва, Екатеринбург	0,026
$L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}$	АВВГ-0,4 кВ; сечение $S = 4 \text{ мм}^2$; длина 5 м; "Эксперт-кабель"	0,0013
$ПМ_1, ПМ_2, ПМ_3, ПМ_4$	ПМЛ-1100; КЭАЗ	0,095
K_1, K_2, K_3, K_4	КТ-6000; КЭАЗ	0,098

Таким образом, параметр потока отказов для цепи ИП-нагрузка схемы без резервирования рассчитаем следующим образом:

$$\omega_{\text{без рез}} = 0,015 + 6 \cdot 0,051 + (0,0026 + 4 \cdot 0,0013) + 0,038 + 0,001 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,7538.$$

² См.: Каталог продукции компании "Элтехком". URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/>; Каталог электротехнической продукции КЭАЗ. URL: <https://keaz.ru/catalog>; Каталог электротехнической продукции ООО "Абсолютэнерго". URL: <https://absolutnrg.ru/catalog/elektrichit/nickovol.html>; Каталог кабельно-проводниковой продукции "Эксперт-кабель". URL: <https://expert-cable.ru/catalog/>.

*Логическая схема с резервированием
 (с секционным выключателем АВ₃)*

Резервированием называется метод повышения надежности, при котором отказавшее изделие заменяется заранее предусмотренным запасным изделием. В зависимости от того, какая часть системы при отказе отключается и заменяется резервной, различают поэлементное, групповое и общее резервирование. Число основных изделий, резервирующих рассматриваемое основное изделие, определяет кратность резервирования. Рассмотрим общее резервирование в условиях облегченного резерва, когда запасные элементы в период ожидания несут частичную нагрузку и могут отказаться с меньшей вероятностью, чем вероятность отказа основного элемента.

Для электрической схемы питания первой секции шин с установленным секционным выключателем АВ₃ логическая схема надежности имеет две последовательные рабочие цепи, соединенные параллельно (рис. 3).

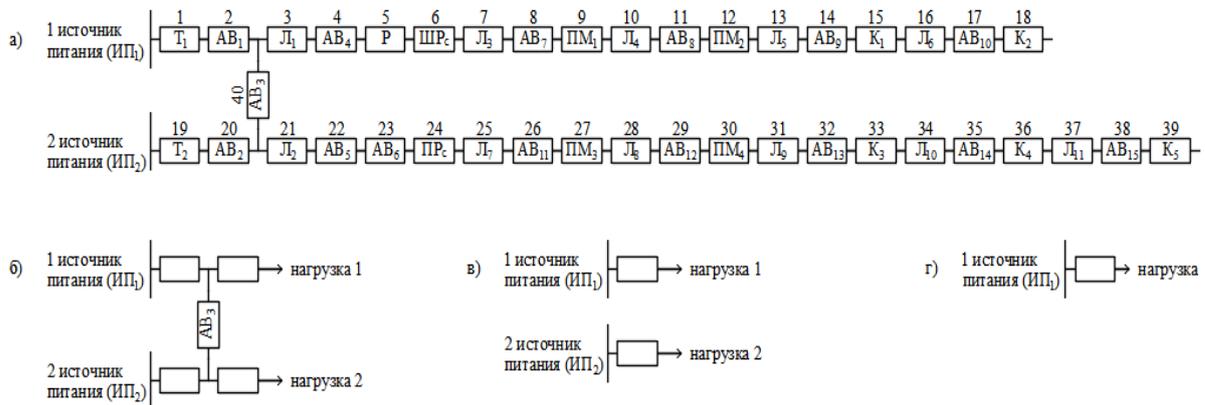


Рис. 3. Логическая схема надежности для системы внутризаводского электроснабжения с резервированием (а); первый (б), второй (в) и третий (г) этапы преобразования
 Fig. 3. Reliability logic diagram for the in-plant power supply system with redundancy (а), conversion stages: first (б), second (в), and third (г)

Первый этап преобразования включает преобразование последовательных ветвей. Параметр потока отказов цепи ИП₁-АВ₃

$$\omega_{ИП_1-АВ_3} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_{40} = \omega_{Т_1} + \omega_{АВ_1} + \omega_{АВ} = 0,015 + 0,051 + 0,051 = 0,117.$$

Параметр потока отказов цепи ИП₂-АВ₃

$$\omega_{ИП_2-АВ_3} = \omega_{19} + \omega_{20} = \omega_{Т_2} + \omega_{АВ_2} = 0,015 + 0,051 = 0,066.$$

Параметр потока отказов цепи АВ₃-нагрузка 1

$$\begin{aligned} \omega_{АВ_3-нагр_1} &= \omega_3 + \dots + \omega_{18} = \omega_{Л_1} + \omega_{АВ_4} + \omega_P + \omega_{ШР_с} + \omega_{Л_3} + \omega_{АВ_7} + \omega_{ПМ_1} + \\ &+ \omega_{Л_4} + \omega_{АВ_8} + \omega_{ПМ_2} + \omega_{Л_5} + \omega_{АВ_9} + \omega_{К_1} + \omega_{Л_6} + \omega_{АВ_{10}} + \omega_{К_2} = 5\omega_{АВ} + 5\omega_{Л} + \omega_P + \omega_{ШР_с} + 2\omega_{ПМ} + 2\omega_{К} = \\ &= 5 \cdot 0,051 + (0,0026 + 4 \cdot 0,0013) + 0,038 + 0,001 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,6878. \end{aligned}$$

Параметр потока отказов цепи АВ₃-нагрузка 2

$$\omega_{АВ_3-нагр_2} = \omega_{21} + \dots + \omega_{39} = 0,8511.$$

Второй этап преобразования включает расчет параметров потока отказов:

– цепи ИП₁-нагрузка 1

$$\omega_{ИП_1-нагр_1} = \omega_{ИП_1-АВ_3} + \omega_{АВ_3-нагр_1} = 0,117 + 0,6878 = 0,8048;$$

– цепи ИП₂-нагрузка 2

$$\omega_{ИП_2-нагр_2} = \omega_{ИП_2-АВ_3} + \omega_{АВ_3-нагр_2} = 0,066 + 0,8511 = 0,9171.$$

На третьем этапе преобразования требуется рассчитать вероятности появления отказа последовательных ветвей.

Вероятности безотказной работы цепей:

$$P_{ИП_1-нагр_1} = e^{-0,8048} = 0,4472, \quad P_{ИП_2-нагр_2} = e^{-0,9171} = 0,3997.$$

Вероятности появления отказа цепей:

$$Q_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} = 1 - e^{-0,8048} = 0,5528, \quad Q_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = 1 - e^{-0,9171} = 0,6003.$$

Третий этап включает преобразование параллельных ветвей ИП₁-нагрузка 1 и ИП₂-нагрузка 2.

Вероятность появления отказа схемы (для системы из двух параллельно соединенных элементов)

$$Q_{\text{схемы}} = Q_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} \cdot Q_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = 0,5528 \cdot 0,6003 = 0,3318.$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P_{\text{схемы}} = 1 - Q_{\text{схемы}} = 1 - 0,3318 = 0,6682.$$

Параметр потока отказов для системы из двух параллельно соединенных элементов определим с учетом вероятности безотказной работы схемы $P_{\text{схемы}}$:

$$\omega_{\text{схемы}} = -\ln(P_{\text{схемы}}) = -\ln(0,6682) = 0,4032.$$

Логическая схема с двойным резервированием

(с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ)

Логическая схема надежности с двойным резервированием приведена на рис. 4.

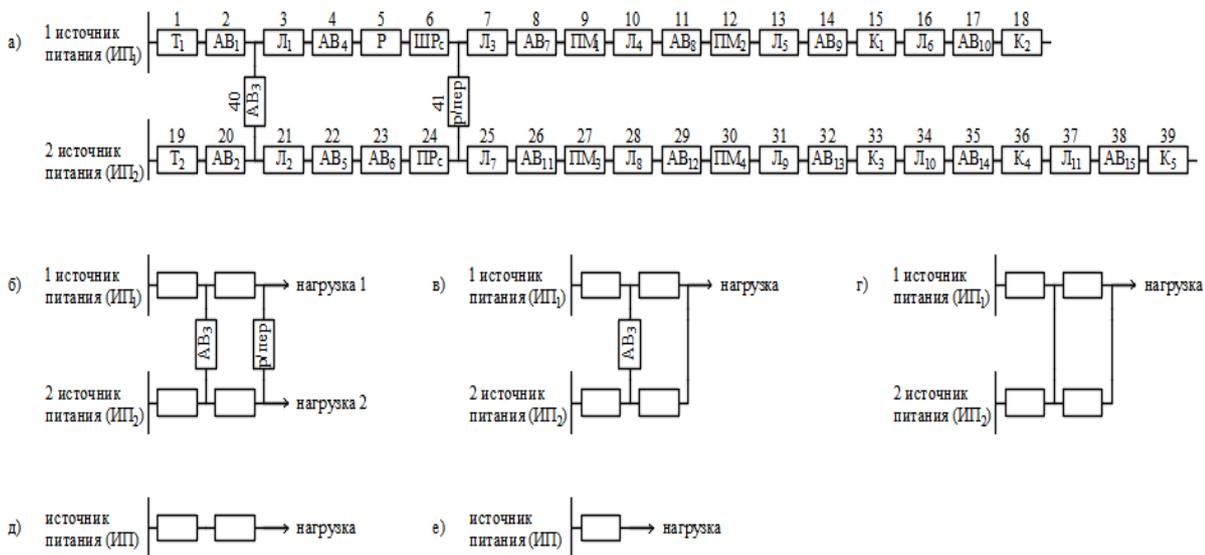


Рис. 4. Логическая схема надежности для системы внутриводского электроснабжения с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ) (а), первый (б), второй (в), третий (г), четвертый (д) и пятый (е) этапы преобразования
 Fig. 4. Reliability logic diagram for the in-plant power supply system with double redundancy: with sectional circuit breaker АВ₃ and 0.4 kV backup jumper (а), conversion stages: first (б), second (в), third (г), fourth (д), and fifth (е)

Первый этап преобразования заключается в упрощении всех последовательных ветвей исходной схемы (рис. 4, а):

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ИП}_1\text{-АВ}_3} &= \omega_1 + \omega_2, & \omega_{\text{ИП}_2\text{-АВ}_3} &= \omega_{19} + \omega_{20} + \omega_{40}, \\ \omega_{\text{Л}_1\text{-ШПР}_c} &= \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6, & \omega_{\text{Л}_2\text{-ШПР}_c} &= \omega_{21} + \omega_{22} + \omega_{23} + \omega_{24} + \omega_{\text{р/пер}}, \\ \omega_{\text{р/пер-нагр}_1} &= \omega_7 + \omega_8 + \dots + \omega_{18}, & \omega_{\text{р/пер-нагр}_2} &= \omega_{25} + \omega_{26} + \dots + \omega_{39}. \end{aligned}$$

Далее рассчитывается вероятность безотказной работы P и вероятность появления отказа Q для последовательных цепей:

$$P_{\text{ИП}_1\text{-АВ}_3} = e^{-\omega_{\text{ИП}_1\text{-АВ}_3}}, \quad P_{\text{ИП}_2\text{-АВ}_3} = e^{-\omega_{\text{ИП}_2\text{-АВ}_3}}.$$

Тогда вероятность отказа

$$Q_{\text{ИП}_1\text{-АВ}_3} = 1 - e^{-\omega_{\text{ИП}_1\text{-АВ}_3}}, \quad Q_{\text{ИП}_2\text{-АВ}_3} = 1 - e^{-\omega_{\text{ИП}_2\text{-АВ}_3}}.$$

Вероятность одновременного отказа параллельных элементов ИП₁-АВ₃ и ИП₂-АВ₃ (рис. 4, з), обозначим Q^* и определим как произведение вероятностей отказа этих элементов:

$$Q^* = Q_{ИП_1-АВ_3} \cdot Q_{ИП_2-АВ_3}.$$

Вероятность безотказной работы параллельных элементов ИП₁-АВ₃ и ИП₂-АВ₃

$$P^* = 1 - Q_{ИП_1-АВ_3} \cdot Q_{ИП_2-АВ_3}.$$

Тогда параметр потока отказов

$$\omega^* = -\ln(P^*).$$

Аналогичный расчет производится для параллельной ветви Л₁-ШРс и Л₂-ПРс.

После преобразования последовательных элементов схемы (рис. 4, д, е) параметр потока отказов схемы

$$\omega_{схемы} = 0,238.$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов схем по вариантам для двухтрансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (рис. 1).

Таблица 2. Результаты расчета вариантов схемы электроснабжения
Table 2. Calculation results of power supply scheme options

Вариант схемы электроснабжения	Параметр потока отказов $\omega_{схемы}$, откл./год	Время наработки на отказ $T_{нар.отк}$
Без резервирования	0,7538	1,3266
С резервированием (с секционными выключателями АВ ₃)	0,4032	2,4802
С двойным резервированием (с секционными выключателями АВ ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ)	0,238	4,2017

Данные табл. 2 показывают, что параметр потока отказов без резервирования имеет наибольшее значение ($\omega_{схемы} = 0,7538$) и уменьшается при резервировании, т. е. при включении секционного выключателя ($\omega_{схемы} = 0,4032$). При двойном резервировании $\omega_{схемы} = 0,238$, что свидетельствует о высокой надежности схемы с двойным резервированием при одинаковом количестве присоединений элементов к линии.

Величина времени наработки на отказ $T_{нар.отк}$ обратно пропорциональна параметру потока отказов схемы $\omega_{схемы}$. Время наработки на отказ имеет максимальное значение при двойном резервировании схемы ($T_{нар.отк} = 4,2017$) и минимальное – без резервирования ($T_{нар.отк} = 1,3266$). Данные расчетов показывают, что надежность схемы без резервирования в 1,87 раза ниже в сравнении со схемой с резервированием и в 3,17 раза ниже – схемой с двойным резервированием.

Далее исследуем параметры надежности системы при изменении числа двухтрансформаторных подстанций (ТП) ($N_{ТП}$) от 1 до 5, а также при различной мощности цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА).

Используем исходные данные для расчетов:

- расчетная активная мощность нагрузки $P_T = 12 \cdot 10^6$ Вт;
- $\cos \varphi_{нагр} = 0,92$;
- общая площадь завода $S_{зав} = 0,5$ км²;
- коэффициент загрузки трансформаторов $K_{загр} = 0,8$.

Число трансформаторов

$$N_T = \frac{P_T}{\cos \varphi_T K_{загр} S_T} = \frac{S_{норм. полн. Т}}{K_{загр} S_T},$$

где S_T – единичная номинальная мощность цехового трансформатора, изменяемая от 25 до 2 500 кВА; $K_{загр}$ – коэффициент загрузки трансформатора; $S_{норм. полн. Т}$ – нормируемая полная мощность нагрузки трансформатора, ВА, равная

$$S_{норм. полн. Т} = \frac{P_T}{\cos \varphi_T}.$$

Число двухтрансформаторных подстанций

$$N_{ТП} = \frac{N_T}{2} = \frac{S_{норм. полн. Т}}{2K_{загр} S_T}.$$

На рис. 5 приведены варианты схем системы внутриводского электроснабжения с изменением числа двухтрансформаторных подстанций ($N_{ТП}$ составляет 1–5).

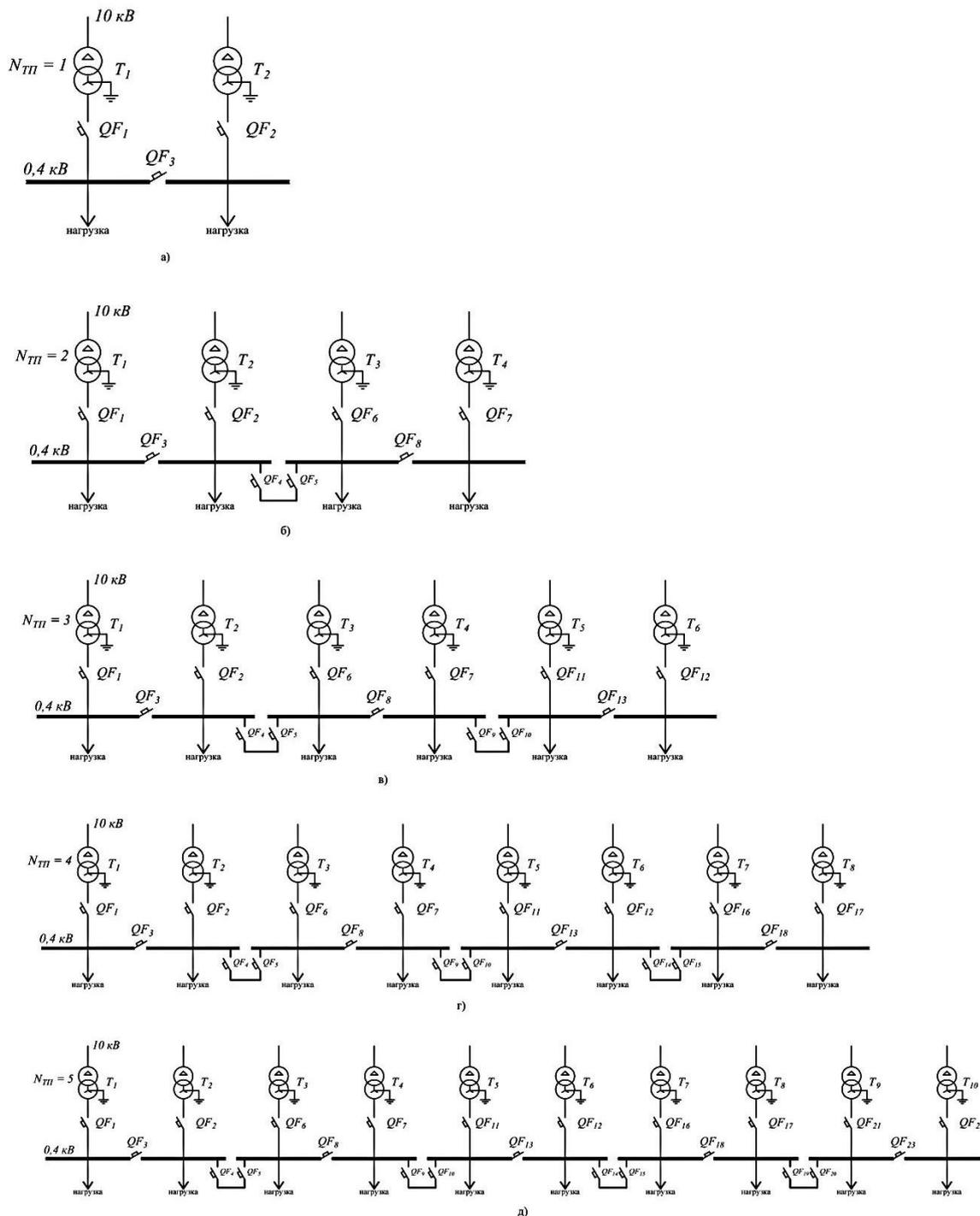


Рис. 5. Электрическая схема системы внутриводского электроснабжения с одной (а), двумя (б), тремя (в), четырьмя (г), пятью (д) двухтрансформаторными подстанциями
 Fig. 5. Electrical scheme of the in-plant power supply system with different number of two-transformer substations: one (a), two (b), three (в), four (г), and five (д)

Расчетное число присоединений трансформатора на 1 секцию шин ($N_{пр.т}$) с учетом остальных присоединений равно

$$N_{пр.т} = N_{ост} + \frac{S_{норм. полн. т}}{n_{сш} N_{ТП} K_{загр} S_T},$$

где $N_{ост}$ – остальные присоединения, принимаем $N_{ост} = 1$; число секций шин $n_{сш} = N_T = 2, 4, 6, 8, 10$ и т. д.

Суммарный параметр потока отказов трансформаторов $\Sigma\omega_T$, откл./год:

$$\Sigma\omega_T = N_{\text{пр.т}} \omega_T,$$

где ω_T – параметр потока отказов трансформатора, равный 0,015 откл./год.

Электрическая схема двухтрансформаторной подстанции с условным обозначением кабельных линий $L_{\text{кл1}}$ и $L_{\text{кл2}}$ приведена на рис. 6.

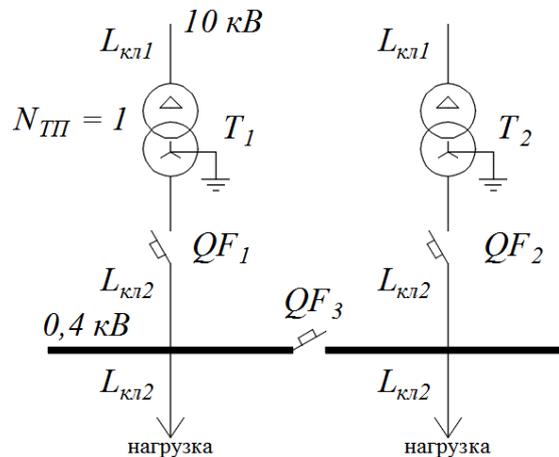


Рис. 6. Электрическая схема двухтрансформаторной подстанции с условным обозначением кабельных линий $L_{\text{кл1}}$ и $L_{\text{кл2}}$

Fig. 6. Electrical diagram of a two-transformer substation with the conventional designation of cable lines $L_{\text{кл1}}$ and $L_{\text{кл2}}$

Средняя длина кабельных линий, км, (от источника питания ИП до трансформатора 10/0,4 кВ)

$$L_{\text{кл1}} = \gamma_{\text{ИП}} \sqrt{N_{\text{ИП}} S_{\text{зав}}},$$

где $\gamma_{\text{ИП}}$ – коэффициент, учитывающий расположение ИП и ТП, $\gamma_{\text{ИП}} = 1$.

Средняя длина питающих кабельных линий, км, (от трансформатора 10/0,4 кВ до потребителя)

$$L_{\text{кл2}} = \gamma_{\text{ТП}} \frac{\sqrt{S_{\text{зав}}}}{\sqrt{N_{\text{ТП}}}},$$

где $\gamma_{\text{ТП}}$ – коэффициент, учитывающий расположение ТП, $\gamma_{\text{ТП}} = 1$.

Суммарный параметр потока отказов кабельных линий $\Sigma\omega_{\text{кл}}$, откл./год:

$$\Sigma\omega_{\text{кл}} = \omega_{\text{кл1}} + \omega_{\text{кл2}} = 0,01L_{\text{кл1}} + 0,026L_{\text{кл2}},$$

где 0,01 откл./год – параметр потока отказов кабельных линий от ИП до трансформатора; 0,026 откл./год – параметр потока отказов кабельных линий от трансформатора до потребителя.

Приведем пример расчета двухтрансформаторной подстанции $N_{\text{ТП}} = 1$, $S_T = 100$ кВА:

$$S_{\text{норм. полн. т}} = \frac{P_T}{\cos \varphi_T} = \frac{12 \cdot 10^6}{0,92} = 13,1 \cdot 10^6 \text{ ВА},$$

$$N_{\text{пр.т}} = N_{\text{ост}} + \frac{S_{\text{норм. полн. т}}}{n_{\text{сш}} N_{\text{ТП}} K_{\text{загр}} S_T} = 1 + \frac{13,1 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 100 \cdot 10^3} = 82,875,$$

$$\Sigma\omega_T = N_{\text{пр.т}} \omega_T = 82,875 \cdot 0,015 = 1,24 \text{ откл./год},$$

$$L_{\text{кл1}} = \gamma_{\text{ИП}} \sqrt{N_{\text{ИП}} S_{\text{зав}}} = 1 \cdot \sqrt{0,5 \cdot 1} = 0,707 \text{ км},$$

$$L_{\text{кл2}} = \gamma_{\text{ТП}} \frac{\sqrt{S_{\text{зав}}}}{\sqrt{N_{\text{ТП}}}} = 1 \cdot \frac{\sqrt{0,5}}{\sqrt{1}} = 0,707 \text{ км},$$

$$\Sigma\omega_{\text{кл}} = \omega_{\text{кл1}} + \omega_{\text{кл2}} = 0,01L_{\text{кл1}} + 0,026L_{\text{кл2}} = 0,01 \cdot 0,707 + 0,026 \cdot 0,707 = 0,025 \text{ откл./год}.$$

Далее рассчитывается $\omega_{\text{схемы}}$ с учетом всех элементов схемы:

– без резервирования: $\omega_{\text{схемы}} = 0,9764$; $T_{\text{нар. отк}} = 1,0242$;

– с резервированием (с секционным выключателем АВ₃): $\omega_{\text{схемы}} = 0,6017$; $T_{\text{нар. отк}} = 1,6620$;

– с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ):

$$\omega_{\text{схемы}} = 0,4665; T_{\text{нар. отк}} = 2,1437.$$

На рис. 7–9 приведены графические зависимости времени наработки на отказ $T_{нар.отк}$ схем с числом двухтрансформаторных подстанций от 1 до 5 и различной номинальной мощностью цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА).

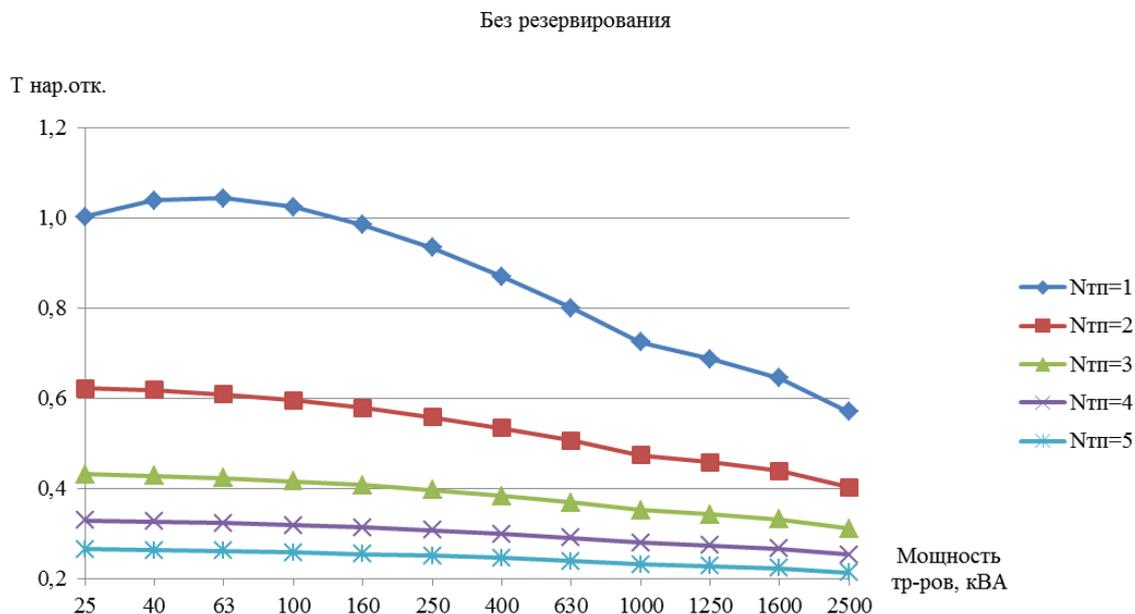


Рис. 7. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы без резервирования от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
 Fig. 7. Graphic dependences of the time between failures of a circuit without redundancy on the rated power of shop transformers at different number of substations

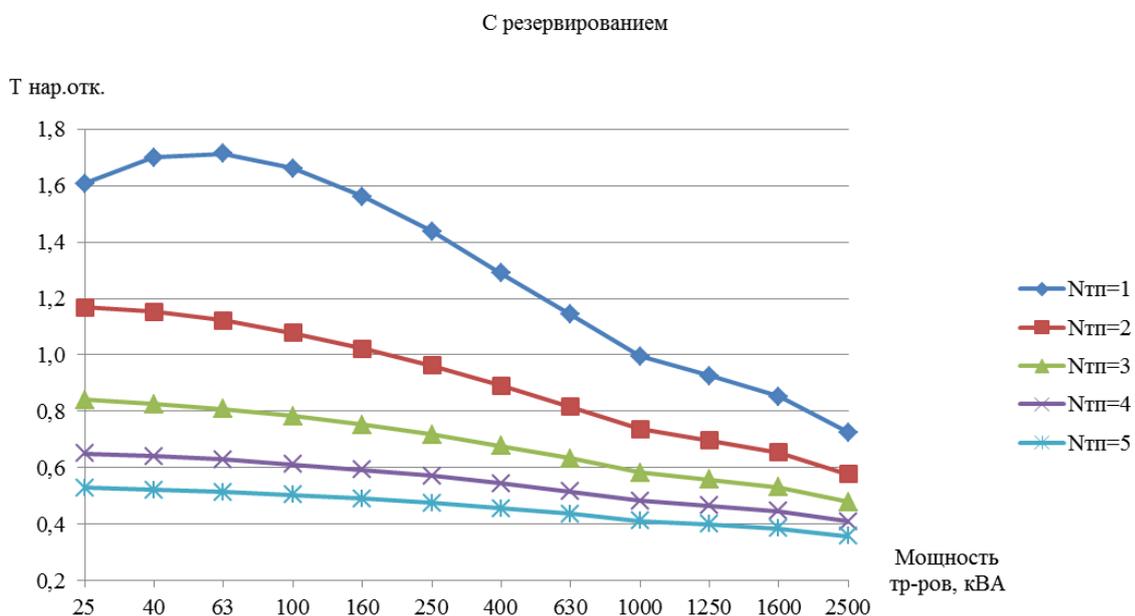


Рис. 8. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы с резервированием (с секционным выключателем АВ₃) от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
 Fig. 8. Graphic dependences of the time between failures of a circuit with redundancy (with sectional switch АВ₃) on the rated power of shop transformers at different number of substations

Графики рис. 7–9 показывают, что оптимальное значение номинальной мощности трансформаторов $S_{т. опт}$ уменьшается при увеличении числа трансформаторных подстанций $N_{ТП}$; оптимальное значение мощности трансформаторов достигается при большем времени наработки на отказ.

С двойным резервированием

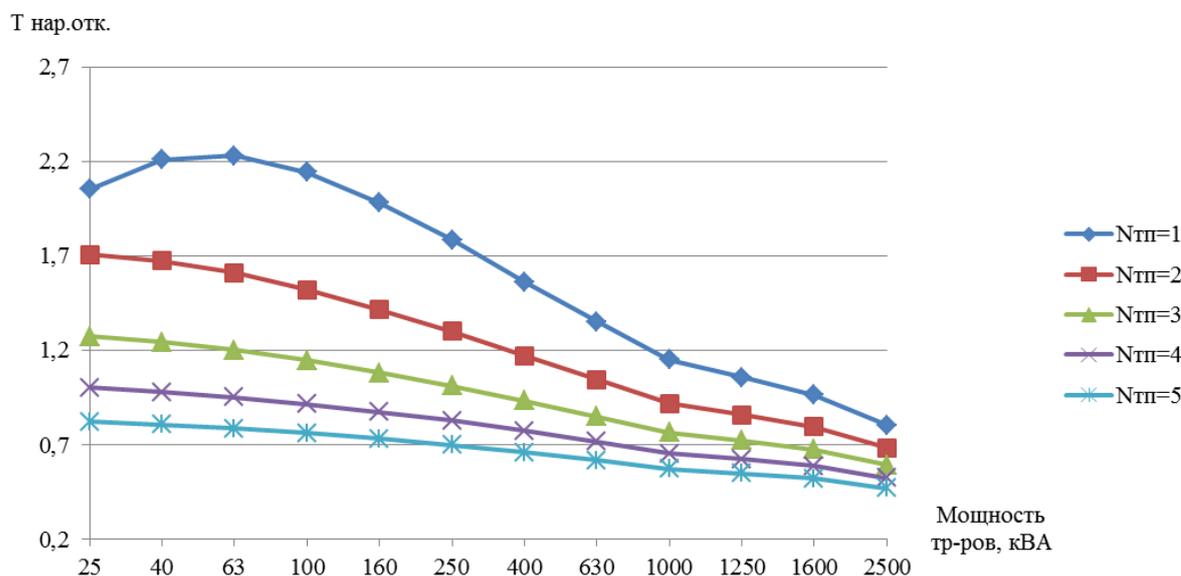


Рис. 9. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ) от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
Fig. 9. Graphical dependencies of the mean time between failures of a dual redundancy scheme (with sectional circuit breaker АВ₃ and redundant jumper at 0.4 kV) on the rated capacity of shop transformers at different number of substations

Также оптимальным условием является использование меньшего числа трансформаторных подстанций $N_{ТП}$ и, соответственно, трансформаторов при соблюдении значения коэффициента загрузки ($K_{загр} = 0,8$). Например, при использовании 2 трансформаторов мощностью 1 600 кВА время наработки на отказ будет больше ($T_{нар.отк} = 0,6456$), чем при использовании 4 трансформаторов такой же мощности ($T_{нар.отк} = 0,4390$).

При сравнении графиков, изображенных на рис. 7–9, установлено, что наибольшее время наработки на отказ достигается при двойном резервировании ($T_{нар.отк} = 2,2301$), наименьшее – при отсутствии резервирования ($T_{нар.отк} = 0,5709$).

Заключение

При исследовании надежности системы внутривозовского электроснабжения необходимо проанализировать дефекты и механизмы отказов, исключить известные причины отказов, определить зависимости параметров надежности от интенсивности внешних воздействий.

Резервирование целесообразно использовать для увеличения параметра вероятности безотказной работы схемы с течением времени, значительно меньшего, чем величина средней наработки на отказ резервного оборудования. Параметр потока отказов схемы с резервированием (с секционным выключателем АВ₃) больше ($\omega_{схемы} = 0,4032$), чем параметр потока отказов с двойным резервированием (с секционным выключателем и резервной перемычкой на 0,4 кВ) ($\omega_{схемы} = 0,238$) при одинаковом количестве присоединений элементов к линии. Установлено, что надежность схемы с резервированием значительно выше в сравнении со схемой без резервирования при одинаковой нагрузке (параметр потока отказов схемы без резервирования $\omega_{без рез} = 0,7538$). Время наработки на отказ имеет максимальное значение при оптимальном значении номинальной мощности трансформаторов $S_{т. опт}$ в схеме с двойным резервированием.

Результаты исследований могут быть рекомендованы к использованию при проектировании систем внутривозовского электроснабжения для оценки и повышения надежности эксплуатации оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Ибатуллин Э. Э., Петрова Р. М. [и др.]. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 2(58). С. 93–108. EDN: HEHNXC.
- Багаутдинов И. З. Расчет надежности // Теория и практика современной науки. 2017. № 4(22). С. 96–99. EDN: YURTFT.
- Грачева Е. И., Наумов О. В., Шакурова З. М. Информационные параметрические характеристики надежности низковольтных коммутационных аппаратов промышленных комплексов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3(39). EDN: QUERVT.
- Зацепина В. И., Астанин С. С. Анализ надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости релейной защиты // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD.
- Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М. : НТФ "Энергопрогресс", 2001. 92 с. (Библиотека электротехника – прил. к журналу "Энергетик" ; вып. 12(36)).
- Конюхова Е. А. Исследование и анализ надежности схем при сравнении вариантов систем промышленного электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018а. № 4(40). С. 66–76. EDN: FQSCHV.
- Конюхова Е. А. Оценка показателей надежности схем при выполнении ТЭО варианта электроснабжения объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018б. № 3(39). С. 34–44. EDN: ELIKRG.
- Петрова Р. М., Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Valtchev S. [и др.]. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1(57). С. 93–105. EDN: CWPQDQ.
- Садыков Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 5–6. С. 98–108. EDN: ZIXFIF.
- Шпиганович А. Н., Зацепин Е. П. Оценка отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 29–35. EDN: VQUCCS.
- Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Петрова Р. М., Грачева Е. И. Исследование отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16, № 2(62). С. 94–105. EDN: NOVSTK.
- Gasparyan A. A., Komarova G. V. Reliability assessment of a technical equipment complex of a monitoring system of parameters for electrical equipment taking into account reserve elements // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, 2018. P. 632–635. DOI: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2018.8317176>.
- Gracheva E., Petrova R. M., Valtchev S., Sinyukova T. Study of probability characteristics of the reliability of electrical equipment in internal power supply systems // 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023. P. 460–465. DOI: <https://doi.org/10.1109/gpecom58364.2023.101758211>.
- Ivanova S. P., Pestryaev D. A., Myasnikova T. V., Sveklova O. V. Reliability assessment of switching process control equipment // 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe53907.2022.9731393>.
- Shpiganovich A., Shpiganovich A., Boychevskiy A. Assessment of reliability of individual units electrical equipment by characteristics power supply systems // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 2021. P. 1088–1090. DOI: <https://doi.org/10.1109/summa53307.2021.9632126>.

References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Ibatullin, E. E., Petrova, P. M. et al. 2023. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 15(2(58)), pp. 93–108. EDN: HEHNXC. (In Russ.)
- Bagautdinov, I. Z. 2017. Reliability calculation. *Teoriya i Praktika Sovremennoi Nauki*, 4(22), pp. 96–99. EDN: YURTFT. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Shakurova, Z. M. 2018. Information parametrical characteristics of reliability of low-voltage commutation apparatuses of industrial complexes. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 3(39). EDN: QUERVT. (In Russ.)
- Zatsepina, V. I., Astanin, S. S. 2020. Reliability analysis of the electrical power supply system with taking into account the fail-safety of the relay protection. *Transactions TSTU*, 4, pp. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A., Kireeva, E. A. 2001. Reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)

- Konyukhova, E. A. 2018a. Research and analysis of the reliability of schemes when comparing options of industrial electrical supply systems with double-transformator substations. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 4(40), pp. 66–76. EDN: FQSCHV. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A. 2018b. Evaluation of reliability assessments of circuits in the feasibility study of the variant of electric power supply of objects. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 3(39), pp. 34–44. EDN: ELIKRG. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Valtchev, S. et al. 2023. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 15(1(57)), pp. 93–105. EDN: CWPQDQ. (In Russ.)
- Sadykov, R. R. 2017. Reliability assessment of low-voltage shop networks of industrial power supply. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(5–6), pp. 98–108. EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Zatsepin, E. P. 2018. Estimation of the fault tolerance of the power supply systems of the industrial enterprises. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 12, pp. 29–35. EDN: VQUCCS. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Shpiganovich, A. A., Petrova, R. M., Gracheva, E. I. 2024. Study of fault tolerance of power supply systems of industrial enterprises. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 16(2(62)), pp. 94–105. EDN: NOVSTK. (In Russ.)
- Gasparyan, A. A., Komarova, G. V. 2018. Reliability assessment of a technical equipment complex of a monitoring system of parameters for electrical equipment taking into account reserve elements. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, pp. 632–635. DOI: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2018.8317176>.
- Gracheva, E., Petrova, R. M., Valtchev, S., Sinyukova, T. 2023. Study of probability characteristics of the reliability of electrical equipment in internal power supply systems. 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, pp. 460–465. DOI: <https://doi.org/10.1109/gpecom58364.2023.101758211>.
- Ivanova, S. P., Pestryaev, D. A., Myasnikova, T. V., Sveklova, O. V. 2022. Reliability assessment of switching process control equipment. 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe53907.2022.9731393>.
- Shpiganovich, A., Shpiganovich, A., Boychevskiy, A. 2021. Assessment of reliability of individual units electrical equipment by characteristics power supply systems. 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, pp. 1088–1090. DOI: <https://doi.org/10.1109/summa53307.2021.9632126>.

Сведения об авторах

Петрова Рената Маратовна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Renata M. Petrova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Postgraduate Student;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Грачева Елена Ивановна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: gracheva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Elena I. Gracheva – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: gracheva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

УДК 629.12; 629.12.066

Применение на судах электроэнергетических систем с распределенной шиной постоянного тока

А. С. Бежик, А. К. Лебедев, В. В. Романовский*, А. Б. Власов

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия;

e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-2446>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
14.10.2024;

получена
после доработки
18.11.2024;

принята
к публикации
18.11.2024

Ключевые слова:

гребная электрическая
установка,
Azipod,
техническое
обслуживание,
поиск неисправностей,
методы испытаний

Эксплуатация судов при плавании по Северному морскому пути сопряжена с многочисленными рисками, определяющими повышенные требования к надежности гребной установки. В связи с этим актуально использование судовых электрических сетей, базирующихся на распределении электроэнергии постоянного тока (ПТ), работа которых дает ряд преимуществ в сравнении с системами распределения переменного тока. Проведение технического контроля импортного судового оборудования ввиду недостатка информации, получаемой от зарубежных производителей, является актуальной потребностью. На примере гребной электрической установки с оборудованием типа Azipod описаны способы оценки технического состояния гребного электрического двигателя, защиты вала от паразитных напряжений и токов, способных ускорить разрушение подшипников. Рассмотрены способы поиска неисправностей полупроводниковых элементов, входящих в состав преобразователя частоты. Представлены вероятные ошибки в работе системы контроля положения гондолы. Определены возможности дистанционной оценки технического состояния системы. Цель работы – разработка этапов технического контроля и оценка полученных параметров для выработки экспертных решений об эксплуатационной надежности и перспективах дальнейшей работы оборудования и элементов в системах гребных электрических установок типа Azipod, актуальных на многочисленных судах.

Для цитирования

Бежик А. С. и др. Применение на судах электроэнергетических систем с распределенной шиной постоянного тока. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 534–546. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-534-546>.

Application of DC distributed bus bar power systems on ships

Artem S. Bezhik, Alexander K. Lebedev, Viktor V. Romanovsky*, Anatoly B. Vlasov

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia;

e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-2446>

Article info

Received
14.10.2024;

received
in revised form
18.11.2024;

accepted
18.11.2024

Key words:

electric propulsion
system,
Azipod,
maintenance,
troubleshooting,
test methods

Abstract

Operation of vessels sailing along the Northern Sea Route is associated with numerous risks that determine increased requirements for the reliability of the propulsion system. In this regard, it is important to use ship electrical networks based on the distribution of direct current (DC) electricity, the operation of which provides a number of advantages in comparison with AC distribution systems. Conducting technical control of imported ship equipment due to the lack of information received from foreign manufacturers is an urgent need. Using the example of a propulsion electric plant with Azipod-type equipment, methods for assessing the technical condition of the propulsion electric motor, protecting the shaft from parasitic voltages and currents that can accelerate the destruction of bearings have been described. Methods for troubleshooting semiconductor elements included in the frequency converter have been considered. Probable errors in the operation of the nacelle position monitoring system have been presented. The possibilities of remote assessment of the technical condition of the system have been determined. The aim of the work is to develop stages of technical control and evaluation of the obtained parameters for the development of expert decisions on the operational reliability and prospects for further operation of equipment and elements in Azipod-type propulsion electric systems relevant on numerous vessels.

For citation

Bezhik, A. S. et al. 2024. Application of DC distributed bus bar power systems on ships. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 534–546. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-534-546>.

Введение

Эксплуатация судов при плавании по Северному морскому пути сопряжена с многочисленными рисками, определяющими повышенные требования к надежности гребной установки (Баранов и др., 2015; Романовский и др., 2013; 2019). В связи с этим актуально использование электрических сетей, базирующихся на распределении электроэнергии постоянного тока (ПТ), работа которых дает ряд преимуществ в сравнении с системами распределения переменного тока.

Электрическая шина постоянного тока (ШПТ) применяется для распределения электроэнергии, которая была предварительно преобразована на выходе первоначального источника. Выполняться это может либо напрямую в системе питания, либо через специальный двунаправленный преобразователь, который корректирует уровень напряжения до необходимой величины на вторичной шине (рис. 1). Внедрение данной технологии в электрические системы судов актуально благодаря ее способности обеспечивать гибкое управление потоками электроэнергии и механизмами движения. Использование ПТ для главной распределительной шины (ГРШ) упрощает процесс синхронизации генераторов, что ведет к снижению затрат на оборудование и делает эксплуатацию плавсоставом более надежной.

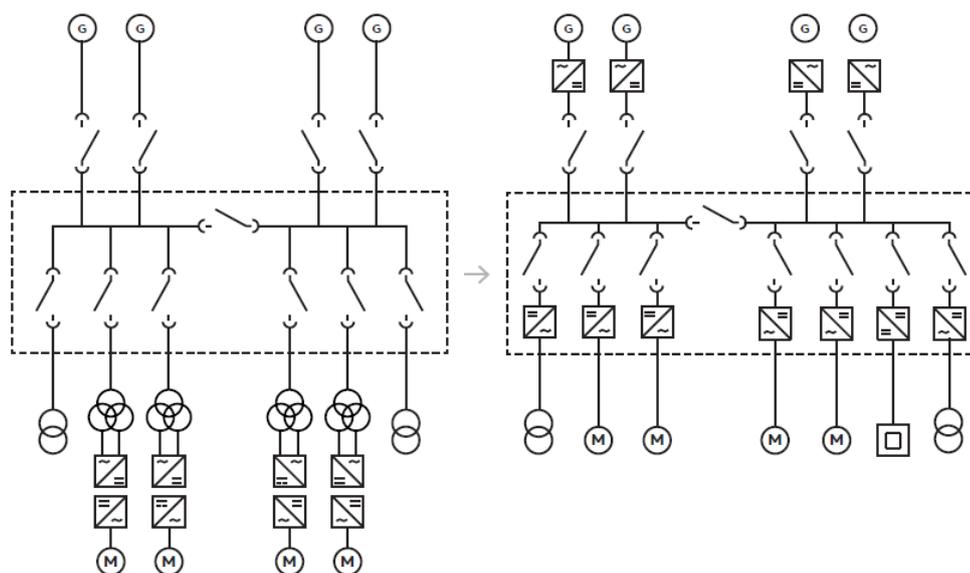


Рис. 1. Переход от единой электроэнергетической системы с основной шиной переменного тока к единой электроэнергетической системе с основной шиной постоянного тока

Fig. 1. Transition from a unified power system with an AC main bus to a unified power system with a DC main bus

На судах, использующих переменный ток для распределения электроэнергии, для управления работой гребного электрического двигателя (ГЭД) применяются преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Однако на тех судах, где используется ШПТ, достаточно применение только инверторов, при этом обходясь без выпрямителей. Это не только способствует более эффективной эксплуатации доступного пространства, но и снижает негативное воздействие электрических компонентов друг на друга, такое как всплески тока и скачки напряжения.

Для оптимизации качества электроэнергии, необходимой различным устройствам (например, измерительное оборудование и автоматизированные системы), применяют пассивные LC - или LCL -фильтры непосредственно перед инверторами.

Электрическая система с ШПТ на постоянном токе обеспечивает адаптивный подход к объединению различных источников энергии, включая валогенераторы, генераторы с регулируемой частотой вращения, аккумуляторы, суперконденсаторы и топливные ячейки.

Внедрение активных систем накопления электроэнергии (СНЭ) в судовых электросетях может эффективно способствовать уменьшению потребления топлива при использовании запасенной в динамических режимах электроэнергии.

Использование системы с ШПТ дает возможность эффективно работать с ДГ, чья частота вращения может изменяться в зависимости от нагрузки, что в свою очередь способствует снижению потребления топлива в сравнении с устройствами, работающими при постоянной частоте вращения. Благодаря тому, что частота вращения ротора генератора не определяет частоту тока в электросети, обеспечивается возможность

настройки генератора под конкретные требования различных типов двигателей без необходимости применения редукторов или механизмов.

Применение системы распределения постоянного тока в судовых электросетях способствует уменьшению размеров и веса трансформаторов. Также использование систем с высокочастотными преобразователями позволяет отказаться от силовых многообмоточных трансформаторов гребных электрических установок (ГЭУ), применяемых для улучшения параметров потребляемой ГЭД электроэнергии. Это не только освобождает пространство и сокращает использование материалов, но и способствует снижению потерь энергии за счет уменьшения количества коммутаций в системе.

В судовых электрических системах с ШПТ возможно применение электрооборудования мощностью до 30 МВт, а величина напряжения сети может достигать 1 000 В, что в свою очередь позволяет уменьшить сечение питающих кабелей в сравнении с электрическими системами напряжением до 690 В переменного тока (Власов и др., 2024; Баранов и др., 2015; Романовский, 2015; Романовский и др., 2019).

Единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС) с ШПТ предпочтительны для следующих типов судов:

- суда, где СНЭ выступают главными или единственными источниками электрической энергии, к которым могут относиться маломерные и безэкипажные суда;
- суда с гребными электрическими двигателями (ГЭД). К ним относятся: береговые сервисные суда, снабженцы, многоцелевые суда обеспечения, научно-исследовательские суда.

Таким образом, системы распределения электроэнергии постоянного тока позволяют:

- добиться снижения расхода топлива среднескоростными ДГ до 20 % и высокоскоростными ДГ до 40 %, работающими на долевых режимах нагрузки с соответствующим изменением частоты вращения;
- уменьшить уровень шума на 30 % при долевых режимах нагрузки ДГ;
- добиться уменьшения расхода меди на производство электропровода на 35 % при применении шинопровода вместо кабелей и на 40 % при более высокой величине напряжения электрической сети.

При использовании СНЭ в составе ЕЭЭС с ШПТ возможно:

- улучшить выходные параметры ЭЭС, так как за счет частичной компенсации нагрузки быстродействующими СНЭ уменьшение колебаний тока нагрузки может достигать 30 %, колебаний напряжения – 5 %;
- уменьшить потребление топлива до 40 % в динамических режимах путем отбора электроэнергии от ГЭД в процессе торможения и реверса с последующим применением для частичной компенсации нагрузки на ДГ;
- создать суда с гибридными ЭЭС, где СНЭ – дополнительный источник электрической энергии, и полностью электрифицированные суда, где СНЭ – основной источник электрической энергии, доля которого доходит до 100 %.

Целью работы является разработка этапов технического контроля и оценка полученных параметров для выработки экспертных решений об эксплуатационной надежности и перспективах дальнейшей работы оборудования и элементов в системах гребных электрических установок типа Azipod, актуальных на многочисленных судах.

Материалы и методы

Гребная электрическая установка с электрической винто-рулевой колонкой (ВРК) типа Azipod является подходящим решением для судов ледового класса и отвечает ряду критериев, необходимых для безопасного мореплавания. Но наряду со всеми преимуществами необходимо учитывать, что данный тип установки объединяет большое количество подсистем, увеличивая вероятность возникновения поломок, способных повлиять как на маневренные характеристики, так и на жизнеспособность судна.

ВРК типа Azipod состоит из ряда основных компонентов¹ (Романовский, 2015; Власов и др., 2024), которые должны подвергаться регулярному техническому осмотру и обслуживанию: винт фиксированного шага; модуль движителя, в котором расположен гребной электродвигатель; рулевой модуль; рулевой движитель; узел контактных колец; блок охлаждения; полупроводниковый преобразователь частоты; модуль управления.

Рассмотрим элементы технического обслуживания наиболее ответственных узлов ВРК типа Azipod.

¹ Компания АБВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://new.abb.com/marine/ru/katalog/systemy-electrodvizeniya/azipod> (дата обращения: 12.03.2019); Справочное руководство к проекту движительных систем Azipod®. Версия 6.2. Finland, Издание АБВ Оу, 2008, 65 с.; CRP Azipod® Propulsion Concept / Интернет-издание фирмы АБВ Оу. URL: <http://www.abb.com/marine>, 2002, 16 с.; Adnanes A. K. Maritime electrical installations and diesel electric propulsion. АБВ. AS Marine, 2003.

Решение об изменении интервала обслуживания узла контактных колец принимается на основе показаний измерений величины сопротивления на контактных кольцах (рис. 2, б). Для измерения сопротивления между контактным кольцом и наружной кольцевой шиной применим низкоомный омметр.

Наиболее простым способом очистки поверхности контакта щеток с контактными кольцами является размещение чистой ветоши, смоченной спиртовым раствором, между щетками и контактными кольцами (рис. 3) с помощью оттяжки щеточного привода. Ветошь кладут под каждую щетку, затем производится вращение ВРК минимум по два оборота в каждую сторону.



Рис. 2. Элементы узла контактных колец (а) и методика измерения сопротивления между контактными кольцами и наружной шиной (б)
Fig. 2. Elements of the slip ring assembly (a) and the method of measuring the resistance between the slip rings and the outer bus bar (b)



Рис. 3. Чистка щеток и изоляторов
Fig. 3. Cleaning brushes and insulators

Частой причиной загрязнения поверхностей и механизмов, расположенных в узле контактных колец, является выработка щеток, которые состоят из углеродных соединений. Загрязнение является одной из причин замыкания силовой линии на корпус, что может привести к аварийной ситуации. Также на изоляцию силового узла влияет состояние изоляторов, которые необходимо проверять не только на чистоту, но и на наличие трещин и мест перегрева.

При осмотре узла контактных колец регулярно отмечается, что поверхность загрязнена углеродсодержащей пылью, перемешанной с маслом. Причиной этого могут являться масляные течи, возникающие по причине нарушения целостности герметизации вращающихся соединений масляной системы (рис. 4, а), расположенных в верхней части узла, маслопровода подшипников ГЭД, уплотнительных камер

вала (рис. 4, б). Частицы протекающего масла сильным потоком воздуха распространяются внутри ВРК, оседая на поверхностях.



Рис. 4. Узлы соединения маслопроводов с ВРК (а – внешняя часть; б – внутренняя часть)
Fig. 4. Connection nodes of oil pipelines with the rudder propeller (a – the external part; б – the internal part)

Результаты и обсуждение

Инспекция обмоток ГЭД

Возникновение аварийной ситуации требует тщательной инспекции на наличие механических повреждений, предварительного измерения сопротивления изоляции обмоток ГЭД и бесщеточного возбудителя, дальнейшей очистки от всех следов загрязнения с применением ветоши, пропитанной спиртовым раствором или других специальных химических веществ. По завершению очистки производятся новые измерения сопротивления изоляции с проведением дальнейшего анализа выполненной работы.

При измерении бесщеточного возбудителя необходимо закоротить выпрямитель, измерить сопротивление изоляции между выводами выпрямителя и ротором ГЭД (рис. 5), применяя мегаомметр с включенным режимом измерения при 500 В постоянного тока. По завершению измерений мегаомметр перевести в режим разряда цепи.

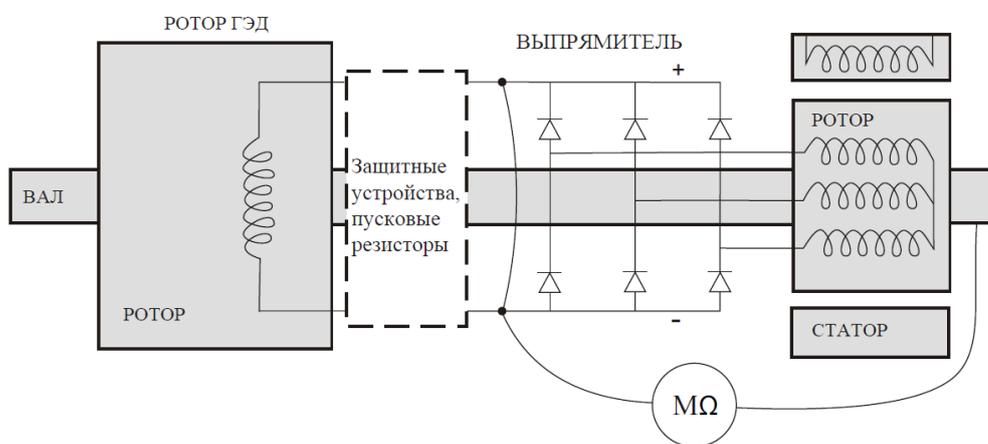


Рис. 5. Соединение для измерения сопротивления изоляции бесщеточного возбудителя
Fig. 5. Connection for measuring the insulation resistance of the brushless exciter

Измерение сопротивления изоляции обмоток статора ГЭД выполняется при выведенном из эксплуатации полупроводниковым преобразователем частоты (ППЧ), разомкнутых ножевых контактах со стороны обмотки статора и снятом заземлении. Для измерения применяется высоковольтный мегаомметр, включенный в режим измерения при 1 000 В постоянного тока, измерения необходимо проводить одну минуту, по завершении прибор переводится в режим разряда цепи (рис. 6).

При техническом обслуживании (ТО) бесщеточного выпрямителя (рис. 7, а) в соответствии с таблицей ТО необходимо производить измерения рабочих параметров диодов. Известен случай, когда при эксплуатации ВРК изменилось направление вращения гребного винта. Система защиты, получив сигнал о рассогласовании величины актуального значения оборотов с заданным, сформировала сигнал аварийной остановки ГЭУ.

Последующий анализ неисправности выявил, что несколько диодов бесщеточного выпрямителя были выведены из строя.



Рис. 6. Измерение сопротивления изоляции обмотки статора ГЭД высоковольтным мегаомметром
Fig. 6. Measuring the insulation resistance of the stator winding of the hydroelectric motor with the high-voltage megohmmeter



Рис. 7. Устройство возбуждения (а) и диод бесщеточного выпрямителя (б)
Fig. 7. The excitation device (a) and the brushless rectifier diode (b)

Пробитию диодов (рис. 7, б) сопутствует постепенное изменение рабочих параметров, периодическое измерение которых направлено на своевременное обнаружение неисправности и недопущения аварийного случая. При проверке измерение падения напряжения на диоде выполняется в обоих направлениях: при прямом включении падение напряжения должно находиться в пределах 0,2–0,6 В, при обратном – величина сопротивления стремится к бесконечности.

Паразитные напряжения и токи на валу

Немаловажной является бороскопическая инспекция подшипников ГЭД, необходимая для проведения анализа технического состояния. Подшипники могут подвергаться разрушительному влиянию как от механического воздействия, так и от электроэрозионного износа. С целью снятия паразитных напряжений и токов на валу применяются углеродсодержащие щетки, расположенные в непосредственной близости от подшипников, для анализа состояния которых проводят бороскопическую инспекцию. Измерение паразитного напряжения на валу ГЭД измеряется постоянно системой диагностики и выводится на удаленные станции мониторинга, при этом аварийный сигнал формируется при значении напряжения, равном 500 мВ.

Во избежание электроэрозионного влияния на подшипники плановое ТО защитной токосъемной системы выполняется каждый месяц и состоит из следующих действий (рис. 8):

- 1) отключение кабелей, соединяющих токосъемные щетки с корпусом гондолы;
- 2) измерение сопротивления между двумя щетками через вал ГЭД с применением миллиомметра;
- 3) при превышении измеряемого электрического сопротивления 100 мОм выполняется чистка контактных поверхностей, притирка щеток;
- 4) если в результате очистки контактных поверхностей измерения по-прежнему показывают превышение 100 мОм, то выполняется замена щеток.

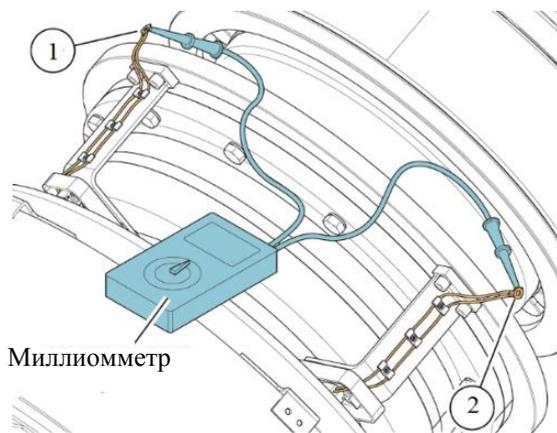


Рис. 8. Измерение проводимости токосъемных щеток
Fig. 8. Measuring the conductivity of current collector brushes

Неисправности полупроводниковых элементов силовой цепи ППЧ

Наиболее серьезные случаи возникновения неисправностей, относящиеся к ППЧ (рис. 9), связаны с полупроводниковыми элементами (ПЭ) силовой цепи (Горбунов и др., 2018). Данные неисправности отличает сложность обнаружения и возможные серьезные последствия.

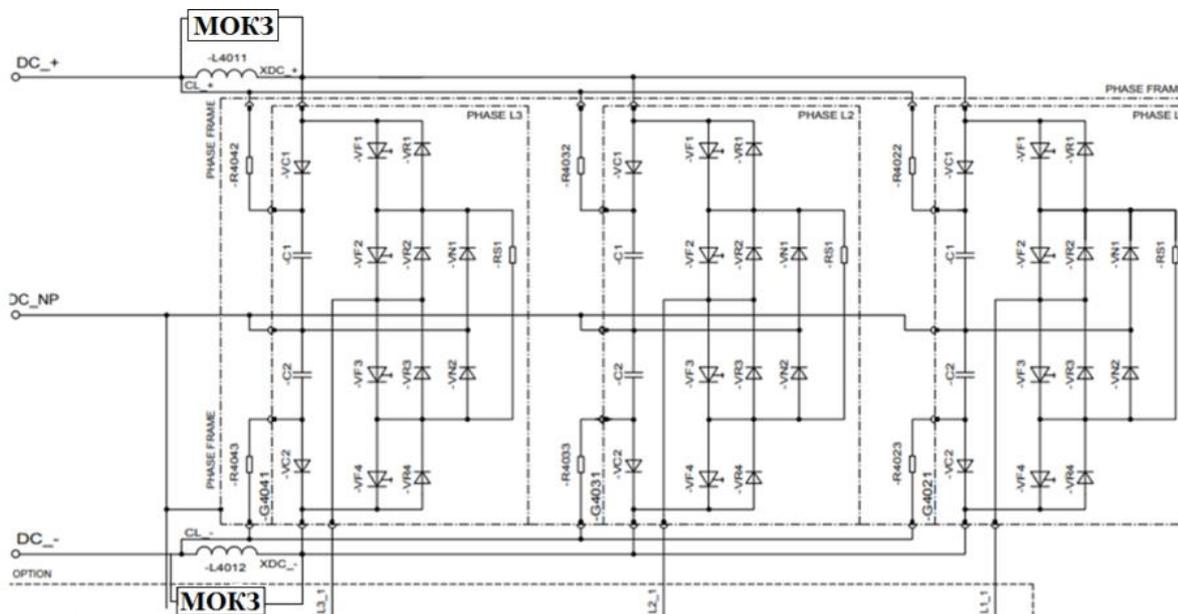


Рис. 9. Электрическая схема инвертора
Fig. 9. Electrical diagram of the inverter

Короткое замыкание (КЗ) может возникнуть по причине нахождения силового ПЭ в открытом состоянии, в то время когда он должен быть заперт. Это может быть связано как с повреждением самого ПЭ, так и системы управления. Система защиты построена таким образом, что при обнаружении короткого замыкания формирует сигналы аварийной остановки работы ППЧ, отключения главной цепи электропитания, команду на открытие всех ПЭ с целью рассеяния тока КЗ по всей цепи и таким образом уменьшения степени разрушения.

Для обнаружения КЗ в выпрямителе применяется модуль обнаружения короткого замыкания (МОКЗ), который измеряет напряжение, протекающее через резистор в нейтрали выпрямителя (рис. 10). В каждом фазном модуле на выходах звена постоянного тока перед инвертором установлены ограничители изменения тока цепи, представляющие собой дроссели, параллельно которым установлена система обнаружения КЗ. Принцип работы МОКЗ построен на обнаружении магнитного поля дросселей, возникающего при протекании электрической энергии во время отпирания ПЭ. Если продолжительность существования магнитного поля превышает 6–10 мкс, то формируется сигнал активации системы защиты от КЗ.

Каждая плата управления тиристором (рис. 10) оснащена визуальной индикацией наличия неисправности; у диодов индикация отсутствует. Выполнение измерений возможно без вынимания ПЭ.

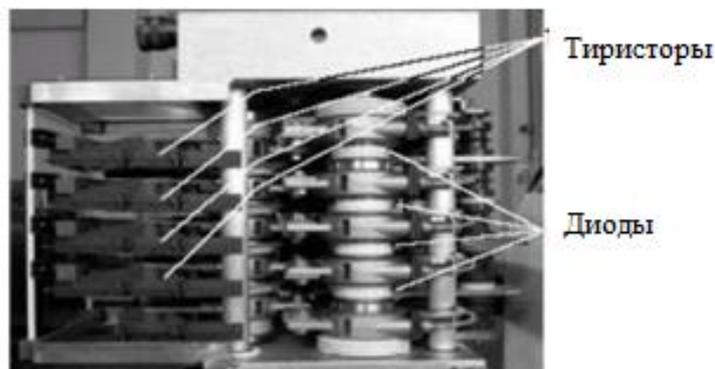


Рис. 10. Элементы фазного модуля
Fig. 10. Elements of the phase module

Проверка тиристора проходит в два этапа (рис. 11).

Первый этап:

1) отключить вспомогательное электропитание ППЧ, оптическим кабелем соединить сервисный выход платы управления инвертором (ПУИ) и вход приема отпирывающего оптического сигнала карты управления тиристором (КУТ);

2) включить вспомогательное электропитание ППЧ, оставив обесточенным ПУИ;

3) переведя мультиметр в режим измерения напряжения постоянного тока, измерить напряжение между теплообменником (катодом) и крепежной пластиной (базой). Измеряемое напряжение должно быть 20 В постоянного тока.

Второй этап:

1) по завершению первого этапа необходимо восстановить электропитание ПУИ;

2) переведя мультиметр в режим измерения напряжения постоянного тока, измерить напряжение между теплообменником (катодом) и крепежной пластиной (базой). Измеряемое напряжение должно быть +0,7 В постоянного тока.

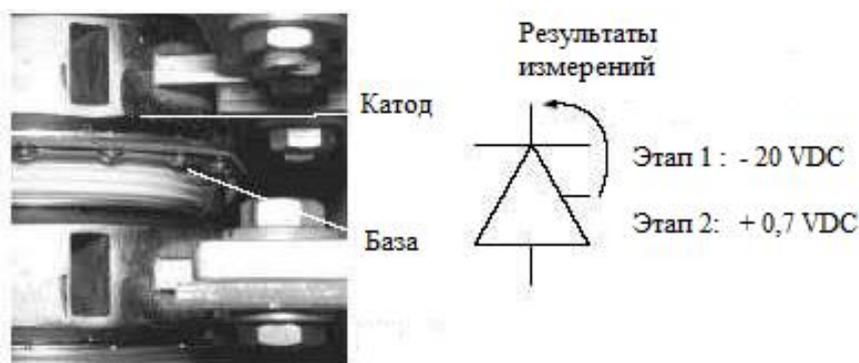


Рис. 11. Проверка тиристора
Fig. 11. Thyristor check

Измерение падения напряжения на диодах производится при вынужденном фазном модуле (рис. 12). Для выполнения проверки необходимо:

1) полностью выключить электропитание ППЧ и заземлить;

- 2) выкрутив фиксирующие болты, вытянуть фазный модуль из соединений с силовыми шинами;
- 3) при помощи мультиметра измерить величину падения напряжения на диодах.



а



б

Рис. 12. Измерение падения напряжения на диоде фазного модуля:

а – в проводящую сторону; б – в непроводящую сторону

Fig. 12. Measuring the voltage drop on the phase module diode:

а – to the conducting side; б – to the non-conducting side

Неисправности системы управления высоковольтными автоматами

Замыкание высоковольтных контакторов первичной обмотки трансформаторов ГЭУ при применении двухобмоточных ГЭД производится с применением задержки времени между срабатываниями. Если по каким-то причинам возникла ситуация, не позволяющая использовать одну из обмоток ГЭД, возможно применение функции работы ГЭУ при одной рабочей обмотке статора. В данном случае система защиты ограничивает мощность электрической энергии, подаваемой на оставшуюся обмотку ГЭД, до 50 %. Однако имеется прецедент, когда из-за некорректно написанного алгоритма защиты ГЭУ такой сигнал не был сформирован, и одна применяемая обмотка статора была нагружена до 100 %, что привело к разрушению изоляционных покрытий и внутреннему замыканию. Во избежание повторения данного случая рекомендуется перед каждым замыканием силовой цепи ГЭУ проверять корректность определения системой статуса готовности высоковольтных автоматов к замыканию.

На некоторых типах судов ГЭУ оснащена системой предварительного заряда трансформатора (СПЗТ) для минимизации величины броска нагрузки при замыкании высоковольтных автоматов первичной обмотки трансформаторов. Контакт СПЗТ замыкается на короткий промежуток времени и размыкается перед пуском высоковольтного автомата первичной обмотки, при этом снимается ограничение на замыкание высоковольтного автомата. Имеются случаи, когда из-за механической неисправности или нарушения работы платы управления контактором СПЗТ не замыкался высоковольтный автомат первичной обмотки трансформатора.

Неисправности управления рулевой системой

Гондолу винто-рулевой колонкой (ВРК) типа Azipod вращают четыре гидравлических двигателя, на каждую пару которых приходится один гидравлический насос. Система управления постоянно отслеживает изменение позиции гондолы относительно оси, непрерывно сравнивая заданное положение

на посту управления с фактическим положением, за определения которого отвечают модули обратной связи положения гондолы (МОСПГ). Вращение гондолы передается через ременную передачу с шестерни, связанной с осью гондолы, на шестерню МОСПГ (рис. 13), соединенную с потенциометром.



Рис. 13. Модуль обратной связи положения гондолы
Fig. 13. Nacelle position feedback module

При несоответствии заданного положения с фактическим система управления формирует два сигнала об ошибке гидравлической системы (server control fault и hydraulic lock) с задержкой времени, равной 2 с. При получении данных сигналов система управления останавливает гидравлический насос соответственной пары гидравлических двигателей, с работой которых связан один из двух МОСПГ, где обнаружилось несоответствие. Остановка происходит с целью недопущения превышения безопасного давления гидравлического масла, равного 125 % от максимального рабочего давления.

Обнаружение несоответствия фактического положения гондолы с заданным может быть выявлено в следующих случаях:

- при работе судна в тяжелой ледовой обстановке гондола может подвергнуться сильному влиянию со стороны движения льда, способному изменить ее положение относительно оси вращения, влекущее повышение давления масла в гидравлической системе с целью удержания заданной позиции. Если система не способна компенсировать внешнюю силу, формируется сигнал об ошибке;
- при нарушении работы гидравлической системы;
- во время остановки судна во льдах может потребоваться вращение работающих ВРК с целью вымывания льда. В данном случае ВРК может упереться в толстый слой льда, что может привести к превышению допустимого давления масла в гидравлической системе;
- при нарушении работы МОСПГ, что может быть вызвано: растяжением ремня, изменением работы потенциометра, нарушении линии связи.

Для проверки МОСПГ выполняется:

- 1) проверка натяжения ремня (рис. 14);

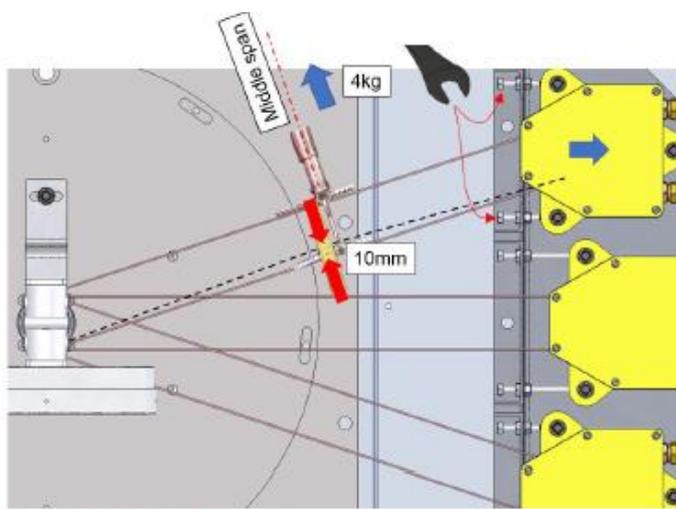


Рис. 14. Регулировка ременной передачи
Fig. 14. Adjusting the belt drive

2) измерение показаний с выходов потенциометров (рис. 15). Определение положения гондолы осуществляется сопоставлением выходных напряжений потенциометров, изменяемых по синусоидальному и косинусоидальному законам в диапазоне от -10 В до $+10\text{ В}$ постоянного тока. Синус измеряется с 2 и 5 терминалов (верхнего потенциометра), с 7 и 10 терминалов (нижнего потенциометра). Косинус измеряется с 3 и 5 терминалов (верхнего потенциометра), с 8 и 10 терминалов (нижнего потенциометра). Электропитание: со знаком "+" с 1 и 5 терминалов (верхнего потенциометра), с 6 и 10 терминалов (нижнего потенциометра), со знаком "-" с 4 и 5 терминалов (верхнего потенциометра), с 9 и 10 терминалов (нижнего потенциометра).

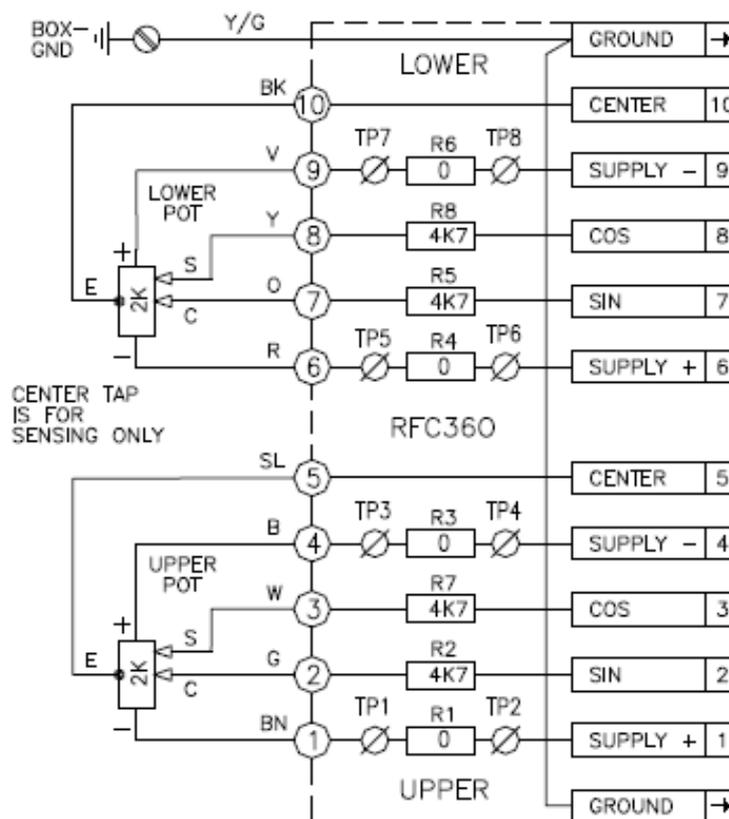


Рис. 15. Электрическая диаграмма модуля обратной связи положения гондолы

Fig. 15. Electrical diagram of the nacelle position feedback module

После выполнения измерений выходных параметров с МОСПГ в четырех положениях гондолы относительно оси требуется произвести их сравнение с эталонными значениями (см. таблицу). На основании полученных результатов выполняется регулирование потенциометров путем откручивания трех прижимных пластин и вращения их в сторону уменьшения расхождения.

Таблица. Эталонные значения выходных параметров МОСПГ

Table. Reference values of output parameters of the nacelle position feedback module

Выходные параметры МОСПГ [В]	Положение гондолы 0°	Положение гондолы 180°	Положение гондолы 90° (правый борт)	Положение гондолы 90° (левый борт)
sin сигнал (верхний потенциометр)	$\pm 0,10\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$	$-9... -10,2\text{ В}$	$+9... +10,2\text{ В}$
cos сигнал (верхний потенциометр)	$+9... +10,2\text{ В}$	$-9... -10,2\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$
sin сигнал (нижний потенциометр)	$\pm 0,10\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$	$-9... -10,2\text{ В}$	$+9... +10,2\text{ В}$
cos сигнал (нижний потенциометр)	$+9... +10,2\text{ В}$	$-9... -10,2\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$	$\pm 0,40\text{ В}$

Необходимо принимать во внимание, что из-за повреждения потенциометров может происходить кратковременная потеря сигнала. Для обнаружения такого вида неисправности применяется осциллограф:

при исправной системе напряжения изменяются непрерывно без искажений (рис. 16, а), тогда как при возникновении проблем с передачей сигнала может наблюдаться провал показаний (рис. 16, б).

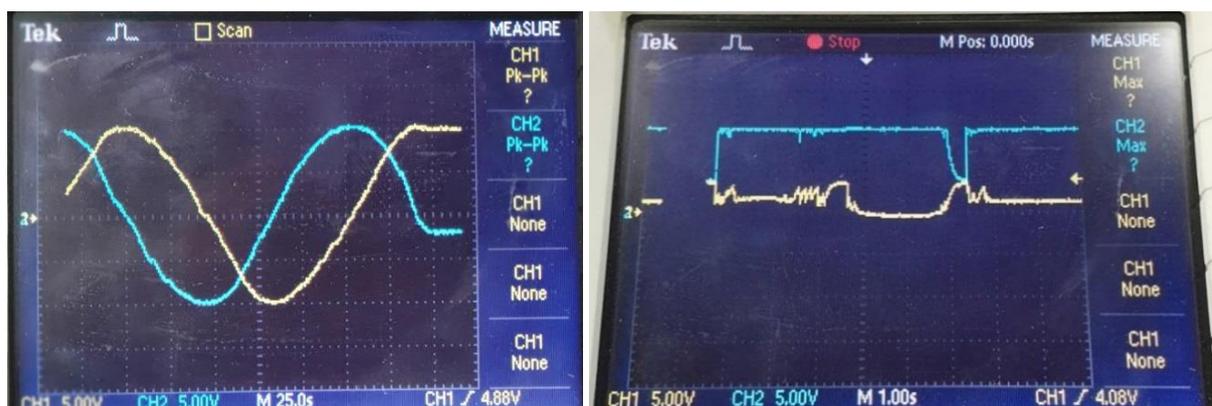


Рис. 16. Измерение выходных параметров исправного (а) и неисправного (б) МОСПГ
Fig. 16. Measurement of output parameters of the working (а) and the faulty (б) nacelle position feedback module

Система дистанционного диагностирования

Проведенное техническое обслуживание ГЭУ не защищает ее от внештатных ситуаций, возникновение которых может привести к критическим неисправностям.

С целью осуществления анализа работы ЕЭЭС с ГЭУ типа Azipod была разработана система дистанционного диагностирования для морской промышленности (СДД для МП) типа RDS4Marine. Данная система объединяет три главные функции:

- дистанционная коммуникация;
- анализ технических решений;
- сервисное обслуживание.

При дистанционной коммуникации применяется безопасный, SSL-зашифрованный коммуникационный туннель между потребителем и сервисной службой компании АВВ.

Для анализа технических решений в основе системы СДД применяется специализированный контроль и диагностическая платформа для сбора, хранения и анализа данных от отдельных компонентов, подсистем и полных интегрированных технических решений. СДД предоставляет легкий доступ береговым инженерным службам через линию спутниковой связи к судовым данным о состоянии ГЭУ. Вся собранная информация сохраняется на электронных носителях на борту судна и может быть дистанционно передана для осуществления анализа технического состояния систем.

Полная область диагностической системы типа RDS4Marine включает три различных диагностических подсистемы: D4Propulsion для ГЭУ, D4Switchboard для системы распределения электроэнергии и D4Drilling для потребителей.

Используя диагностическую платформу вместе с современной коммуникацией, сервисные инженерные службы могут в любое время помочь судовой машинной команде в анализе неисправностей и оперативном поиске решений аварийных ситуаций.

Заключение

В настоящее время из-за влияния санкций российские компании теряют гарантийное и сервисное обслуживание со стороны производителя. В связи с этим судовому персоналу приходится все чаще полагаться на сторонние компании, компетенции и возможности специалистов машинной команды, связанные с накопленным опытом, представленным анализом возникших неисправностей, а также способами поддержания рабочего состояния судовых технических систем.

Предлагаемые методы технического контроля, этапы его проведения, оценка полученных параметров для выработки экспертных решений об эксплуатационной надежности и перспективах дальнейшей работы оборудования и элементов в системах ГЭУ типа Azipod актуальны на многочисленных судах.

Принимая во внимание представленную в работе информацию, возможно сократить время, затрачиваемое персоналом на поиск решений, а также не допустить возникновения неисправностей в начальной стадии формирования.

Описанные в работе наиболее частые поломки, которые возникают в ГЭУ типа Azipod, и возможные их решения позволяют специалистам машинной команды выработать правильное экспертное решение для накопления отечественной базы с процедурами технического обслуживания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баранов А. П., Радаев А. В. Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электроэнергетических систем. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2015. 248 с.
- Власов А. Б., Урванцев В. И. Тренажерная подготовка судовой машинной команды. М. : Инфра-Инженерия, 2024. 320 с.
- Горбунов А. С., Алибаев Ф. Н. Применение полупроводниковых преобразователей электрической энергии в электроэнергетике // Вестник современных исследований. 2018. № 8.3(23). С. 231–233. EDN: PGWHLN.
- Романовский В. В. Гребные электрические установки для арктических ледоколов // Морской вестник. 2015. № 4(56). С. 53–54. EDN: VCHURH.
- Романовский В. В., Малышев В. А., Сорокин Ю. В. Гребные электрические установки ледоколов и судов ледового плавания. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. 396 с.
- Романовский В. В., Куракин В. Н., Иванов В. С. Электрооборудование морских комплексов. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2013. 244 с.

References

- Baranov, A. P., Radaev A. V. 2015. Electrical fire safety of high-voltage ship electric power systems. St. Petersburg. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Urvantsev, V. I. 2024. Simulator training of ship's engine room crew. Moscow. (In Russ.)
- Gorbunov, A. S., Alibaev, F. N. 2018. Application of semiconductor electrical energy converters in the electric power industry. *Vestnik Sovremennykh Issledovaniy*, 8.3(23), pp. 231–233. EDN: PGWHLN. (In Russ.)
- Romanovsky, V. V. 2015. Electric propulsion installations for Arctic icebreakers. *Morskoy Vestnik*, 4(56), pp. 53–54. EDN: VCHURH. (In Russ.)
- Romanovsky, V. V., Malyshev, V. A., Sorokin, Yu. V. 2019. Electrical propulsion installations of icebreakers and ice-going vessels. St. Petersburg. (In Russ.)
- Romanovsky, V. V., Kurakin, V. N., Ivanov, V. S. 2013. Electrical equipment of marine complexes. St. Petersburg. (In Russ.)

Информация об авторах

Бежик Артем Сергеевич – ул. Двинская, 5/7, г. Санкт-Петербург, Россия, 198035;

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, инженер;
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Artem S. Bezhik – 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, Russia, 198035;

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Engineer; e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Лебедев Александр Константинович – ул. Двинская, 5/7, г. Санкт-Петербург, Россия, 198035;

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
ст. преподаватель; e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Alexander K. Lebedev – 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, Russia, 198035;

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Senior Lecturer;
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Романовский Виктор Викторович – ул. Двинская, 5/7, г. Санкт-Петербург, Россия, 198035;

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
д-р техн. наук, профессор;
e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-2446>

Viktor V. Romanovskiy – 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, Russia, 198035;

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-2446>

Власов Анатолий Борисович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;

Мурманский арктический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Anatoly B. Vlasov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;

Murmansk Arctic University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Алгоритмы обучающих программ для тренажерной подготовки судовой машинной команды

А. Б. Власов

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.06.2024;

получена
после доработки
04.10.2024;

принята
к публикации
08.10.2024

Ключевые слова:

тренажер машинного
отделения, алгоритмы
обучения, тренажерная
подготовка,
высоковольтный
автоматический
выключатель HVB

Персонал судовой машинной команды (механики, электромеханики) обеспечивает техническую эксплуатацию и безопасность функционирования энергетических систем судна. Профессиональная подготовка и переподготовка морских специалистов судовых машинных команд необходима ввиду постоянного совершенствования оборудования и автоматизации электроэнергетических систем современных судов. Для обеспечения качественного обучения судовой машинной команды используется тренажерная подготовка с использованием комплекса современных тренажеров судовых энергетических установок и электроэнергетических систем, соответствующего стандартам Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. В процессе исследования разработаны блок-схемы обучающих алгоритмов, показаны особенности программ и примеры их работы. Полученные алгоритмы обучения на тренажерах позволяют реализовать как начальную подготовку курсантов, так и переподготовку специалистов при повышении их квалификации. В ходе тренажерной практики особую значимость приобретает возможность развития компетенций для работы с высоковольтным оборудованием (напряжением 3–10 кВ) современных судов в соответствии с требованиями Конвенции ПДНВ и Кодекса ПДНВ. Алгоритмы обучения обслуживанию высоковольтного оборудования необходимо внедрять в учебный процесс для повышения уровня квалификации специалистов.

Для цитирования

Власов А. Б. Алгоритмы обучающих программ для тренажерной подготовки судовой машинной команды. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 547–556. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-547-556>.

Algorithms of training programs for simulator training of ship's engine room personnel

Anatoly B. Vlasov

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Article info

Received
11.06.2024;

received
in revised
04.10.2024;

accepted
08.10.2024

Key words:

machine room
simulator,
learning
algorithms,
simulator training,
high voltage
circuit breaker HVB

Abstract

The ship's engine room personnel (mechanics, electromechanics) ensure the technical operation and safe functioning of the ship's power systems. Professional training and retraining of marine specialists of ship's engine rooms is necessary due to the constant improvement of equipment and automation of electric power systems of modern ships. To ensure high-quality training of the ship's engine room team, simulator training is used with a set of modern simulators of ship power plants and electric power systems that meet the standards of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers. In the course of the study, block diagrams of training algorithms have been developed; program features and examples of their operation have been shown. The obtained algorithms for training on simulators make it possible to implement both the initial training of cadets and the retraining of specialists when improving their qualifications. In the course of simulator practice, the opportunity to develop competencies for working with high-voltage equipment (3–10 kV) of modern ships in accordance with the requirements of the STCW Convention and the STCW Code is of particular importance. Algorithms for training in high-voltage equipment maintenance should be introduced into the educational process to improve the level of qualification of specialists.

For citation

Vlasov, A. B. 2024. Algorithms of training programs for simulator training of ship's engine room personnel. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 547–556. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-547-556>.

Введение

Стандарты компетентности судовых электромехаников и механиков специальностей 26.05.07 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики" и 26.05.06 "Эксплуатация судовых энергетических установок" определяют Конвенция ПДНВ и Кодекс ПДНВ¹. Тренажерная подготовка применяется в процессе обучения, профессиональной переподготовки специалистов судовых машинных команд ввиду постоянного совершенствования оборудования, систем автоматизации электроэнергетических систем современных судов.

Для обеспечения качественной подготовки и профессиональной переподготовки специалистов судовой машинной команды необходимо использование комплекса современных тренажеров судовых энергетических установок и электроэнергетических систем (Власов и др., 2024), соответствующего стандартам Конвенции ПДНВ и Кодекса ПДНВ.

Тренажерная подготовка может быть реализована как при выполнении виртуальных программных мероприятий, так и в ходе тренировки на реально действующем оборудовании. Например, тренажерный комплекс на основе автоматизированного главного и распределительного щитов (ГРЩ), который полностью имитирует процесс несения вахты на судовом оборудовании ГРЩ, позволяет обучающемуся контролировать все оборудование в режиме реального времени при ручном, автоматическом, автоматизированном управлении и различных условиях (Власов и др., 2024).

В ходе обучения курсантов особое внимание уделяется изучению:

- базовой технической информации;
- механизмов, систем машинного отделения и их мнемосхем;
- систем управления, контроля, защиты, аварийно-предупредительной сигнализации;
- правил эксплуатации систем и механизмов.

При тренингах обучающихся делается акцент:

- 1) на получение навыков по эксплуатации судового оборудования, систем и механизмов; навыков несения вахты;
- 2) повышение квалификации специалиста;
- 3) переподготовку специалистов родственных специальностей и специализаций;
- 4) обновление знаний и навыков для работы с новыми системами и комплексами.

Планы занятий на тренажерах составляются в соответствии с учебными планами, задачами и практической работой на судне определенной модели. Темы, их количество и учебные цели занятий определяются в зависимости от количества аудиторных часов, отведенных в учебном плане специальности на дисциплину.

Каждый типовой план практического занятия может быть использован неоднократно при проведении занятий в зависимости от следующих учебных целей:

- ознакомление с составом и назначением оборудования; изучение состава, технических характеристик и взаимодействия оборудования и т. д.;
- отработка навыков по управлению оборудованием в штатных режимах;
- отработка навыков по управлению оборудованием при наличии различных неисправностей;
- закрепление полученных навыков;
- проверка и оценка знаний умений и навыков (контрольные занятия).

Занятия на тренажерах создают условия:

- для приобретения с достаточной степенью реальности обучающимися навыков, соответствующих целям подготовки;
- обеспечения контролируемой эксплуатационной среды, воспроизводящей условия, включающие аварии, предаварийные ситуации;
- взаимодействия члена машинной команды с другими судовыми специалистами; ознакомления с текущей обстановкой;
- объективной регистрации и оценки действий обучающегося для персонификации процесса обучения в ходе тренажерной подготовки;
- отработки профессиональных действий при возникновении разнообразных производственных ситуаций т. д.

На тренажерах отрабатываются навыки:

- 1) работы с первичными двигателями (в том числе главной двигательной установкой), основными и вспомогательными механизмами машинного отделения;

¹Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года. Заключена в Лондоне 7 июля 1978 г. (ред. от 13.05.2021 г.). СПб. : ЦНИИМФ, 824 с. URL: https://www.consultant.ru/law/podborki/konvenciya_pdnv/.

2) подготовки систем управления двигательной установкой и вспомогательными механизмами к работе;
3) включения генераторов, соединения, распределения нагрузки и переключения генераторов;
4) соединения и отсоединения распределительных щитов и распределительных пультов;
5) использования компьютеров на мостике, в машинном отделении для решения производственных задач;

б) контроля электрических распределительных щитов и электрооборудования, приборов сигнализации и следящих систем.

Особую значимость занятия на тренажерах в процессе подготовки, переподготовки, повышения квалификации морских специалистов приобретают в связи с возможностью развития профессиональных компетенций для работы с высоковольтным оборудованием (напряжением 3–6 кВ) современных судов в соответствии с требованиями Конвенции ПДНВ. В работе (*Власов и др., 2024*) подробно рассматриваются вопросы эксплуатации на судах высоковольтных автоматических выключателей, комплектных распределительных устройств (КРУ), системы блокировок и особенности технического обслуживания высоковольтных автоматических выключателей (high voltage breaker, HVB).

Во время погружения в имитированную среду² (*Власов и др., 2024*) обучающийся решает одну или несколько задач, таких как:

– изучение объектов, способов функционирования устройств; проведение экспериментов; анализ системы; устранение неисправностей;
– отработка определенной последовательности действий; контроль усвоения пройденного материала.

Под обучающим тренажером понимается система подготовки или обучения, разработанная для персонала и включающая следующие структурные элементы³ (*Власов и др., 2024*):

1) четко сформулированные учебные цели (сценарии и модели), источники (руководства, должностные инструкции, правила);

2) способы/инструменты воздействия на имитационную реальность (органы управления, оперативные рабочие места);

3) адекватное моделирование реальности производства;

4) моделирование аварийных ситуаций, с которыми с достаточной вероятностью персонал может столкнуться в течение плавательной практики.

Подготовка специалистов к аварийным ситуациям является основным достоинством обучения с использованием тренажеров. Данная подготовка включает проведение имитации работы электрооборудования в обширном спектре эксплуатационных режимов (в том числе и недопустимых) (*Троицкий, 2012; Виноградов и др., 2014; Соколенко и др., 2016*), помогает избежать травмирования человека в реальных экстремальных условиях и сохранить работоспособность оборудования.

Постановка задачи

Целью работы является анализ возможностей составления автономных алгоритмов обучения безопасному обслуживанию высоковольтного оборудования на базе плагина E-tutor в тренажерном комплексе, способствующих углубленному изучению работы систем судна, реализации частичной автоматизации процесса обучения, развитию заинтересованности курсантов в получении знаний.

Разработанные алгоритмы могут быть включены в методику определения компетентности специалистов в сферах, определяемых ПДНВ:

– эксплуатация электрических и электронных систем, а также систем управления;
– эксплуатация и техническое обслуживание силовых систем напряжением выше 1 000 В.

Материалы и методы

Необходимость использования тренажерных комплексов при подготовке курсантов морских специальностей закрепляется на уровне Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ).

В работе рассмотрены алгоритмы использования тренажера на примере модели судна Dual Fuel Diesel-Electric LNG Carrier, реализованные с помощью комплекса ERS TechSim 5000⁴. Модель имитирует оборудование танкера "Великий Новгород", предназначенного для транспортировки сжиженного природного газа; электростанцию (ЭС) в разработанной модели судна, которая приближена к реальной электростанции на судне "Великий Новгород". Электрические схемы модели в достаточной степени соответствуют стандартным устройствам, параметрам и производительности систем и механизмов на борту судна. Модель системы судового электроснабжения включает судовую электрическую сеть (СЭС), судовую электрическую цепь

² См.: Тренажер TechSim 5000. Версия 8.8. Общее руководство обучаемого. 2018. 16 с. ; TechSim 5000. Версия 8.8. Руководство инструктора. 2018. 74 с.

³ Там же.

⁴ ERS 5000 TechSim. Дизель-электрический танкер СПГ с двухтопливным двигателем. Руководство обучаемого. 2018. 523 с.

и потребителей мощности. Судовая электрическая сеть состоит из высоковольтных генераторов (6,6 кВ), щитов ГРЩ, аварийных распределительных щитов (АРЩ), распределительного силового щита (РСЩ), фидеров и другого оборудования; высоковольтные автоматические выключатели HVV работают при напряжении 6,3 кВ.

Результаты и обсуждение

В процессе разработки алгоритмов использовался плагин E-tutor в программе "Инструктор тренажера". Алгоритмы обучения направлены на автономную (без участия преподавательского состава) подготовку к технической эксплуатации и обслуживанию высоковольтного оборудования, в частности техническому обслуживанию вакуумного высоковольтного выключателя HVV (напряжением до 10 кВ).

Элементы блок-схемы программы представлены на рис. 1. Задачей обучающего алгоритма является автономное обучение техническому обслуживанию высоковольтного выключателя дизель-генераторного агрегата, включая процедуры подготовки к обслуживанию и подключению высоковольтного автоматического выключателя (после технического обслуживания) в судовую электроэнергетическую сеть (ЭЭС).

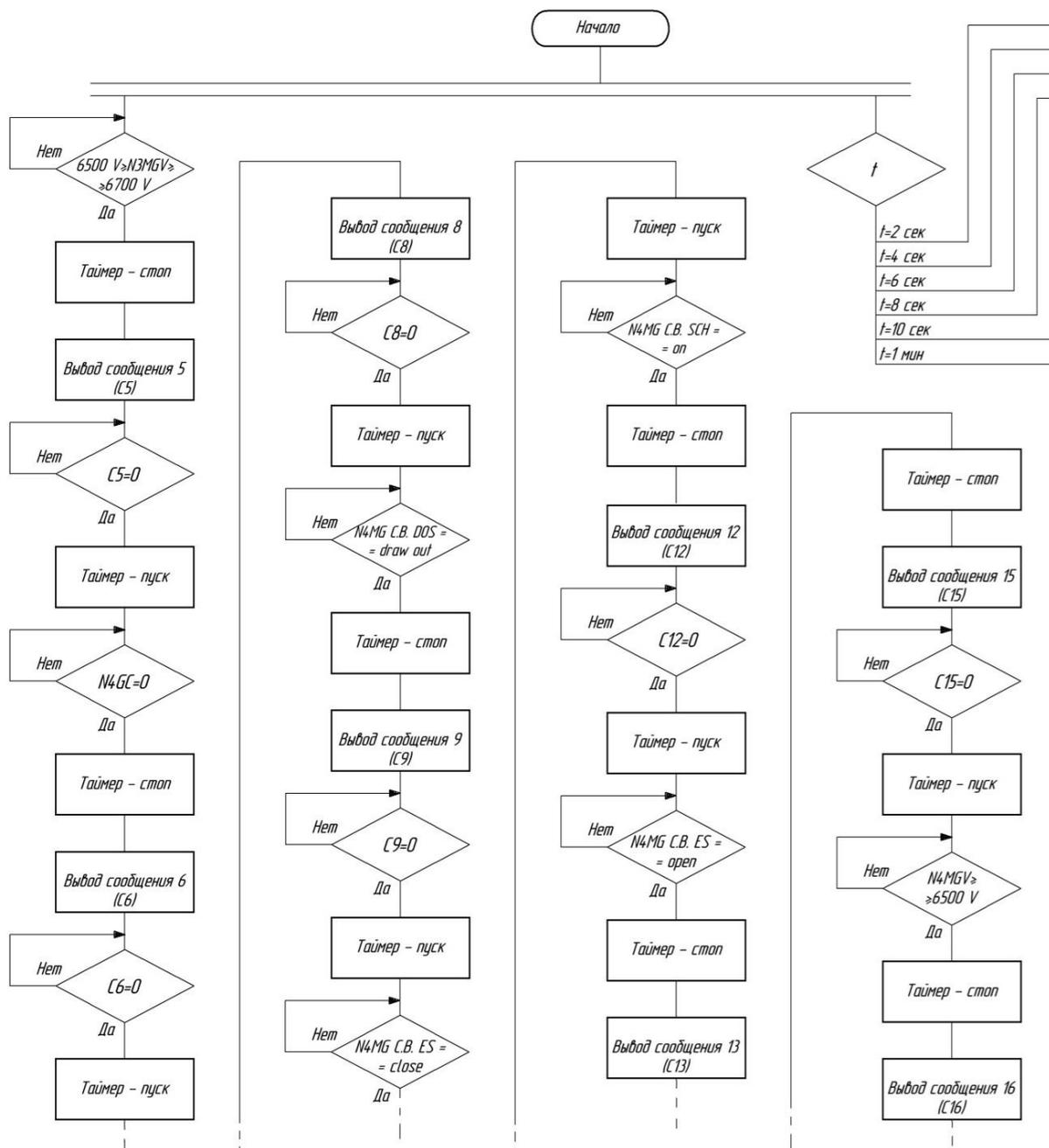


Рис. 1. Элементы блок-схемы работы обучающего алгоритма
 Fig. 1. Flowchart of the training algorithm

Детальная процедура реализации алгоритма и работы на промышленной установке типа КРУ-10 представлена в работе (Власов и др., 2024).

Для выполнения упражнения на экран обучающегося поэтапно выводятся информационные сообщения, содержащие методику реализации соответствующих этапов. После изучения методики по выводимым сообщениям обучающийся последовательно переходит от этапа к этапу.

Вывод сообщений связан с таймером упражнения и логическими диаграммами, т. е. сообщения выводятся в зависимости от времени или изменения состояния различных параметров системы в процессе поэтапного выполнения упражнения.

Контроль выполнения осуществляется посредством вывода блока вопросов и проверки параметров системы; указанные действия производятся с помощью таймера упражнения. Количество этапов контроля не ограничено, как и не ограничено количество возможных выводимых информационных сообщений.

Контроль выполнения упражнения также реализован с помощью логических диаграмм (без использования таймера упражнения) и осуществлен выбор только двух этапов контроля в связи со сложностью разработанной блок-схемой упражнения.

В описании сценария упражнения приведены используемые сокращения названий блоков схемы алгоритма, с которыми связаны пункты сценария; интерпретация сокращенных названий указывается в таблице, представленной ниже. Кратко процедуру упражнения можно описать следующим образом:

1. Через 2 с после начала упражнения выводится на экран обучающегося информационное сообщение, содержащее тему занятия, использованную модель судна, учебные цели (блок С1).

2. Через 2 с после закрытия предыдущего сообщения и 4 с после начала упражнения поступает информационное сообщение, содержащее начальные условия судовых систем и задание (блок С2).

3. Через 2 с после закрытия предыдущего сообщения и 6 с после начала упражнения показывается информационное сообщение, содержащее методику определения начальных условий (блок С3).

4. Через 2 с после закрытия предыдущего сообщения и 8 с после начала упражнения предлагается блок вопросов 1 (блок БКВ1).

5. Через 2 с после закрытия предыдущего сообщения и 10 с после начала упражнения выводится информационное сообщение, содержащее методику запуска дизель-генератора № 3 (блок С4).

6. Через 1 мин после начала упражнения проверяется уровень напряжения на выходе дизель-генератора № 3; если уровень не будет больше или равен 6 500, то высвечивается информационное сообщение, содержащее методику запуска дизель-генератора № 3 (блок С4.1).

7. Если уровень напряжения дизель-генератора № 3 занимает диапазон значений 6 500–6 700 В, то предлагается информационное сообщение, содержащее методику перевода питания шин ГРЩ с дизель-генератора № 4 на дизель-генератор № 3 (блок С5).

8. Если ток главного генератора № 4 равен 0 А, то выводится информационное сообщение, содержащее методику остановки дизель-генератора № 4 (блок С6).

9. Если уровень напряжения дизель-генератора № 4 равен 0 В, то показывается информационное сообщение, содержащее методику блокировки стартового пускового воздуха для дизель-генератора № 4 (блок С7).

10. Если сработала сигнализация о низком давлении стартового пускового воздуха главного генератора № 4, то выводится информационное сообщение, содержащее методику перевода высоковольтного выключателя из рабочего положения в контрольное (блок С8).

11. Если выкатной рычаг высоковольтной ячейки главного генератора № 4 принимает состояние draw out, то выводится информационное сообщение, содержащее методику подключения защитного заземления главного генератора № 4 (блок С9).

12. Если рычаг заземления высоковольтной ячейки принимает состояние On, то выводится информационное сообщение, содержащее методику перевода высоковольтного выключателя из контрольного положения в ремонтное, а также методику проведения технического обслуживания высоковольтного выключателя (блок С10).

13. Если кнопка размыкания контактов на высоковольтном выключателе главного генератора № 4 принимает значение Off, то выводится информационное сообщение, содержащее методику перевода высоковольтного выключателя из ремонтного положения в контрольное (блок С11).

14. Если механизм натяжения пружины в высоковольтном выключателе главного генератора № 4 принимает значение On, то выводится информационное сообщение, содержащее методику отключения защитного заземления главного генератора № 4 (блок С12).

15. Если рычаг заземления высоковольтной ячейки принимает состояние Off, то выводится информационное сообщение, содержащее методику перевода высоковольтного выключателя из контрольного положения в рабочее (С13).

16. Если выкатной рычаг высоковольтной ячейки главного генератора № 4 принимает состояние Insert, то выводится информационное сообщение, содержащее методику снятия блокировок стартового пускового воздуха для дизель-генератора № 4 (блок С14).

17. Если давление стартового пускового воздуха главного генератора № 4 принимает значение выше 15 бар, то выводится информационное сообщение, содержащее методику запуска дизель-генератора № 4 (С15).

18. Если уровень напряжения дизель-генератора № 4 принимает значение выше 6 500 В, то выводится информационное сообщение, содержащее методику перевода питания шин ГРЩ с дизель-генератора № 3 на дизель-генератор № 4 (блок С16).

19. Если ток главного генератора № 3 принимает значение равно 0 А, то выводится информационное сообщение, содержащее методику остановки дизель-генератора № 3 (блок С17).

20. Если уровень напряжения дизель-генератора № 3 принимает значение 0 В, то выводится информационное сообщение о завершении упражнения (блок С18).

После выполнения всех процедур за назначенное время тренажерное задание считается успешно выполненным.

Таблица. Описание блоков в алгоритме программы
Table. Description of blocks in the program algorithm

Блок	Описание и функция
С1	Содержит тему занятия, используемую модель судна, учебные цели
С2	Содержит начальные условия и задание
С3	Задача 1. Определение начальных условий
С4	Задача 2. Запуск дизель-генератора № 3 (ДГ № 3)
С4.1	Проверка выполнения задачи 2
С5	Задача 3. Переход на питание шин ГРЩ с ДГ № 4 на ДГ № 3
С6	Задача 4. Остановка ДГ № 4
С7	Задача 5. Блокировка стартового пускового воздуха ДГ № 4
С8	Задача 6. Перевод высоковольтного выключателя НВВ из положения "Рабочее" в положение "Контрольное"
С9	Задача 7. Подключение защитного заземления шин генератора № 4
С10	Задача 8. Перевод высоковольтного выключателя НВВ из положения "Контрольное" в положение "Ремонтное". Проведение технического обслуживания
С11	Задача 9. Перевод высоковольтного выключателя НВВ из положения "Ремонтное" в положение "Контрольное"
С12	Задача 10. Отключение защитного заземления шин генератора № 4
С13	Задача 11. Перевод высоковольтного выключателя НВВ из положения "Контрольное" в положение "Рабочее"
С14	Задача 12. Снятие блокировки стартового пускового воздуха ДГ № 4
С15	Задача 13. Запуск генератора ДГ № 4
С16	Задача 14. Переход на питание шин ГРЩ с ДГ № 3 на ДГ № 4
С17	Задача 15. Остановка ДГ № 3
С18	Завершение
N3MGV	№ 3. Main Generator Voltage. Напряжение главного генератора № 3 (В)
N3MGC	№ 3. Main Generator Current. Ток главного генератора № 3 (А)
N4MGV	№ 4. Main Generator Voltage. Напряжение главного генератора № 4 (В)
N3MGC	№ 4. Main Generator Current. Ток главного генератора № 4 (А)
N4MG C.B. DOS	№ 4. Main Generator Current Breaker draw out switch. Выкатной рычаг высоковольтной ячейки главного генератора № 4
N4MG C.B. ES	№ 4. Main Generator Current Breaker Earthing switch. Рычаг заземления высоковольтной ячейки главного генератора № 4
N4MG C.B. BO	№ 4. Main Generator Current Breaker Button Off. Кнопка размыкания контактов высоковольтного выключателя главного генератора № 4
N4MG C.B. SCH	№ 4. Main Generator Current Breaker Spring Charge. Механизм натяжения пружины в НВВ главного генератора № 4
N4MG C.B. SAP	№ 4. Main Engine Starting Air Pressure bar. Давление стартового пускового воздуха главного двигателя № 4
БКВ1	Блок контрольных вопросов 1. Проверка усвоения методики определения начальных условий (С3)

Для создания сообщений используется вкладка "Сообщения" в плагине E-tutor в программе "Инструктор тренажера".

Сообщения по блокам C2, C4, C5, C9, представленным в таблице, приведены на рис. 2–6.

**Начальные условия: на шины ГРЩ работает генератор №4.
 Высоковольтный автоматический выключатель находится
 внутри высоковольтной ячейки КРУ-10**

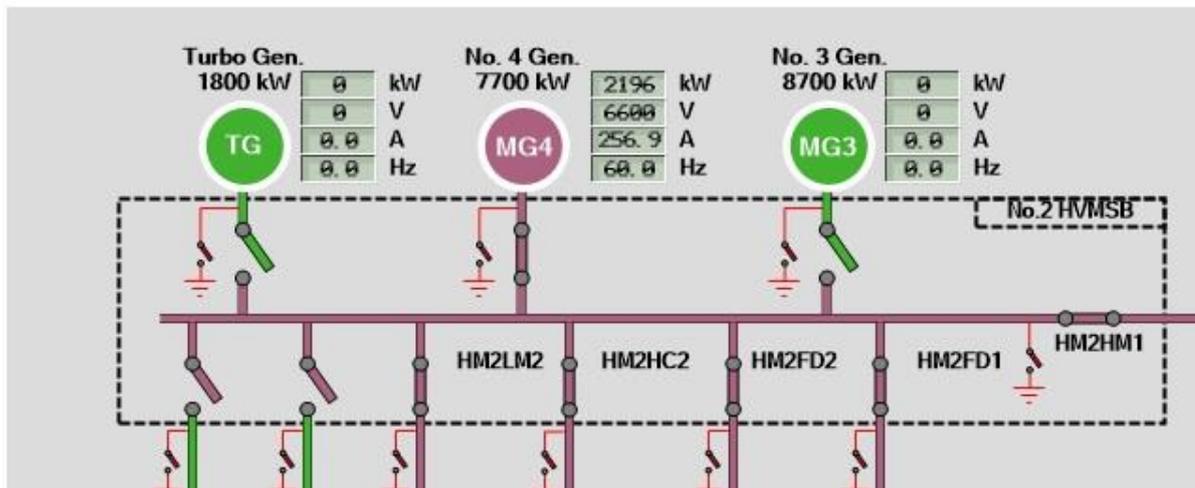


Рис. 2. Сообщение по блоку C2
 Fig. 2. The message on the C2 block

Задание 2.

Запустите дизель-генератор №3.

**Для запуска дизель-генератора
 перейдите в машинное отделение**

<input checked="" type="checkbox"/> ER2 VMS
Dead Man Start Panel
Dead Man Reset Panel
PM PORT LOP
PM STBD LOP
MG 1 LOP
MG 2 LOP
MG 3 LOP
MG 4 LOP
ER Fans PB
FO Pumps PB

Рис. 3. Сообщение по блоку C4
 Fig. 3. The message on the C4 block

Задание 3.
Синхронизируйте данный дизель-генератор с шинами ГРЩ, подключите к шинам и отключите ДГ № 4

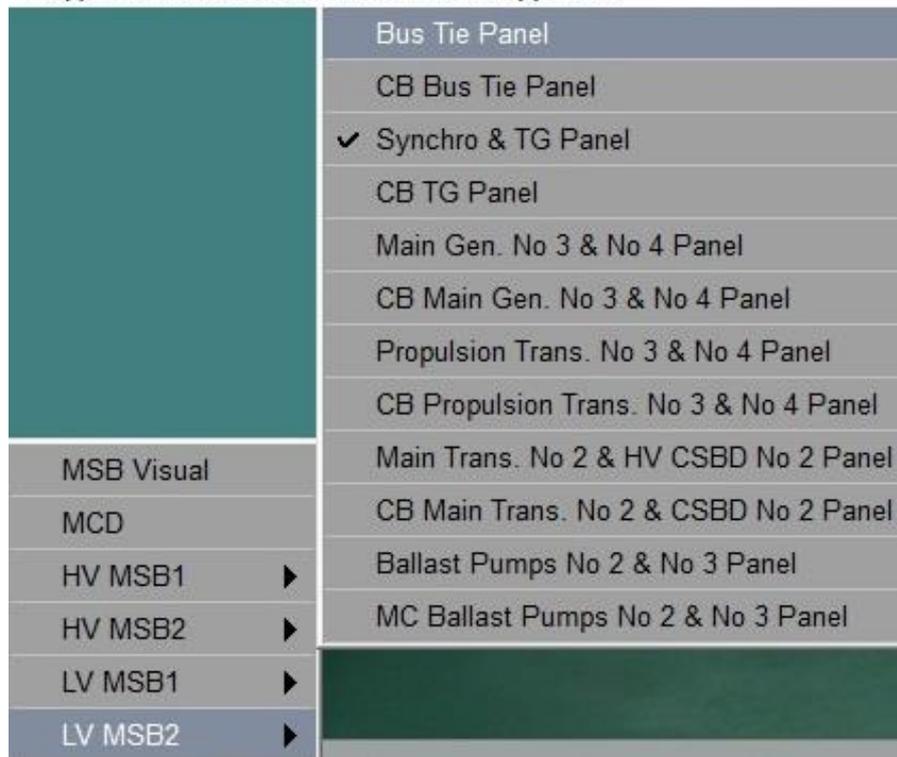


Рис. 4. Сообщение по блоку C5
 Fig. 4. The message on the C5 block

Задание 7.
Подключение защитного заземления шин дизель-генератора

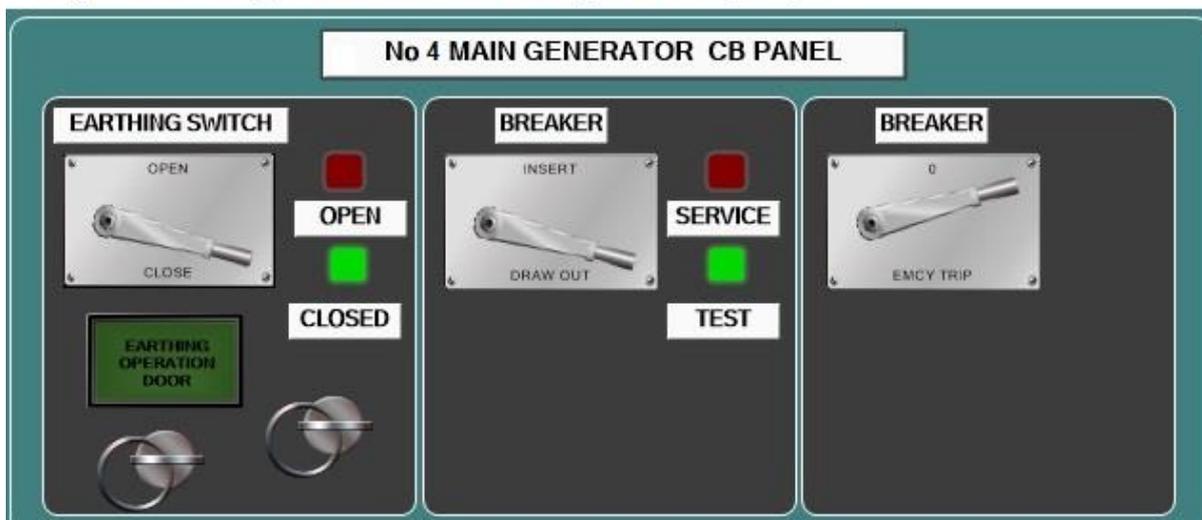


Рис. 5. Сообщение по блоку C9
 Fig. 5. The message on the C9 block

Для создания вопросов используется вкладка "Вопросы" в плагине E-tutor в программе "Инструктор тренажера". При составлении вопросов применяются кнопки управления в окне вкладки "Вопросы". В поле вопроса вводится текст вопроса (например: Какое значение напряжения на шине HVMSB № 1 в кВ?).

С помощью кнопки "Новый ответ" создается несколько вариантов ответа на вопрос: 7 700; 3 300; 7,7; 6,6; "Нет правильного ответа" (рис. 6). Правильный ответ указывается точкой в специально отведенном

поле (слева от возможных ответов). В окне состояния упражнения выбирается вариант "Пауза" для остановки таймера во время ответа на вопросы.



Рис. 6. Создание вопросов при выполнении упражнения
Fig. 6. Creating questions in the exercise

Заключение

Тренажерная подготовка приобретает особую значимость в процессе обучения и переподготовки специалистов судовой машинной команды, в особенности при получении начальных профессиональных знаний и освоении следующих процедур:

- перевод судна с берегового электроснабжения на собственное питание;
- ручная и автоматическая синхронизация при параллельной работе дизельных генераторов;
- работа главной энергетической установки (ГЭУ) судна на ходовых режимах;
- управление судовым турбогенератором;
- применение судового валогенератора;
- управление судовым подруливающим устройством;
- управление ГЭУ судна с винторулевыми колонками типа Azipod;
- техническое обслуживание высоковольтного автоматического выключателя в единой высоковольтной судовой автоматизированной электроэнергетической системе;
- проверка блокировок при техническом обслуживании КРУ-10 в ГРЩ судна и др.

Преподаватель (инструктор) имеет возможность на основе типовых планов самостоятельно разрабатывать планы практических занятий с учетом контингента обучающихся и учебных целей, включая отработку навыков курсантов по управлению едиными судовыми электроэнергетическими системами при различных неисправностях.

Программное обеспечение тренажера позволяет инструктору вводить широкий набор характерных неисправностей судового оборудования, в том числе не допустимых в условиях реальной эксплуатации.

Обучающиеся работают на тренажерах под управлением и контролем инструктора (основной режим). Инструктор управляет тренажером, получает данные от каждого из испытуемых, оценивает и анализирует качество работы обучающихся на тренажере. К каждому занятию подготавливается сценарий, который обеспечивается записью соответствующей программы в тренажере. Обучающиеся могут работать как в режиме создания и редактирования упражнений, так и в режиме оценки и анализа выполнения упражнений.

В тренажере предусмотрен режим записи занятия, что актуально при разборе действий обучающихся в ходе занятия. При необходимости делаются паузы в просмотре записи для подробного рассмотрения выполнения курсантами наиболее важных обрабатываемых элементов.

При проверке знаний и навыков особое внимание уделяется демонстрации профессиональных знаний и навыков для сертификации и дипломирования специалистов, подтверждения рабочих дипломов.

Оценку на контрольном занятии в режиме проверки знаний и навыков дает автоматизированная система оценки выполнения упражнения за действие/бездействие обучающегося, приводящее к срабатыванию системы защиты или поломке механизмов. Главным критерием оценки компетентности обучающихся является демонстрация их способности выполнять задание, решение которого приводит к безопасной, безаварийной и эффективной работе оборудования.

Предлагаемые алгоритмы обучения на тренажерах позволяют реализовать как начальную подготовку курсантов, так и переподготовку специалистов при повышении их квалификации.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Виноградов А. Л., Киселев А. И. О разработке тренажеров ТЭС на современном этапе // Вестник ИГЭУ. 2014. № 2. С. 13–17. EDN: SBTRWR.
- Власов А. Б., Урванцев В. И. Тренажерная подготовка судовой машинной команды. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 320 с.
- Соболенко А. Н., Корнейчук Ю. А., Глазюк Д. К. Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2016. № 2. С. 59–69. EDN: VYTTXX.
- Троицкий А. В. Применение тренажера судового механика Kongsberg Neptune ERS при изучении курса "Судовые двигатели внутреннего сгорания" // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 33. С. 203–205. EDN: RBSCKL.

References

- Vinogradov, A. L., Kiselev, A. I. 2014. On the development of TPP simulators at the present stage. *Vestnik IGEU*, 2, pp. 13–17. EDN: SBTRWR. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Urvantsev, V. I. 2024. Simulator training of the ship's machine crew (electric power systems). Moscow ; Vologda. (In Russ.)
- Sobolenko, A. N., Korneychuk, Yu. A., Glazyuk, D. K. 2016. Generalization of the experience of operating simulators of the marine engine room. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2, pp. 59–69. EDN: VYTTXX. (In Russ.)
- Troitskiy, A. V. 2012. The use of the ship mechanic simulator Kongsberg Neptune ERS in the study of the course "Marine internal combustion engines". *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*, 33, pp. 203–205. EDN: RBSCKL. (In Russ.)

Сведения об авторе

Власов Анатолий Борисович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Anatoly B. Vlasov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vlasovab@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

УДК 621.65:681.5:620.9:[628.1]

Использование частотного регулирования для повышения энергоэффективности работы насосных агрегатов в схемах включения с водонапорной башней

А. А. Капанский

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
г. Гомель, Республика Беларусь;
e-mail: kapanski@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-2695>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
16.07.2024;

получена
после доработки
02.08.2024;

принята
к публикации
06.08.2024

Ключевые слова:

энергоэффективность,
частотные
преобразователи,
оптимизация насосов,
системы водоснабжения,
автоматизация
насосных станций,
теория подобия
насосов, снижение
энергопотребления,
управление напором
воды, подача воды,
частотное
регулирование, повышение
эффективности
водонапорных башен

Для цитирования

Развитие существующей системы водоснабжения малых населенных пунктов предполагает использование преобразователей частоты и специализированных алгоритмов управления, способных поддержать в определенных пределах установленный в сети уровень давления. Реализация одной из типовых схем подразумевает вывод из эксплуатации водонапорной башни, это, с одной стороны, позволяет сократить затраты на ее обслуживание, с другой – при отказе работы насоса именно башня обеспечивает некоторый запас воды потребителю, что увеличивает общее время бесперебойной работы. В статье оценивается потенциал повышения энергетической эффективности системы водоснабжения при работе скважинных насосов на водонапорную башню за счет использования частотных преобразователей. Проанализированы режимы работы более 300 скважин. Установлено, что большинство насосов имели завышенные значения напора при подъеме воды в башню (медианное превышение порядка 30 м). Для исследуемых скважин оптимизация режимов работы насосных агрегатов позволила выявить потенциал энергосбережения до 50 % за счет сокращения избыточного давления и до 2,0 % за счет снижения пусковой мощности в момент разгона двигателя. Оценка потенциала энергосбережения, основанная на теории подобия, подчеркивает, что при снижении частоты вращения электродвигателя насоса важно учитывать и уменьшение его производительности, что является значимым ограничением при проектировании автоматизированных систем управления. Результаты исследования подтверждают значительный теоретический и практический потенциал использования частотных преобразователей для улучшения эффективности систем водоснабжения без необходимости консервации водонапорных башен. Исследование предоставляет основу для дальнейших разработок в области оптимизации и автоматизации систем водоснабжения с целью достижения высокой энергоэффективности.

Капанский А. А. Использование частотного регулирования для повышения энергоэффективности работы насосных агрегатов в схемах включения с водонапорной башней. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 557–567. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-557-567>.

Using frequency regulation to improve the energy efficiency of pumping units in switching circuits with a water tower

A. A. Kapanski

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus;
e-mail: kapanski@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-2695>

Article info

Received
16.07.2024;

received
in revised form
02.08.2024;

accepted
06.08.2024

Key words:

energy efficiency,
frequency converters,
pump optimization,
water supply systems,
automation of pumping
stations, pump similarity
theory, energy
consumption reduction,
water pressure control,
water supply, frequency
regulation, increasing
the efficiency
of water towers

For citation

Abstract

The development of the water supply system for small settlements involves the use of frequency converters and specialized control algorithms capable of maintaining the pressure level established in the network within certain limits. The implementation of one of the standard schemes involves decommissioning a water tower, which, on the one hand, allows reducing the cost of its maintenance, on the other hand, if the pump fails, the water tower provides a certain supply of water to the consumer, which increases the overall uptime. The paper considers the potential for increasing the energy efficiency of a water supply system when operating well pumps on a water tower through the use of frequency converters. The study has analyzed the operating conditions of more than 300 wells. This has made it possible to establish that most pumps have overestimated pressure values when lifting water into the tower (median excess of about 30 m). For the wells under study, optimization of the operating modes of the pumping units has revealed energy saving potential of up to 50 % by reducing excess pressure and up to 2.0 % due to a reduction in starting power at the moment of engine acceleration. An assessment of the energy saving potential based on similarity theory emphasizes that when the pump motor speed is reduced, it is important to take into account the reduction in its performance, which is a significant limitation in the design of automated control systems. The study results confirm the significant theoretical and practical potential of using frequency converters to improve the efficiency of water supply systems without the need to mothball water towers. The research provides a basis for further developments in the field of optimization and automation of water supply systems in order to achieve high energy efficiency.

Kapanski, A. A. 2024. Using frequency regulation to improve the energy efficiency of pumping units in switching circuits with a water tower. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 557–567. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-557-567>.

Введение

Система водоснабжения традиционно включает в себя как группы насосов в рамках водозаборных сооружений, так и отдельные скважины, задействованные для обслуживания населенных пунктов через водонапорные башни. Последняя конфигурация предназначена для гибкого управления водными ресурсами, что критически важно для обеспечения надежного доступа к воде в удаленных регионах. Ключевые направления к повышению эффективности водоснабжения укрупненно можно разделить на макро- и микроуровни. На макроуровне исследуются системные свойства водоснабжения, учитывающие вопросы прогнозирования и управления электропотреблением, оптимизацию режимом потребления воды и эффективное распределение ресурсов (Капанский, 2024). На микроуровне основные мероприятия включают в себя повышение эффективности непосредственно оборудования или технологических операций, в том числе замену устаревших насосов, повторное использование промывной воды, снижение утечек при транспортировке, оптимизацию режимов работы насосных агрегатов и др. (Makisha et al., 2018).

В современной практике водоснабжения, особенно когда речь идет о работе отдельных районных скважин, список технологических подходов к повышению эффективности и снижению эксплуатационных расходов весьма ограничен. В этом контексте можно выделить два часто встречающихся направления: улучшение эффективности электродвигателей насосов и оптимизация существующих режимов системы. Например, переход к использованию синхронных двигателей на постоянных магнитах становится популярным способом повышения общей эффективности водоснабжения районов. Эти двигатели способны обеспечить более высокую эффективность по сравнению с традиционными асинхронными приводами благодаря своей способности минимизировать энергетические потери в определенных эксплуатационных условиях. Так, исследования показали, что синхронные двигатели могут быть на 7,9–11,5 % более экономичными (Kazakbaev et al., 2019). Пример успешного внедрения синхронных двигателей на постоянных магнитах можно наблюдать на водозаборе "Лебедевский" в городе Жлобин, Республика Беларусь. Здесь модернизация скважины первого подъема воды была осуществлена путем установки электропривода мощностью 32 кВт. Полученные в результате экономические выгоды стимулировали дальнейшее обновление насосного оборудования в отдельно стоящих скважинах сельской местности, подтверждая эффективность таких технологических решений.

В сельской местности дросселирование продолжает оставаться основным методом регулирования режимов работы обособленных скважин. Это классический метод, который позволяет довольно просто установить необходимую производительность заполнения башни, однако не всегда эффективен с точки зрения энергопотребления и может приводить к излишнему износу оборудования. Развиваются и другие методы, особенно в области использования частотного регулирования, настраиваемые на поддержание заданного давления (Bezerra et al., 2015; Dabadgaonkar et al., 2011; Pelli et al., 2000). Изменение скорости вращения приводных механизмов за счет работы преобразователей частоты способствует не только оптимизации потребления электроэнергии, но и значительно продлевает срок службы оборудования, снижая механический износ (Kan et al., 2020). Это регулирование особенно важно для систем, где необходимо адаптировать производительность в реальном времени, чтобы избежать перерасхода электропотребления и обеспечить более стабильное и экономичное функционирование.

Стоит отметить, что применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) на скважинных насосах в малых населенных пунктах позволяет отказаться от использования регулирующей водонапорной башни, что значительно снижает затраты на ее обслуживание. Удаление накопительных емкостей устраняет риск гидроударов, способствует более точной регуляции давления в сети и уменьшает вероятность разрыва труб. Тем не менее на практике водоканальные службы не спешат проводить консервацию водонапорных башен, поскольку в аварийных ситуациях эти сооружения выполняют функцию резервных источников воды, гарантируя наличие запасов для потребителей. Это делает башни неотъемлемой частью системы водоснабжения, обеспечивая ее надежность и безопасность. Кроме того, эксплуатация насосов не рекомендуется при частоте питания менее 30 Гц, что приводит к тому, что даже при минимальном потреблении воды все равно сохраняется базовый уровень энергопотребления. В некоторых случаях это может сделать прямое включение насосов, минуя водонапорную башню, экономически нецелесообразными (Христо, 2014).

В статье анализируется режим работы насоса в сочетании с частотно-регулируемым приводом при подъеме воды в водонапорную башню. Эта технологическая схема выбрана в качестве объекта исследования, что позволяет глубже понять возможности оптимизации использования энергоресурсов в условиях возрастающих требований к экономичности, особенно в районах с обособленными скважинами.

Цель исследования заключается в разработке методов, обеспечивающих повышение эффективности системы водоснабжения для рассматриваемой схемы. Особое внимание уделяется оценке потенциала за счет снижения избыточного давления при подъеме воды и минимизации энергопотребления во время пуска двигателей. Для достижения этой цели задачи исследования включали комплексный анализ, направленный на определение средней величины избыточного напора подъема воды. Анализ основывался на данных, собранных с большого количества эксплуатирующихся скважин. Кроме того, в рамках исследования

оценивались ограничения, связанные с использованием частотного регулирования, а также анализировалось его воздействие на общую производительность системы и возникающие технические сложности.

Материалы и методы

Для расчета требуемого напора H , который должен создавать насосный агрегат, использовался расчетный метод, основанный на анализе ряда ключевых параметров. Эти параметры включали глубину скважины, производительность насоса, диаметр обсадной трубы, статический и динамический уровни воды в скважине, геометрическую высоту подъема воды

$$H = (H_r - h_d) + \Delta H, \quad (1)$$

где H_r – геометрический напор, определяющий разность геодезических отметок подачи и приема жидкости, м; h_d – динамический уровень воды в скважине, м; ΔH – гидравлические потери в напорном трубопроводе, м.

Анализ отклонения фактического давления от требуемого, создаваемого насосными агрегатами, осуществлялся на основе данных, собранных с 7 водоканалов, которые включали более 10 водозаборных станций и 300 скважин. Основываясь на собранных данных, создана визуализация (рис. 1), иллюстрирующая распределение избыточного напора, что дает возможность более глубоко понять динамику работы насосного оборудования и в дальнейшем оценить величину эффективности от оптимизации процесса подачи воды в башню.

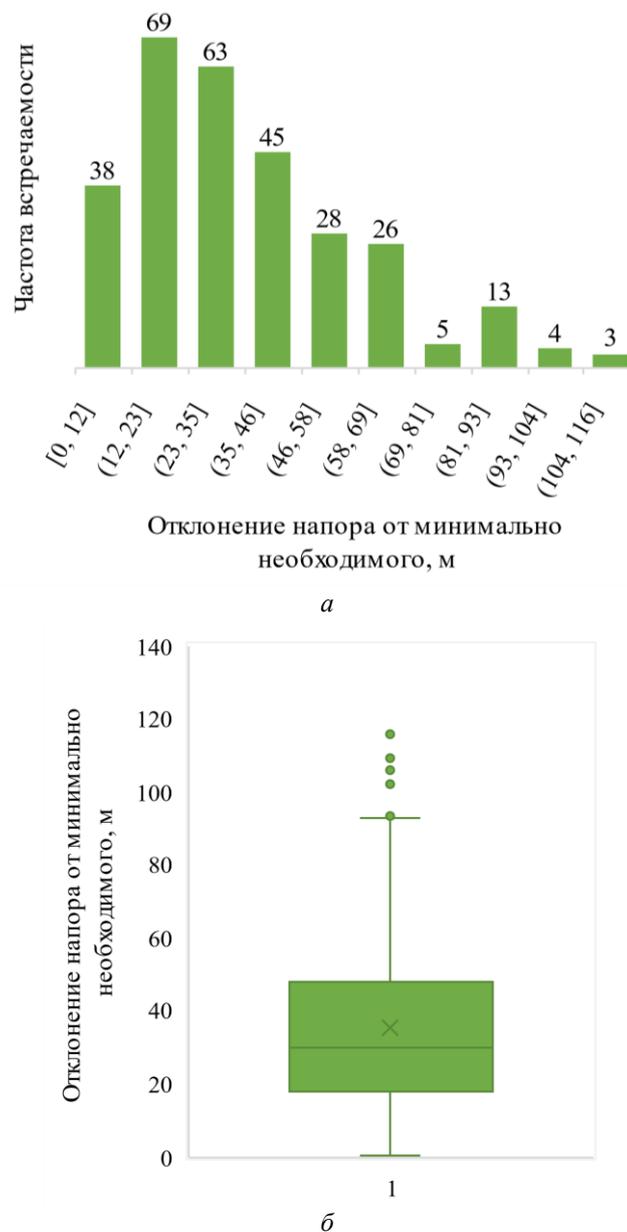


Рис. 1. Визуализация степени отклонения напора от требуемого для подъема воды в башню
Fig. 1. Visualization of the degree of pressure deviation from that required to lift water into the tower

На гистограмме (рис. 1, а) отражено распределение отклонения напора воды по величине и частоте встречаемости. Из полученных данных видно, что в некоторых случаях превышение напора воды доходило до 115 м. Это указывает на то, что использовались насосы с завышенными характеристиками, что не только неэффективно с точки зрения энергопотребления, но и может приводить к излишнему износу оборудования и инфраструктуры. Дополнительно на диаграмме размаха (рис. 1, б) отображены медианные, квартильные и предельные значения положительного отклонения давления. Медиана отклонения, равная 30 м, служит доказательством того, что большинство насосов имеют особенности работы с избыточным давлением. В практике эксплуатации такое превышение может быть вызвано различными факторами, включая изменение динамического уровня воды в скважинах, отсутствие системы автоматизации или завышенный первоначальный выбор насосов.

В данных условиях потенциал для энергосбережения становится очевидным и может быть реализован через комплексную автоматизацию скважин. Ключевой аспект оптимизации работы насосного оборудования – это управление напорной характеристикой насоса в зависимости от угловой скорости вращения приводного агрегата. Данная зависимость аппроксимируется уравнением квадратичной параболы, что позволяет точно прогнозировать изменения напора при корректировке скорости вращения электропривода (Фацценко, 2011)

$$H(Q) = H_{\phi} \cdot (\omega / \omega_{\text{ном}})^2 - S_{\phi} Q^2, \quad (2)$$

где H_{ϕ} – фиктивный напор насоса при нулевой подаче, м, при отсутствии данных для чистой воды $H_{\phi} = 1,25 \cdot H_{\text{ном}}$; $\omega, \omega_{\text{ном}}$ – переменная и номинальная угловая скорость вращения привода насоса, рад/с; S_{ϕ} – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, м·(ч/м³).

Фиктивное сопротивление насоса может быть определено из формулы при номинальной подаче, напоре и частоте вращения насоса

$$S_{\phi} = \frac{H_{\text{ном}} - H_{\phi}}{Q_{\text{ном}}^2} = \frac{H_{\text{ном}} - 1,25 \cdot H_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная подача насоса, м³/ч.

Напорная характеристика трубопроводной сети также описывается уравнением квадратичной параболы, учитывая неизменный геометрический статический напор и гидравлическое сопротивление, в соответствии с формулой (Фацценко, 2011)

$$H(Q) = H_{\Gamma} + S_{\Gamma} Q^2, \quad (4)$$

где S_{Γ} – гидравлическое сопротивление трубопроводной сети, м·(ч/м³), которое может быть определено при номинальных параметрах насоса по формуле

$$S_{\Gamma} = \frac{H_{\Gamma} - H_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2}. \quad (5)$$

В точке совпадения напорных характеристик насоса и трубопроводной сети устанавливается рабочий режим, который определяет реальную производительность и напор насосного агрегата. Анализ системы уравнений (2) и (4) позволяет выявить взаимосвязь между гидравлическими параметрами и угловой скоростью вращения электропривода, обеспечивая точное регулирование работы оборудования. Действительные корни уравнения определяют рабочую область насоса

$$H(\omega) = \frac{S_{\phi} H_{\Gamma} + (\omega / \omega_{\text{ном}})^2 S_{\Gamma} H_{\phi}}{S_{\phi} + S_{\Gamma}}, \quad Q(\omega) = \sqrt{-\frac{H_{\Gamma} - (\omega / \omega_{\text{ном}})^2 H_{\phi}}{S_{\phi} + S_{\Gamma}}}. \quad (6)$$

Коэффициент полезного действия двигателя $\mu_{\text{д,ном}}$ и преобразователя частоты $\mu_{\text{пчт}}$ на всем диапазоне изменения угловой скорости остается близким к номинальному, а гидравлическое КПД насоса изменяется в соответствии с формулой (Фацценко, 2011)

$$\mu_{\text{н}}(\omega) = 1 - \frac{1 - \mu_{\text{н,ном}}}{(\omega / \omega_{\text{ном}})^{0,36}}, \quad (7)$$

где $\mu_{\text{н,ном}}$ – номинальный гидравлический КПД насоса.

На рис. 2 демонстрируется классическое взаимодействие напорной характеристики насоса и трубопроводной системы в условиях работы насоса напрямую с гидравлической сетью, минуя водонапорную башню. Изображение наглядно показывает, как изменение гидравлического сопротивления трубопроводной сети влияет на рабочий режим насоса. В классической системе автоматизации экономический эффект достигается за счет точного поддержания необходимого уровня давления. Избыточный напор, возникающий в результате нелинейности напорной характеристики насоса, компенсируется снижением частоты вращения привода, что позволяет поддерживать заданное давление независимо от изменений в системе водоснабжения.

Здесь видно, что напорная характеристика насоса, по сути, подстраивается под изменения потребности в воде (Капанский и др., 2023).

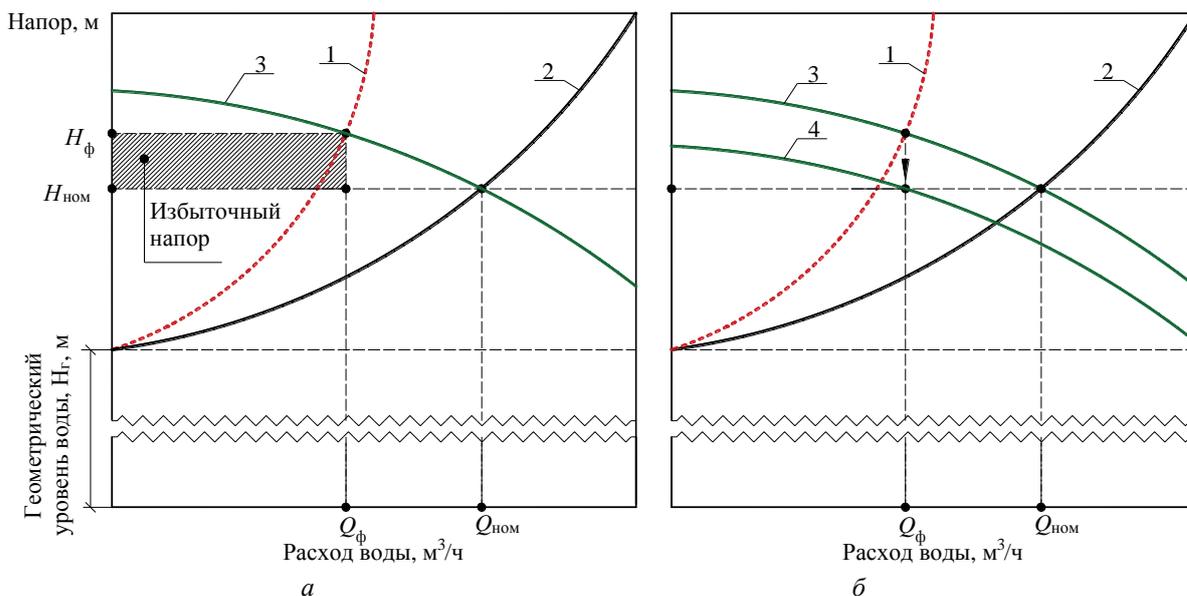


Рис. 2. Оптимизация напорной характеристики насоса с использованием системы автоматизации в схеме без водонапорной башни: *а* – появление избыточного напора при изменении характеристики трубопроводной сети; *б* – изменение характеристики насоса при частотном регулировании; 1 – напорная характеристика трубопроводной сети в номинальном режиме; 2 – напорная характеристика трубопроводной сети в фактическом режиме; 3 – напорная характеристика насоса при номинальной частоте; 4 – напорная характеристика насоса при снижении частоты
 Fig. 2. Optimization of pump pressure characteristics using an automation system without a water tower: *a* – the appearance of excess pressure when the characteristics of the pipeline network change; *b* – change in the characteristics of the pump with frequency regulation; 1 – pressure characteristic of the pipeline network in the nominal mode; 2 – pressure characteristic of the pipeline network in the actual mode; 3 – pump head characteristic at the nominal frequency; 4 – pressure characteristic of the pump with the decrease in frequency

Результаты и обсуждение

Для демонстрации практической применимости управления давлением для случая работы насоса на водонапорную башню проведем анализ с использованием конкретных технологических параметров на примере скважины, обеспечивающей водоснабжение населенного пункта Вольно (Брестская область, Республика Беларусь). Рассматриваемая скважина характеризуется насосом ЭЦВ 8-25-110 с номинальным напором в $H_{ном} = 100$ м, производительностью $Q_{ном} = 25$ м³/ч и гидравлическим КПД $\mu_{н,ном} = 0,742$. Номинальные параметры электрического двигателя: мощность $P_{ном} = 11$ кВт; $\mu_{д,ном} = 0,822$; перегрузочная способность $\lambda = M_m / M_{ном} = 2,2$; момент инерции $J = 0,11$ кг · м². Скорость вращения электропривода насоса в номинальных условиях составляет $n_{ном} = 2900$ об/мин, что эквивалентно угловой скорости $\omega_{ном} = 304$ рад/с. Объем водонапорной башни составляет $V = 30$ м³, годовой объем воды – $Q_{год} = 7634$ м³, максимальное часовое водопотребление $Q_{м.ч} = 2,0$ м³/ч. Эти параметры служат основой для дальнейшего исследования, позволяя оценить, как изменения в управлении скоростью насоса могут оптимизировать потребление энергии и снизить операционные расходы.

Требуемый напор воды, определенный на основании гидравлического расчета по формуле (1), позволяет обеспечить оптимальное функционирование водопроводной системы с минимальным избыточным давлением при $H_0 = 75$ м. Величина избыточного давления определялась как разница двух режимов до и после оптимизации: $\Delta h = H_1 - H_2$. Приведенная схема (рис. 3) включает в себя иллюстрацию насосной станции, водонапорной башни и гидравлических характеристик в двух рассмотренных режимах.

Проведенный анализ иллюстрирует, как точное регулирование частоты вращения насоса позволяет не только оптимизировать работу системы, но и значительно снизить энергетические издержки. Управление скоростью насоса основано на принципах изменения угловой скорости двигателя, что напрямую влияет на эффективность работы всей системы. Для углубленного понимания необходимо провести анализ, как

скорость вращения влияет на снижение удельного расхода электроэнергии на подъем воды. В оптимальных условиях угловая скорость вращения двигателя может быть получена путем решения уравнения (6) при известной величине требуемого напора H_o или подачи воды Q_o

$$\omega_o = S_T \frac{\omega_{ном} \sqrt{S_T H_\phi (S_T H_o - S_\phi H_\Gamma + S_\phi H_o)}}{S_c H_\phi} \quad (8)$$

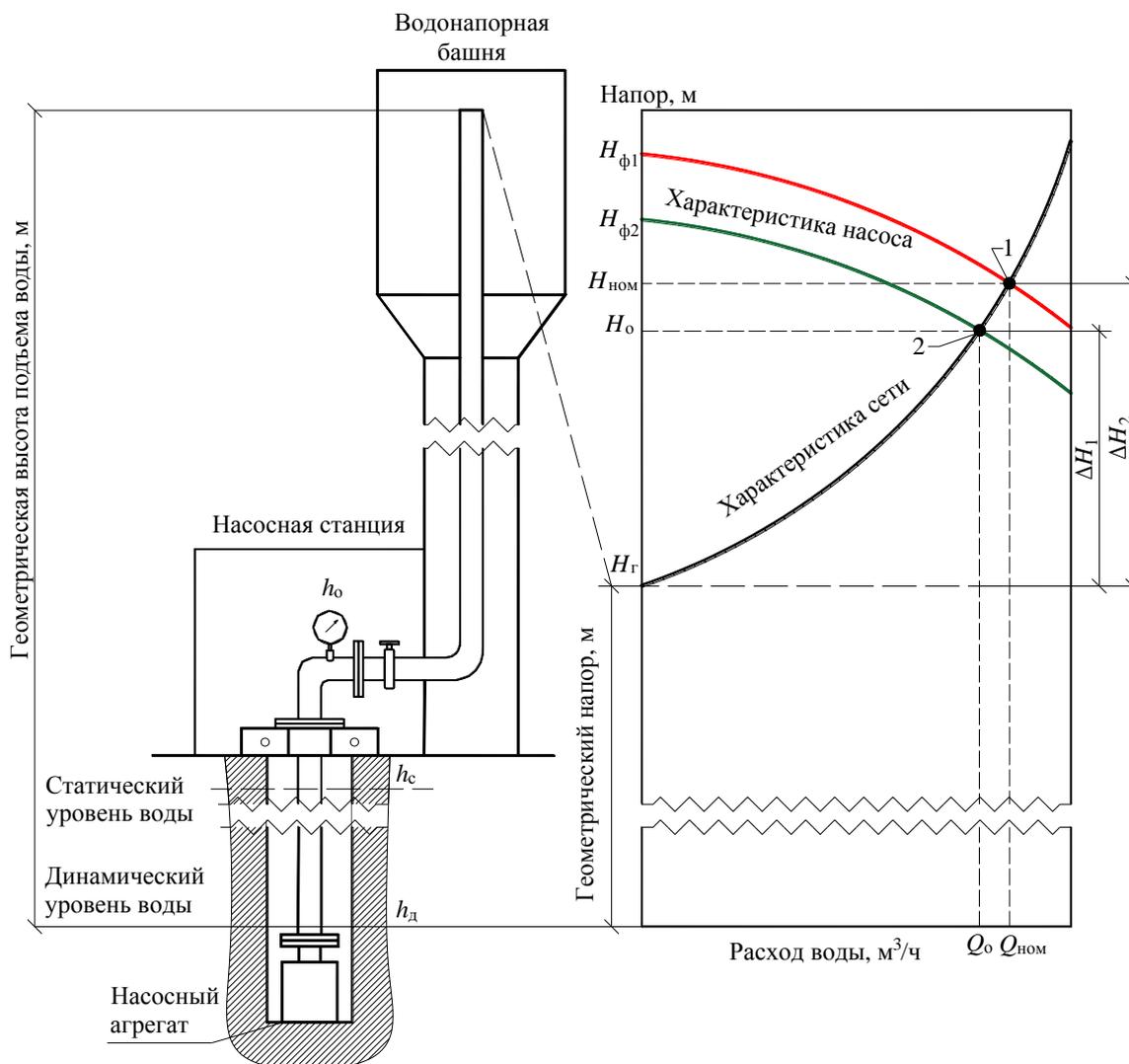


Рис. 3. Оптимизация напорной характеристики насоса с использованием системы автоматизации в схеме с водонапорной башней: 1 – рабочая точка в исходном режиме при номинальных параметрах; 2 – рабочая точка после оптимизации давления

Fig. 3. Optimization of the pressure characteristics of the pump using an automation system in a scheme with a water tower: 1 – operating point in the initial mode at nominal parameters; 2 – operating point after pressure optimization

Граничная угловая скорость, определяющая устойчивую работу насоса, находится в результате решения уравнения (6) по отношению к ω при $Q(\omega) = 0$ (Фацценко, 2011)

$$\omega_{гр} = \omega_{ном} \sqrt{H_\Gamma / H_\phi} \quad (9)$$

Для обеспечения стабильной и эффективной работы насосной установки необходимо строго соблюдать условия регулирования, что включает в себя установление диапазонов возможных настроек частоты питания двигателя. Первое условие заключается в том, что полученная оптимальная скорость вращения ω_o не оказалась ниже граничной угловой скорости $\omega_{гр}$. Второе условие связано с минимальной допустимой частотой питания двигателя $f_{мин}$, которая определена практикой и экспертными рекомендациями. Так, например, в соответствии с руководством по эксплуатации погружного насоса марки ЭЦВ при частотном регулировании частота питающего электродвигателя напряжения должна быть в пределах не менее 30 Гц

и не более 50 Гц. Работа насосного агрегата на частоте ниже этого минимума не рекомендуется из-за риска возможных механических повреждений насоса

$$\omega_o \geq \omega_{гр}; \omega_o \geq \frac{2\pi f_{\min}(1-s)}{p}. \quad (10)$$

Для гарантирования надежности подачи воды потребителю и предотвращения риска опустошения водонапорной башни, крайне важно поддерживать производительность насоса выше уровня максимального часового потребления воды $Q_{м.ч}$, даже при снижении частоты его работы после оптимизации. Это обеспечивает бесперебойное водоснабжение, особенно в периоды пиковой нагрузки. Связь производительности с частотой вращения электропривода определяется зависимостью (Фацциленко, 2011)

$$Q = Q_{НОМ} \cdot \sqrt{\frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega_o}{\omega_{НОМ}}\right)^2 - H_{Г}}{H_{\phi} - H_{Г}}}, \text{ тогда } Q \geq Q_{м.ч}. \quad (11)$$

При известной требуемой частоте вращения ω_o по формуле (6) может быть найден оптимальный напор $H(\omega_o)$, производительность $Q(\omega_o)$ насоса и ожидаемая мощность, кВт, затрачиваемая на подъем воды

$$P_{н.а}(\omega_o) = \frac{\rho \cdot Q(\omega_o) \cdot H(\omega_o)}{3600 \cdot 102 \cdot \mu_n(\omega_o) \cdot \mu_{д.НОМ} \cdot \mu_{птг}}, \quad (12)$$

где ρ – плотность чистой воды, кг/м^3 ; 102 – коэффициент, появление которого обусловлено переходом от Вт к размерности кВт и подстановкой значения ускорения свободного $9,8 \text{ м/с}^2$; 3600 – количество секунд в часе.

Годовое снижение затрат электрической энергии за счет сокращения избыточного давления подъема воды при известном объеме водопотребления $Q_{год}$ может быть определено через величину удельного электропотребления насоса при оптимальной производительности Q_o

$$\Delta W = \left(\frac{P(\omega_{НОМ})}{Q_{НОМ}} - \frac{P(\omega_o)}{Q_o} \right) Q_{год} = (w_{уд}(\omega_{НОМ}) - w_{уд}(\omega_o)) Q_{год}, \quad (13)$$

где ρ – удельные затраты электроэнергии на подъем воды, $\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^3$.

Для исследуемого насоса доведение частоты вращения до оптимальной способствовало снижению расхода на подъем воды с 456 до 308 $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ на тысячу кубических метров, что в годовом разрезе обеспечивало экономию до 30–50 % от исходного электропотребления. На рис. 4 приведено изменение удельного расхода электроэнергии при снижении угловой скорости вращения насосного агрегата.

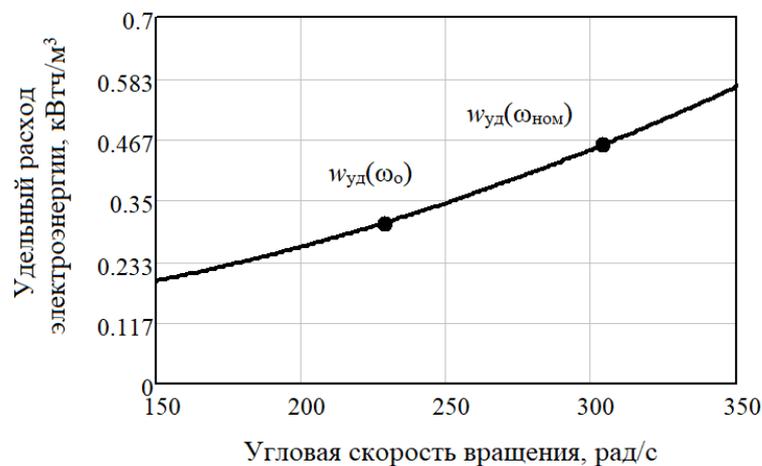


Рис. 4. Зависимость удельного расхода электроэнергии от угловой скорости вращения насоса
Fig. 4. Dependence of specific energy consumption on the angular speed of the pump rotation

Кратковременная потребность в воде у жителей сельских районов приводит к тому, что насосные агрегаты должны включаться многократно на протяжении года. Частота этих включений напрямую зависит от объема резервуара, что позволяет количественно оценить необходимое число пусков электродвигателя по формуле

$$n_{п} = Q_{год} / V, \quad (14)$$

где V – объем водонапорной башни, м^3 .

Как известно, увеличение мощности в момент разгона двигателя с короткозамкнутым ротором может достигать семикратных значений. Использование устройств плавного пуска или частотно-регулируемых

приводов способствует ограничению избыточного крутящего момента и, соответственно, неэффективному использованию электрической энергии (Gracheva, 2009; Дадабаев и др., 2021). Для определения потенциала энергосбережения обратимся к упрощенной механической характеристике двигателя, которая определяется в соответствии с формулой Клосса, приведенной через угловую скорость (Фаттахов, 2005)

$$M_d(\omega) = \frac{2M_{\max}}{(1 - \omega / \omega_c) / s_k + s_k / (1 - \omega / \omega_c)}, \quad (15)$$

где M_{\max} – максимальный момент двигателя, Н·м; ω_c – синхронная угловая скорость, рад/с; S_k – критическое скольжение.

Момент сопротивления $M_c(\omega)$ в области устойчивой работы насосного агрегата определяется делением гидравлической мощности насоса (12) на угловую скорость ω . При снижении скорости ниже $\omega_{\text{гр}}$ формируется нерабочий режим работы насоса с моментом $M_{\text{н.а.н}}(\omega)$, в котором преобладают момент трения M_T и холостого хода M_0 механизма (Фацциленко, 2011). В этом случае суммарный момент сопротивления механизма представляется двумя составляющими (Фацциленко, 2011; Hruntovich et al., 2019)

$$M_{\text{н.а}}(\omega) = \begin{cases} M_{\text{н.а.в}}(\omega) = \frac{\rho \cdot Q(\omega) \cdot H(\omega)}{3600 \cdot 102 \cdot \mu_n(\omega) \cdot \omega} \cdot 10^3 & \text{для } \omega \geq \omega_{\text{гр}}; \\ M_{\text{н.а.н}}(\omega) = (M_0 - M_T) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 + M_T & \text{для } \omega < \omega_{\text{гр}}. \end{cases} \quad (16)$$

Для упрощения математического описания момента сопротивления насоса при оценочных расчетах потенциала энергосбережения за счет плавности пуска использован переход от кусочно-непрерывной функции к степенной:

$$M_{\text{н.а.о}}(\omega) = M_{\text{н.а.в}}(\omega_{\text{ном}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^k, \quad (17)$$

где k – коэффициент, учитывающий крутизну характеристики момента

$$k = \frac{\ln(M_{\text{н.а.в}}(\omega_{\text{ном}}) / M_{\text{н.а.в}}(\omega_{\text{мин}}))}{\ln(\omega_{\text{ном}} / \omega_{\text{мин}})}, \quad (18)$$

где $\omega_{\text{мин}}$ – минимальная угловая скорость, определяющаяся при известной минимальной производительности $Q_{\text{мин}}$ по формуле (Hruntovich et al., 2019)

$$\omega_{\text{мин}} = \omega_{\text{ном}} \sqrt{H_r / H_\phi + (1 - H_r / H_\phi) \cdot (Q_{\text{мин}} / Q_{\text{ном}})}. \quad (19)$$

На рис. 5, а приведены механические характеристики двигателя и насоса, построенные по уравнениям (15), (16) и (17). Для определения продолжительности пуска использовалось уравнение движения ротора асинхронного двигателя, приведенное к форме Коши, с учетом перехода от момента сил к мощности двигателя $P_d(\omega)$ и насосного агрегата $P_{\text{н.а}}(\omega)$

$$\frac{d\omega}{dt} = P_d(\omega) - P_{\text{н.а}}(\omega) = \Delta P(\omega). \quad (20)$$

На рис. 5, б приведена характеристика изменения угловой скорости двигателя насоса при разгоне, а также изменение небаланса механической и электрической мощностей, определяющего потенциал энергоэффективности при частотном регулировании.

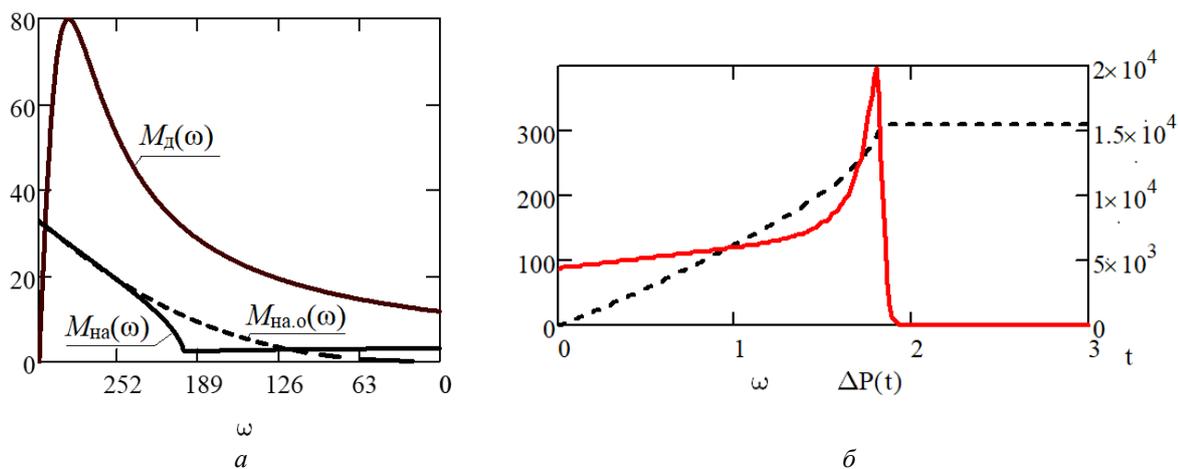


Рис. 5. Результаты моделирования: а – механическая характеристика двигателя и насоса; б – переходной процесс разгона двигателя насосного агрегата

Fig. 5. Research results: а – mechanical characteristics of the engine and pump; б – transient process of acceleration of the pump unit motor

При известной зависимости $\Delta P(t)$, времени переходного процесса t_{π} и количестве включений насоса в течение года, потенциал энергосбережения определяется

$$\Delta W_{\pi} = n_{\pi} \int_0^{t_{\pi}} \Delta P(t) dt. \quad (21)$$

Для анализируемого насоса среднее значение времени пуска составило $t_{\pi} \approx 2$ с. Однако экономия электроэнергии, достигнутая благодаря плавному запуску, оказалась незначительной (0,264 кВт·ч на пуск). В случае исследуемых скважин эффективность плавного пуска не превышала 2,0 % от общего потребления электроэнергии. Тем не менее это предоставило дополнительные преимущества к снижению избыточного давления, усиливая общую эффективность системы водоснабжения.

Для понимания эффективности решения проведено экономическое сравнение вариантов: при классическом включении, где частотно-регулируемый привод используется в роли устройства плавного пуска, и при включении на заданной частоте, которая обеспечивает необходимый объем воды в башне. В технико-экономическом обосновании стоимость устройства частотного регулирования для заданной мощности, включая дополнительные комплектующие, принята на уровне 800 долл. США. Стоимость электроэнергии для рассматриваемого объекта составляла 0,12 долл. США/кВт·ч. Тогда при снижении удельного расхода электроэнергии с 456 до 308 кВт·ч на тысячу кубических метров и годовой потребности воды 7 634 м³/год экономия электроэнергии только от снижения избыточного давления составит 1 130 кВт·ч или 135,6 долл. США в год. Исходя из объема резервуара, ожидаемое число пусков составит 254 раз в год, что обеспечит эффект от снижения пусковых токов 67 кВт·ч или 8,0 долл. США и в совокупности 143,6 долл. США в год.

Населенный пункт Вольно, где установлен рассматриваемый насос, характеризуется незначительным годовым водопотреблением. Тем не менее общий экономический эффект обеспечивает окупаемость данного технического решения за 5,6 года. Стоит отметить, что в практических условиях важным является не только теоретическое, но и практическое подтверждение эвристического метода анализа. В настоящее время проводится оценка технических деталей и возможностей подключения регистрирующих устройств без нарушения водоснабжения населенных пунктов. Для анализа эффективности различных композиций схемы важно обеспечить сопоставимость условий. В контексте данного исследования это включает возможность обхода водонапорной башни, подключение частотного электропривода в качестве устройства плавного пуска до номинальной частоты и включение двигателя насоса на уровень частоты, обеспечивающий снижение избыточного напора. Результаты этих испытаний будут опубликованы в дальнейшем, что позволит более точно оценить эффективность предложенного подхода и сформировать рекомендации для предложенного неклассического способа включения насоса.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значительный потенциал для повышения энергоэффективности систем водоснабжения малых населенных пунктов за счет использования частотно-регулируемых приводов насосных агрегатов, работающих на подъем воды в водонапорные башни. Анализ режимов работы нескольких сотен скважин позволил выявить, что большинство насосов закачивают воду в резервуары с избыточным давлением, которое значительно превышает необходимое. Это давление компенсируется в самой водонапорной башне, что приводит к ненужным энергетическим затратам и создает условия для ее оптимизации в рамках проектов автоматизации системы водоснабжения.

В настоящее время частотные преобразователи широко используются для обеспечения плавного пуска электроприводов насосов. Однако результаты исследования указывают на то, что этот подход сам по себе не приводит к значительной экономии энергии. Вместе с тем точный расчет и настройка преобразователей на работу насосов с оптимальным давлением, учитывая критерии максимальной эффективности и обеспечения бесперебойности водоснабжения, открывают новые возможности для экономии электроэнергии. Внедрение частотных преобразователей и автоматизированных систем управления способствует не только повышению энергоэффективности, но и продлению срока службы оборудования, а также снижению эксплуатационных затрат. Это обеспечивает экономическую эффективность с окупаемостью в пределах 5–6 лет даже для потребителей с незначительным спросом на воду.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Дадабаев Ш. Т., Грачева Е. И., Каримов И. Р., Валтчев С. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 1(49). С. 3–15. EDN: OOOZYKS.

- Капанский А. А., Павлов В. В. Влияние статической составляющей сети водоснабжения на изменение мощности электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25, № 4. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40>. EDN: EIUHGJ.
- Капанский А. А. Ключевые направления и мировые практики повышения эффективности и надежности водоснабжения // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*. 2024. № 1(96). С. 82–98. DOI: <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>. EDN: LVENUL.
- Фаттахов К. М. Формула Клосса, полученная с использованием Г-образной схемы замещения асинхронной машины // *Электричество*. 2005. № 8. С. 48–51. EDN: KXCGAX.
- Фашиленко В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. М. : Изд-во "Горная книга". 2011. 260 с.
- Христо П. Е. Исследование возможности оптимизации работы насосной установки // *Электротехнические и компьютерные системы*. 2014. № 15(91). С. 110–113. EDN: SNOTZP.
- Bezerra S. de T. M., Silva S. A., Gomes H. P., Salvino M. M. Energy savings in pumping systems: Application of fuzzy system // *Ciência & Engenharia = Science & Engineering Journal*. 2015. Vol. 24, Iss. 1. P. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.14393/19834071.2015.22536>.
- Dabadgaonkar S., Sen A. K. Controlling of pump onboard ship using variable frequency drive and three-phase induction motor // *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*. 2011. Vol. 1, Iss. 2. P. 87–92.
- Gracheva E. I. Estimation of electric power losses in low-voltage switching devices // *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*. 2009. P. 74–81.
- Hruntovich N. V., Kapanski A. A., Baczynski D., Vagapov G. V. [et al.]. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower // *E3S Web Conf*. 2019. Vol. 124. Article number: 05060. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405060>. (International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)). EDN: MCAOYB.
- Kan E., Mukhammadiev M., Ikramov N. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. Article number: 042009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/869/4/042009>. (Engineering Infrastructure).
- Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M. N. [et al.]. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications // *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 6. Article number: 1144. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12061144>.
- Makisha N., Kazimirova T. Principles of energy saving in water supply and sewage systems // *MATEC Web Conf*. 2018. Vol. 144. Article number: 04013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814404013>. (International Conference on Research in Mechanical Engineering Sciences (RiMES 2017)).
- Pelli T., Hitz H. U. Energy indicators and savings in water supply // *Journal American Water Works Association (AWWA)*. 2000. Vol. 92, Iss. 6. P. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2000.tb08959.x>.

References

- Dadabaev, S. T., Gracheva, E. I., Karimov, I. R., Valtchev, S. 2021. Study of starting modes of asynchronous motors under low quality of electric power supply. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 13(1(49)), pp. 3–15. EDN: OOZYKS. (In Russ.)
- Kapanskiy, A. A., Pavlov, V. V. 2023. The impact of the static component of the water supply network on the change in power consumption of the pump unit under frequency regulation. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 25(4), pp. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40>. EDN: EIUHGJ. (In Russ.)
- Kapanskiy, A. A. 2024. Key directions and global practices to enhance the efficiency and reliability of water supply systems. *Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, 1(96), pp. 82–98. DOI: <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>. EDN: LVENUL. (In Russ.)
- Fattakhov, K. M. 2005. Kloss's formula derived using a G-shaped scheme of substitution of an asynchronous machine. *Elektrichestvo*, 8, pp. 48–51. EDN: KXCGAX. (In Russ.)
- Fashchilenko, V. N. 2011. Regulated electric drive of pumps and fans at mining enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Khristo, P. E. 2014. Study of the possibility to optimize the work of the pump installation. *Electrotechnic and Computer Systems*, 15(91), pp. 110–113. EDN: SNOTZP. (In Russ.)
- Bezerra, S. de T. M., Silva, S. A., Gomes, H. P., Salvino, M. M. 2015. Energy savings in pumping systems: Application of fuzzy system. *Ciência & Engenharia = Science & Engineering Journal*, 24(1), pp. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.14393/19834071.2015.22536>.
- Dabadgaonkar, S., Sen, A. K. 2011. Controlling of pump onboard ship using variable frequency drive and three-phase induction motor. *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, 1(2), pp. 87–92.

- Gracheva, E. I. 2009. Estimation of electric power losses in low-voltage switching devices. *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, pp. 74–81.
- Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V. et al. 2019. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. *E3S Web Conf.*, 124. Article number: 05060. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405060>. (International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)). EDN: MCAOYB.
- Kan, E., Mukhammadiev, M., Ikramov, N. 2020. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869. Article number: 042009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/869/4/042009>. (Engineering Infrastructure).
- Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V., Ibrahim, M. N. et al. 2019. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications. *Energies*, 12(6). Article number: 1144. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12061144>.
- Makisha, N., Kazimirova, T. 2018. Principles of energy saving in water supply and sewage systems. *MATEC Web Conf.*, 144. Article number: 04013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814404013>. (International Conference on Research in Mechanical Engineering Sciences (RiMES 2017)).
- Pelli, T., Hitz, H. U. 2000. Energy indicators and savings in water supply. *Journal American Water Works Association (AWWA)*, 92(6), pp. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2000.tb08959.x>.

Сведения об авторе

Капанский Алексей Александрович – пр. Октября, 48, г. Гомель, Республика Беларусь, 246746;
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: kapanski@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-2695>

Aliaksey A. Kapanski – 48 Octiabria Ave., Gomel, Republic of Belarus, 246746;
Sukhoi State Technical University of Gomel, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: kapanski@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-2695>

УДК 621.314.58

Адаптация параметров сварочного трансформатора с учетом выходных характеристик дуги

В. С. Савчук*, А. С. Плехов

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,
г. Нижний Новгород, Россия;
e-mail: vladsava1997@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2281-6612>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
07.08.2024;
получена
после доработки
09.09.2024;
принята
к публикации
12.09.2024

Ключевые слова:

сварочный процесс,
тепловой баланс,
импульс мощности
и тока, математическая
и имитационная модель,
заданные и желаемые
параметры дуги,
автоматизированная
система управления
технологическим процессом

Сварка металлов, широко применяемая в современной технике, является сложным технологическим процессом. Для оценки качества сварного соединения и его соответствия эксплуатационным требованиям используются методы математического моделирования. Математическая модель импульсного трансформатора разработана с помощью программного комплекса Matlab Simulink и программных модулей от компании Schneider Electric. Проверка выходных данных произведена на базе производственной компании НПК "Эталон" (Ростовская область, г. Волгодонск), где полученные данные сопоставлены с теоретической базой. Математическая модель импульсного трансформатора позволяет реализовать метод сварки STT (Surface Tension Transfer – тепломассоперенос за счет механизма сил поверхностного натяжения) с более глубокой калибровкой силовых импульсов мощности тока с четко заданными электрическими параметрами и решить проблему переключения сварочных режимов в сложных рабочих сценариях; она применима для различных видов сварки (контактной, дуговой, лучевой и др.).

Для цитирования

Савчук В. С. и др. Адаптация параметров сварочного трансформатора с учетом выходных характеристик дуги. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 568–576. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576>.

Adaptation of welding transformer parameters taking into account arc output characteristics

Vladislav S. Savchuk*, Alexander S. Plekhov

*Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia;
e-mail: vladsava1997@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2281-6612>

Article info

Received
07.08.2024;
received
in revised
09.09.2024;
accepted
12.09.2024

Key words:

welding process,
thermal balance,
current power and
pulse, mathematical and
simulation model, current
and desired arc parameters,
automated process control
system

Abstract

Widely used in modern technology welding of metals is a complex technological process. To assess the quality of a welded joint and its compliance with operational requirements, mathematical modeling methods are used. The mathematical model of a pulse transformer has been developed using the Matlab Simulink software package and software modules from Schneider Electric. The output data have been verified at the manufacturing company NPK Etalon (Rostov Region, Volgodonsk), where the obtained data have been compared with the theoretical base. The mathematical model of a pulse transformer allows implementing the STT (Surface Tension Transfer – heat and mass transfer due to the mechanism of surface tension forces) welding with a deeper calibration of current power pulses with clearly defined electrical parameters. It allows as well solving the problem of switching welding modes in complex operating scenarios; it is applicable to various types of welding (contact, arc, beam, etc.).

For citation

Savchuk, V. S. et al. 2024. Adaptation of welding transformer parameters taking into account arc output characteristics. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 568–576. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576>.

Введение

Электрическая дуга, возникающая при сварке с использованием плавящегося электрода и независимой подачи проволоки, автоматически реагирует на внешние условия для поддержания постоянной энергетической стабильности (Мартынов, 2015).

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) подразделяются на централизованные, децентрализованные и комбинированные. При использовании централизованной структуры управления цифровое устройство отвечает за анализ сигналов и формирование управляющих команд, устанавливая связь с объектами управления через разнообразные каналы связи.

В ходе разработки математической модели импульсного трансформатора, позволяющей применять метод сварки STT¹ (Завьялов и др., 2018) при настройке силовых импульсов тока с заданными параметрами, использовались программный комплекс Matlab Simulink и плагины от компании Schneider Electric.

Материалы и методы

Основными характеристиками стыкового шва являются следующие элементы геометрической формы: ширина шва e , выпуклость шва q , глубина провара h , толщина шва t , зазор b и толщина свариваемого металла S .

При управлении сложным многомерным объектом, таким как шов, для определения текущей координаты стыка по длине используется функция аппроксимации, которая учитывает указанные характеристики. Чтобы сохранить все координаты, стык автоматически разделяется на фрагменты с заданными длиной и формой, которые приближают криволинейный стык к заданному уровню точности. Каждый участок имеет в памяти компьютера лишь координаты конечной точки, необходимые для его дальнейшего использования.

При правильном подборе параметров сварочного режима появляется возможность улучшения качества сварочного шва, смещения температур фазовых переходов в связке "феррит – мартенсит – перлит – цементит", использования более щадящих режимов последующей термообработки, управления нормированным тепловложением в сварочную ванну при применении аналитической модели объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака.

Результаты и обсуждение

Для автоматизации решений по управлению многомерными объектами применяется структурная схема процесса саморегулирования (рис. 1), где использованы следующие обозначения: ОУ – объект (объекты) управления; ЦУУ – цифровое управляющее устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ИУ – исполнительное устройство; q_1 – теплота (энергия), затрачиваемая на нагрев капли до температуры плавления электродного металла; q_2 – теплота, переносимая электродом (тепломассоперенос); q_k – прочие вводные параметры (толщина, сечение, марка материалов).

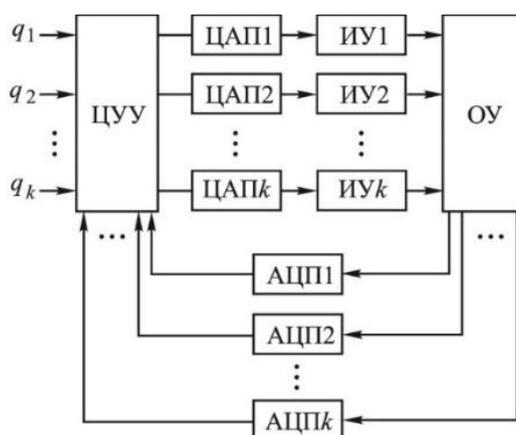


Рис. 1. Структурная схема процесса саморегулирования
Fig. 1. Block diagram of the self-regulation process

В ходе сварочных работ система применяет линейную интерполяцию для вычисления промежуточных координат, основываясь на координатных узлах. Координаты определяются с учетом распределения сварочного пути по диаметру (периметру) соединяемых элементов. При выполнении сварки по криволинейной проекции система автоматического управления самостоятельно поддерживает постоянную скорость сварки по контуру, что позволяет ей регулировать скорость перемещения по осям X и Y .

¹ Метод сварки STT (Surface Tension Transfer) – тепломассоперенос за счет механизма сил поверхностного натяжения.

При использовании упреждающей коррекции меняется ее коэффициент передачи по контуру, что может негативно сказаться на работе всей системы. Чтобы этого избежать, нужно дополнительно скорректировать указанный коэффициент на величину его изменения с помощью специальной компенсирующей цепи, которая адаптирует уровень задающего сигнала U_3 в зависимости от уровня сигнала упреждающей коррекции. Одно из условий – цепь должна работать медленнее, чем контур регулирования тока, чтобы не нарушать динамику его работы. Когда сопротивление нагрузки RH уменьшается, коэффициент a тоже уменьшается, что приводит к увеличению контурного коэффициента системы. Для возврата выходного параметра в нужное положение необходимо изменить значение U_3'' .

Учитывая большое разнообразие типов сварных соединений, для корректировки настроек сварочного режима следует применять компьютер с достаточным объемом оперативной памяти (1 гигабайт и более). При выполнении этого условия у оператора появляется возможность выбора режимов сварки, соответствующих технологическим картам, и настройки параметров сварочного режима любой сложности. Все установки технологического режима сварки подвергаются контролю в реальном времени.

Оператор устанавливает режим работы АСУ с помощью пульта управления и выбирает программу, включающую обучающий проход, выполнение технологических прихваток и предварительную обработку. При разработке программы необходимо учитывать изменяемые параметры режима сварки, такие как ток и напряжение на дуге, температурный баланс, условия окружающей среды (включая порывы ветра и влажность).

Определение математических моделей с использованием макета Matlab Simulink основано на учете физических процессов, происходящих в устройствах, количественных связей между переменными состояниями, которые характеризуют внешние воздействия (управляющие переменные), параметров устройств, определяемых факторами, влияющими на сварочную дугу:

$$Q = P_{им} T_{им} = m_{кз} c_{кз} \theta_{кз} + (m_{зо} + m_{кз}) \gamma + m_{эд} c_{эд} \theta_{зо} + \gamma_э (\theta_{кз} [\theta_c] + \gamma_д (\theta_{зо} - \theta_{ср})), \quad (1)$$

где Q – затрачиваемое тепло для переходного расплава капли, Дж; $P_{им}$ – мощность импульса дуги, Вт; $T_{им}$ – время импульса дуги, с; $m_{кз}$ – масса капли при переносе в сварочную ванну, кг; $c_{кз}$ – удельная теплоемкость металла в капле; $\theta_{кз}$ – температура плавления электродного металла при переходном режиме, °С; $m_{зо}$ – масса активного пятна горящего под дугой, кг; γ – удельная теплота плавления капли и активного пятна в зоне термического влияния; $m_{эд}$ – масса дуги в дуговом промежутке, кг; $c_{эд}$ – удельная теплоемкость дуги; $\theta_{зо}$ – температура плавления (горения плазмы) активного пятна, °С; $\gamma_э$ – условная температура электрической дуги в подповерхностном пространстве, °С; θ_c – среднее значение воздействия теплоты дуги на рассчитываемые параметры режима, Дж; $\gamma_д$ – удельная теплота активного пятна в центральной точке без учета теплопередачи, Дж; $\theta_{ср}$ – теплота рассеяния в окружающую среду по средствам конвекции, теплопередачи, теплопроводности, Дж (Савчук и др., 2023).

Количество теплоты Q_T , Дж, выделяемое при электросварке, определяется соотношением

$$Q_T = \int_0^{t_{св}} I_{св}^2(t) R_{св} dt, \quad (2)$$

где $R_{св}$ – сопротивление участка "электрод – электрод", Ом; $t_{св}$ – продолжительность сварочного импульса, с; $I_{св}$ – сварочный ток, А.

Соотношение (2) показывает, что управлять процессом сварки можно посредством изменения тока и продолжительности сварки. Сварочный ток регулируется в процессе изменения: 1) напряжения во вторичной цепи сварочного трансформатора с помощью переключателя ступеней (грубая регулировка); 2) угла управления тиристорных контакторов. Регулирование временем сварки также определяется уравнением (2) (Решанов, 2018).

Отклонения напряжения влияют на многие методы сварки (точечную, рельефную, шовную). Сварочный технологический процесс для каждого из этих типов сварочных машин практически аналогичен, поэтому влияние отклонений напряжения будет примерно одинаковым.

Данные способы сварки включают импульсы тока продолжительностью 2–16 периодов. Отклонение сварочного напряжения $U_{св}$, В, приводит к изменению сварочного тока $I_{св}$, А, в отдельно взятом цикле (время сварки $t_{св} = \text{const}$), определяемому уравнением

$$Q_T \in I_{св}^2 = U_{св}^2. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса для точки активного пятна имеет вид

$$Q_T = Q_{T1} + Q_{T2} + Q_{T3}, \quad (4)$$

где параметры Q_{T1} – теплота, затрачиваемая на нагрев до температуры плавления столбика металла высотой 2δ (диаметр основания d_n), Дж; Q_{T2} – теплота, расходуемая на нагрев металла в виде кольца шириной X_2 , окружающего литое ядро, до средней температуры $Q_{пл}/4$, Дж; Q_{T3} – теплота в электродах, затрачиваемая на нагрев условного цилиндра высотой X_3 до средней температуры $Q_{пл}/8$, Дж (Савчук и др., 2023).

Элементы, являющиеся частью теплового баланса в профиле, рассчитываются так:

$$Q_T = I_{св}^2 K_1 R_{дк} t_{св}, \quad (5)$$

$$Q_{т1} = 0,5\pi d_{я}^2 \delta C_{д} \gamma_{м} \Theta_{пл}, \quad (6)$$

$$Q_{т2} = 0,5\pi K_2 X_2 (d_{я} + X_2) \delta C_{д} \gamma_{м} \Theta_{пл}, \quad (7)$$

$$Q_{т3} = 0,062\pi K_3 d_{я}^2 X_3 C_3 \gamma_3 \Theta_{пл}, \quad (8)$$

где K_1 , K_2 и K_3 – вспомогательные коэффициенты, учитывающие такие параметры, как время сварки, материал деталей и электродов; $R_{дк}$ – активное сопротивление деталей (материала), Ом; $C_{д}$ – удельная теплоемкость дуги в дуговом промежутке, Дж/(кг·К); δ – толщина материала в свариваемой зоне, мм; C_3 – удельная теплоемкость свариваемого материала, Дж/(кг·К); $\gamma_{м}$ – удельная теплопроводность свариваемого материала, ккал/(м²·ч·°С) (*Савчук и др., 2023*).

Температурный профиль сварочного цикла, который представляет собой комплексную характеристику процесса сварки, определяется типом материала и толщиной деталей. Он включает поэтапное повышение температуры до значения предварительного нагрева; выдержку при этой температуре; нагрев до максимальной температуры, превышающей точку плавления материала; короткую выдержку при пиковой температуре и последующее охлаждение.

Решая совместно уравнения (5)–(8), получаем следующее выражение:

$$\Theta = I_{св}^2 \frac{16K_1 R_{дк} t_{св}}{\pi [8d_{я}^2 \delta C_{д} \gamma_{м} + 8K_2 X_2 (d_{я} + X_2) \delta C_{д} \gamma_{м} + d_{я} K_3 X_3 C_3 \gamma_3]}. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) при его сопоставлении с уравнением (1) позволяет обнаружить изменения температуры плавления металла при изменении сварочного тока и построить зависимости $\Theta = f(I_{св})$ для точечной сварки различных металлов. Определив значения $\Theta = f(I_{св})$ и допустимых пограничных температур, можно установить соответствующие отклонения сварочного тока $\Delta I_{св}$ и напряжения в сети, приняв $U_{св} = I_{св}$.

Допустимые отклонения сварочного тока при точечной сварке малоуглеродистой стали различных толщин и коррозионностойкой стали определены с учетом граничных температур (*Лебедев, 2014*) и указаны в нормативных документах. В табл. 1 приведены допустимые отклонения сварочного тока, которые необходимо соотнести с результатами, полученными в ходе исследования.

Таблица 1. Допустимые отклонения сварочного тока
Table 1. Permissible deviations of welding current

δ , мм	$t_{св}$, с	I_{min} , кА	I_{max} , кА	$I_{ном}$, кА	$\Delta I_{св}$, %
Малоуглеродистая сталь					
0,8	0,8	7,7	9,55	8,62	-10,7 ÷ 10,8
0,8	0,12	7,0	8,65	7,85	-10,6 ÷ 10,2
0,8	0,3	5,8	7,2	6,54	-11,3 ÷ 10,1
1,0	0,08	8,85	11,06	9,9	-10,6 ÷ 11,72
1,0	0,16	7,55	9,35	8,4	-10,1 ÷ 11,3
1,0	0,4	6,28	7,7	7,0	-10,3 ÷ 10,0
1,5	0,14	11,2	14,1	12,6	-11,1 ÷ 11,8
1,5	0,24	9,75	12,02	10,92	-10,7 ÷ 10,07
1,5	0,5	8,36	10,3	9,35	-10,6 ÷ 10,16
2,5	0,5	11,7	14,5	13,04	-10,3 ÷ 11,2
2,5	0,8	10,6	13,2	11,86	-10,6 ÷ 11,3
Коррозионностойкая сталь					
1,0	0,2	5,0	5,5	5,22	-5,21 ÷ 5,36
1,5	0,28	6,4	7,1	6,74	-5,04 ÷ 5,34
2,0	0,34	8,26	9,12	8,7	-5,06 ÷ 5,83
3,0	0,34	9,32	10,36	9,9	-5,86 ÷ 5,65

Отклонения тока в пределах $\pm 15\%$ пропорциональны отклонениям напряжения; для малоуглеродистых сталей допустимы отклонения напряжения в пределах $\pm 10\%$ напряжения, на которое настроена сварочная машина. Это положение подтверждается экспериментальными данными.

При выходе отклонений за пределы $\pm 10\%$ может произойти брак при сварке, причем 100%-й брак сварочной продукции наблюдается при отклонениях напряжения, выходящих за пределы $\pm 15\%$. Для коррозионностойких сталей рекомендуются допустимые отклонения напряжения $\pm 5\%$ (*Юхин, 2008*).

Аналогичные пределы допустимы для жаропрочных и титановых сталей и сплавов. В результате исследований установлено, что при сварке металлов из данных материалов брак наблюдается при отклонениях напряжения, превышающих 10 %.

Отклонения напряжений аналогично влияют и на стыковую сварку сопротивлением. В процессе сварки с использованием сопротивления электрический ток проходит через предварительно сжатые концы, что приводит к нагреванию большой области металла. Сжатие концов происходит с постоянным или резким увеличением давления, которое в итоге снижается после выключения тока. Температура в стыке может быть рассчитана как результат совместного действия теплоты, выделяемой в свариваемых деталях и в контакте между ними:

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2,$$

$$Q_1 = (K_4 \rho_d I_{св}^2 t_{св}) / (\gamma_m C_d F_d^2), \quad (10)$$

$$Q_2 = (g_c \sqrt{t_{св}}) / (F_d \sqrt{\pi \gamma_m C_d \lambda}), \quad (11)$$

где K_4 – вспомогательный коэффициент, учитывающий потери теплоты при лучеиспускании и через губки держателей деталей; λ – длина волны при сварочном излучении, м; p_d – мощность дуги, Вт; F_d – частота волны при сварочном излучении, Гц.

Среднее количество теплоты, выделяемое в секунду в контакте между деталями, находится по формуле

$$g_c = K_1 I_{св}^2 R_k, \quad (12)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий изменение контактного сопротивления в процессе нагрева стыка, $K_1 \approx 0,4$; R_k – активное сопротивление контактов.

При сварке изделий из определенного металла заданного сечения (*Карасев и др., 2004*) основными факторами, влияющими на температуру стыка, являются сварочный ток $I_{св}$ и время сварки $t_{св}$. Процесс сварки в сварочных машинах сопротивлением регулируется посредством систем автоматического управления замкнутого типа, основанных на принципе обратной связи и контролирующей продолжительность воздействия тепла. В этих системах при уменьшении (увеличении) сварочного тока разнонаправленно увеличивается (уменьшается) время сварки, так как при постоянном давлении, прикладываемом к свариваемым деталям, их осадка произойдет только при достижении на торцах определенной температуры, близкой к температуре плавления (*Савчук и др., 2023*).

На основе уравнений (5)–(9) получим зависимости температур в месте стыка от тока сварки прутков различных диаметров из малоуглеродистой стали, свидетельствующие о том, что при отклонениях напряжения в пределах ± 10 % напряжения, подобранного для качественной сварки, брака при сварке изделий из малоуглеродистой стали не наблюдается. Однако указанные отклонения приводят к изменению времени сварки и тем самым влияют на производительность сварочных машин, что было выявлено в ходе аттестации технологии сварки 20 изделий и анализа 500 заваренных образцов различных диаметров на базе производственной компании НПК "Эталон" (Ростовская область, г. Волгодонск).

Сварка непрерывным оплавлением подвержена влиянию отклонений напряжения. При сварке оплавлением детали, на которые подается напряжение, испытывают небольшое давление на своих краях. В результате этого давления в отдельных точках возникают электрические контакты, которые имеют значительное сопротивление из-за отсутствия сжимающей силы. При прохождении большого сварочного тока через этот контакт металл быстро плавится, образуя жидкие соединения между торцами. Эти соединения взрывообразно разрушаются, выбрасывая металлические частицы из стыка. Образующиеся частицы и пары металла предотвращают окисление торцов. Тонкий слой расплавленного металла появляется на торцах и прогревает детали по всей длине; затем он сжимается силой вдоль оси (осаживается). В результате этого процесса расплавленный металл выходит из дугового зазора, а нагретый таким образом металл, находящийся ниже зазора, подвергается пластической деформации давлением и сваривается (*Решанов, 2018*).

Вольтамперные характеристики (ВАХ), играющие ключевую роль в управлении при автоматизированной сварке в среде защитных газов (инертных, активных), представлены на рис. 2. Для обеспечения стабильного процесса сварки изменение этих характеристик должно находиться в пределах 0,01–0,02 В/А. При этом отсутствие необходимости в высоком напряжении холостого хода является важным преимуществом. При таком процессе следует использовать ток короткого замыкания, приблизительно равный двукратному номинальному току ($2I_{ном}$) как для минимальной, так и для максимальной характеристик. Важно отметить, что режим короткого замыкания должен применяться кратковременно, например, при капельном коротком замыкании (струйном переносе) или при инициализации дуги в начале сварочного процесса. Определение значений напряжений $U_{мин}$ и $U_{макс}$ может быть осуществлено с помощью формулы $U_{ном} = 14 + 0,055I_2$ или при обращении к таблице, касающейся контрольных режимов испытания сварочных свойств источников

питания (в соответствии с требованиями Национального агентства контроля сварки, НАКС) и указанной в соответствующих отраслевых стандартах.

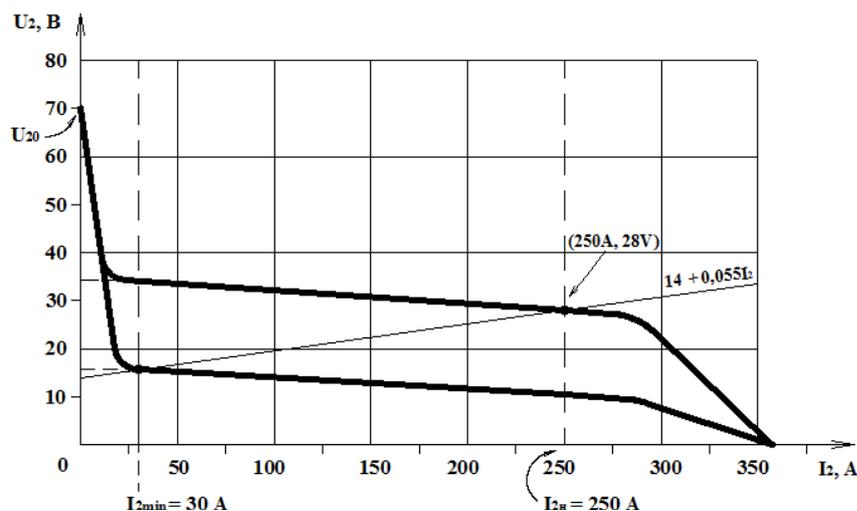


Рис. 2. Статические ВАХ инверторного источника питания
Fig. 2. Static VAC of inverter power supply

Для обеспечения статических ВАХ (рис. 2) следует применять четко выверенные параметры, в том числе расчетные данные трансформатора (Пармонов, 2011).

Для согласования входных и выходных напряжений трансформатора посредством плавной регулировки частоты используются преобразовательное звено повышенной частоты (ПЗПЧ) и источник питания (ИП) с возможностью использования модуляции их параметров для выверки режимов работы оборудования. ПЗПЧ и ИП необходимы при передаче переменного тока из сети и его выпрямлении в постоянный ток, который уже используется в виде сварочной нагрузки. Параметры U , I , f , B_m являются ключевыми характеристиками инверторных источников питания сварочных установок, работающих в различных режимах, а также конструкции сварочного аппарата в целом (Линькольд и др., 2011). Стержневой тип трансформатора (рис. 3), используемый в инверторах, обладает рядом преимуществ. Его компактные габариты достигаются за счет рационального расположения обмоток на двух стержнях магнитопровода, способствующего эффективному охлаждению. Технология изготовления данного типа трансформаторов хорошо отработана, что упрощает его производство.



Рис. 3. Эскиз стержневого типа трансформатора
Fig. 3. Sketch of the transformer core type

Характеристики трансформатора зависят от параметров нагрузки, к которым в рассматриваемом случае относятся выходной выпрямитель и подключенное на него в виде этой нагрузки активное сопротивление. Данные параметры оказывают значительное влияние на методику расчета потерь мощности в трансформаторе (Козлов и др., 2014).

Расчет теплового режима сварочного трансформатора предполагает определение параметров, которые обеспечат предотвращение перегрева и позволят рассчитать эффективность элементов охлаждения. Ключевым моментом является соблюдение баланса между мощностью потерь в трансформаторе и эквивалентом мощности, отводимой им в окружающую среду. Для построения сварочных процессов следует получить информацию о необходимых конструктивных характеристиках и тепловых параметрах трансформатора; характеристиках системы охлаждения с указанием постоянной температуры и допустимых значений параметров.

Предположим, что температура внутренних компонентов трансформатора находится в пределах допустимых значений и является однородной, а параметры окружающей среды также удовлетворяют установленным требованиям. Для выбора оптимальных вентиляторов охлаждения необходимо знать

коэффициенты теплопередачи с поверхности обмоток, геометрические характеристики канала между обмотками и расстояние от первичной обмотки до сердечника. Ввиду предположения о постоянстве температуры во всех элементах трансформатора и равномерном распределении потерь, температурный режим в отдельных точках будет зависеть от эффективности теплоотдачи, которую можно регулировать путем изменения размеров или формы канала между обмотками. Важно учитывать тот факт, что величина активных потерь в трансформаторе не должна превосходить его способность отдавать тепло окружающей среде. Сделаем допущение о том, что теплообмен между трансформатором и средой осуществляется исключительно посредством конвекции, поскольку теплопроводность пренебрежимо мала вследствие минимального контакта с корпусом.

Указанные допущения могут привести к погрешности в диапазоне 1–3 % (Володин, 2014). Однако они значительно упрощают процесс расчета, что удобно компенсировать увеличением запаса по мощности.

Пакет программных модулей Schneider Electric предлагает возможность создания эскиза сварочного трансформатора с двумя вторичными обмотками. Программа позволяет при уже настроенном процессе автоматически рассчитывать высоту обмотки, количество слоев и размеры магнитопровода при заданных параметрах. В целях упрощения расчета предположим, что число витков в каждом слое обмотки идентично, а высота обмотки не превосходит высоту стержня. Данное условие распространяется и на обмотку вторичной обмотки трансформатора. Такой подход обеспечивает быструю перенастройку параметров при изменении исходных данных. При этом вводимая доля погрешности из-за этих допущений не будет превышать допустимых величин.

Результатом исследования возможностей плагинов стал эскиз трансформатора (рис. 4), построенный в среде Schneider Electric и имеющий следующие параметры: 8 витков первичной обмотки трансформатора; 2 витка вторичной обмотки трансформатора; 1 слой первичной обмотки трансформатора; 2 слоя вторичной обмотки трансформатора; индуктивность намагничивания магнитопровода 0,00070961 Гн; индуктивность рассеяния магнитопровода 1,968e-6 Гн; КПД трансформатора 92,545 %; длина провода первой обмотки 1,4551 м; длина провода второй обмотки 0,47533 м; общая мощность активных потерь трансформатора 563,9 Вт; толщина провода первой обмотки 0,0051584 м; толщина провода второй обмотки 0,010315 м; масса обмоток трансформатора 1,3786 кг; масса магнитопровода трансформатора 2,7 кг; общая масса трансформатора 4,0786 кг; площадь сечения магнитопровода 0,0015 м².

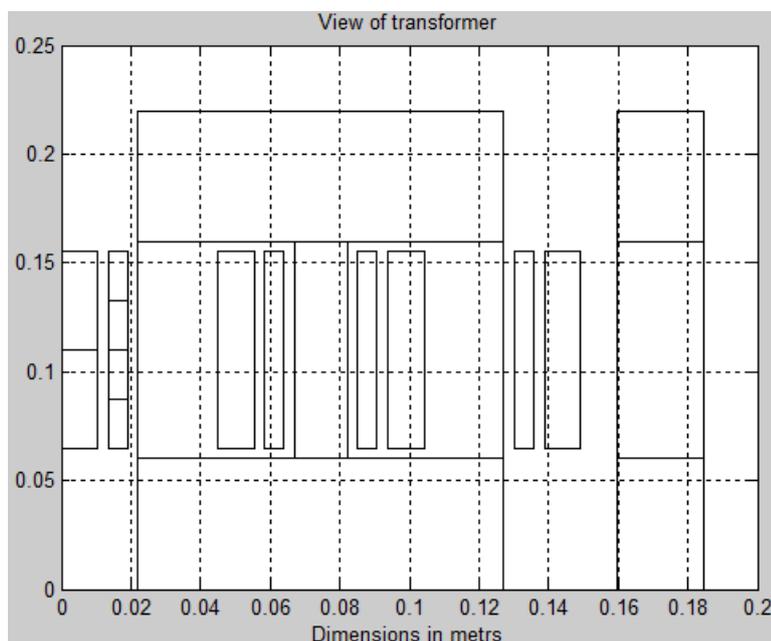


Рис. 4. Эскиз трансформатора, построенный в среде Schneider Electric
Fig. 4. Calculated and constructed in Schneider Electric transformer sketch

Анализ результатов моделирования эскиза трансформатора показывает, что расчетные погрешности находятся в допустимых пределах.

Схема замещения высокочастотного сварочного трансформатора представлена на рис. 5, где указаны следующие обозначения: r_1 – активное сопротивление первичной обмотки в типовом варианте на основе входного выпрямителя по схеме Ларионова, Ом; L_{s1} – индуктивность, характеризующая поток рассеяния первичной обмотки, Гн; L_{s2} – индуктивность, характеризующая поток рассеяния вторичной обмотки, Гн; r_0 – сопротивление активных потерь в магнитопроводе, Ом; L_0 – основная индуктивность первичной обмотки, Гн; r_2 – омическое сопротивление вторичной обмотки в звене двойного несимметричного

мостового инвертора, Ом; U_1 – входное напряжение сети питания, В; U_2 – выходное напряжение на нагрузку (сварочная дуга), В; I_1 – входной ток сети питания, А; I_2 – выходной ток на нагрузку (сварочная дуга), А; R_n – сопротивление на нагрузке (сварочная дуга), Ом.

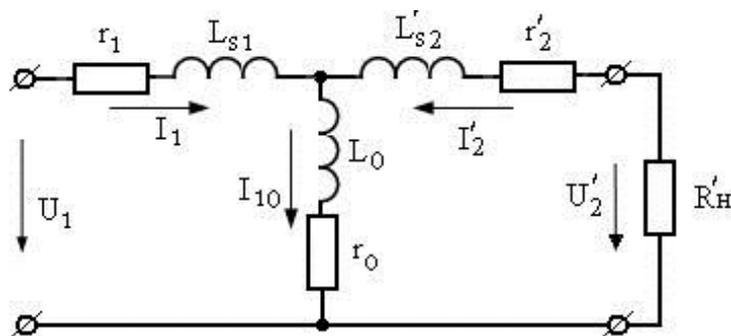


Рис. 5. Схема замещения высокочастотного сварочного трансформатора
Fig. 5. The replacement circuit of a high-frequency welding transformer

Конструкция трансформатора с несколькими вторичными обмотками, аналогичная конструкции, используемой в данном исследовании, изображена на рис. 6, где применены обозначения: Z_1 – полное сопротивление первичной обмотки в типовом варианте на основе входного выпрямителя по схеме Ларионова, Ом; Z_2 – полное сопротивление вторичной обмотки в звене двойного несимметричного мостового инвертора, Ом; L_0 – основная индуктивность первичной обмотки, Гн; r_0 – сопротивление активных потерь в магнитопроводе, Ом; $R_{н1}$ и $R_{н2}$ сопротивления на нагрузке (сварочная дуга), Ом.

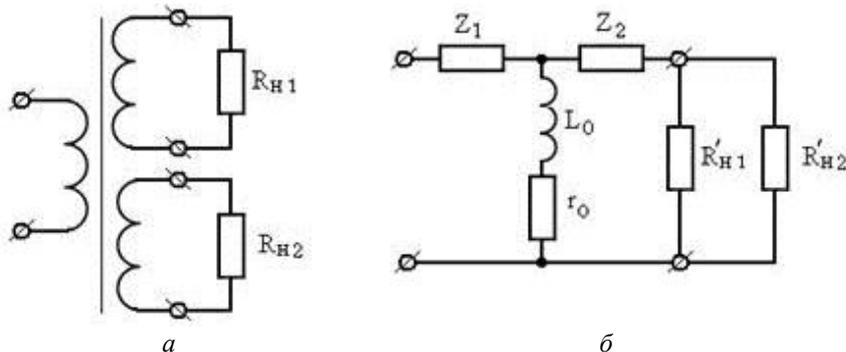


Рис. 6. Схема замещения трансформатора с двумя вторичными обмотками:
а – условное исполнение; б – подробное исполнение
Fig. 6. A transformer replacement circuit with two secondary windings:
а – the conditional execution; б – the detailed execution

Заключение

Математическая модель импульсного трансформатора разработана с использованием программного комплекса Matlab Simulink и плагинов от компании Schneider Electric.

Модель позволяет применить метод сварки STT с настройкой силовых импульсов тока с заданными параметрами и решить проблему переключения сварочных режимов в сложных рабочих сценариях; она применима для различных видов сварки (контактной, дуговой, лучевой и др.).

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы научной диссертации В. С. Савчука "Автоматизация формирования электрической дуги при электросварке труб высокого давления". Авторы благодарят кандидата технических наук И. К. Козлова за проведение консультаций, касающихся физических аспектов сварочных процессов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Володин В. В. Продвинутое источники сварочного тока // Силовая Электроника. 2014. Т. 4, № 49. С. 82–90. EDN: SKDSKP.
- Завьялов В. Е., Иванова И. В., Кобецкой Н. Г. Технология сварки плавлением. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. 484 с.

- Карасев М. В., Вышемирский Е. М., Беспалов В. И., Работинский Д. Н. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах // Автоматическая сварка. 2004. № 12(620). С. 38–41. EDN: ZRSMRV.
- Козлов И. К., Сироткин Д. Г. Исследования и разработки в области анодной сварки // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 5(107). С. 426–431. EDN: TOEZKR.
- Лебедев В. А. Механизированная и автоматическая синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 13–19. EDN: SCBWXD.
- Липпольд Д. С., Котеки Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2011. 466 с.
- Мартынов Н. О. Электропитание установок дуговой сварки в системах электроснабжения // IN SITU. 2015. № 4. С. 42–44. EDN: VCHZSL.
- Парамонов С. В. Электросварочные процессы и оборудование. СПб. : СПбГУ "ЛЭТИ", 2011. 67 с.
- Решанов В. А. Практика разработки технологии сварки плавлением при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции крупногабаритных стальных конструкций. СПб. : Любавич, 2018. 204 с.
- Савчук В. С., Плехов А. С. Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 4(24). С. 43–54. EDN: MHKDIS.
- Юхин Н. А. Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) / под ред. О. И. Стеклова. М. : Соуэло, 2008. 72 с.

References

- Volodin, V. V. 2014. Advanced sources of welding current. *Power Electronics*, 4(49), pp. 82–90. EDN: SKDSKP. (In Russ.)
- Zavyalov, V. E., Ivanova, I. V., Kobetskoy, N. G. 2018. Melting welding technology. St. Petersburg. (In Russ.)
- Karasev, M. V., Vyshemirsky, E. M., Bespalov, V. I., Rabotinsky, D. N. 2004. Features of modern installations for mechanized welding with a melting electrode in protective gases. *Avtomaticheskaya Svarka*, 12(620), pp. 38–41. EDN: ZRSMRV. (In Russ.)
- Kozlov, I. K., Sirotkin, D. G. 2014. Research and development in the field of anode welding. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 5(107), pp. 426–431. EDN: TOEZKR. (In Russ.)
- Lebedev, V. A. 2014. Mechanized and automatic synergetic welding with pulsed supply of electrode wire. *Welding Production*, 2, pp. 13–19. EDN: SCBWXD. (In Russ.)
- Lippold, D., Koteki, D. 2011. Metallurgy of welding and weldability of stainless steels. St. Petersburg. (In Russ.)
- Martynov, N. O. 2015. Power supply of arc welding installations in power supply systems. *IN SITU*, 4, pp. 42–44. EDN: VCHZSL. (In Russ.)
- Paramonov, S. V. 2011. Electric welding processes and equipment. St. Petersburg. (In Russ.)
- Reshanov, V. A. 2018. Practice of developing fusion-welding technology in the manufacture, installation, repair and reconstruction of large-sized steel structures. St. Petersburg. (In Russ.)
- Savchuk, V. S., Plekhov, A. S. 2023. Control of a welding inverter for electric welding of high-pressure pipes. *Intelligent Electrical Engineering*, 4(24), pp. 43–54. EDN: MHKDIS. (In Russ.)
- Yukhin, N. A. 2008. Mechanized arc welding with a melting electrode in protective gases (MIG/MAG). Moscow. (In Russ.)

Сведения об авторах

Савчук Владислав Сергеевич – ул. Минина, 24, Нижний Новгород, Россия, 603000; Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, аспирант; e-mail: vladsava1997@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2281-6612>

Vladislav S. Savchuk – 24 Minina Str., Nizhny Novgorod, Russia, 603000; Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, PhD Student; e-mail: vladsava1997@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2281-6612>

Плехов Александр Сергеевич – ул. Минина, 24, Нижний Новгород, Россия, 603000; Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент; e-mail: aplehov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-3295>

Alexander S. Plekhov – 24 Minina Str., Nizhny Novgorod, Russia, 603000; Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: aplehov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-3295>

УДК 621.33

Теоретическая система уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта

А. Э. Аухадеев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
07.10.2024;

получена
после доработки
13.11.2024;

принята
к публикации
20.11.2024

Ключевые слова:

городской электрический транспорт, теория построения движения, тяговое электрооборудование, алгоритмы эффективного управления, цифровизация транспортной отрасли

Для цитирования

Цифровизация транспортной отрасли и применение технологий искусственного интеллекта при автоматизации управления ее основных процессов определяет необходимость поиска новых подходов к описанию электротехнических комплексов и систем транспортного назначения, их внутренних и внешних системных свойств и связей. В работе система общественного наземного городского электрического транспорта (ГЭТ) рассмотрена как сложный процесс преобразования, передачи и использования электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ, проявляющийся в организации управляемого движения транспортных средств (ТС) в конкретных условиях производственных задач и технологии внутригородских пассажироперевозок. На основании синергетического описания свойств, принципов организации и функционирования сложной производственно-технической системы ГЭТ управляемое движение ТС представлено как многоуровневый технологический процесс, реализуемый электротехническим комплексом ГЭТ. Доказано, что основой данного процесса, формируемого 5 иерархически выстроенными уровнями (подпроцессами), каждый из которых обеспечивает отдельную специфическую задачу построения движения ТС, является реализация алгоритмов работы тягового электрооборудования ТС. В результате сформулирована теоретическая система уровней построения движения ТС как многоуровневого процесса, идентифицированы математические модели каждого уровня, определены множества условий, характеризующих "внешние" и "внутренние" "параметры порядка", определяющие структурно-функциональные и иерархические межуровневые взаимосвязи. Результаты работы могут представлять интерес для разработчиков систем управления автономных ТС и систем помощи водителю ТС при выборе и обосновании алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования ГЭТ.

Аухадеев А. Э. Теоретическая система уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 577–590. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-577-590>.

Theoretical system of levels of constructing vehicle movement of ground urban electric transport vehicle

Aver E. Aukhadeev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Article info

Received
07.10.2024;

received
in revised form
13.11.2024;

accepted
20.11.2024

Key words:

urban electric transport, theory of motion construction, traction electrical equipment, algorithms of effective control, digitalization of transport industry

For citation

Abstract

Digitalization of the transport industry and the use of artificial intelligence technologies in the automation of control of its main processes determine the need to search for new approaches to the description of electrical complexes and systems of transport purpose, their internal and external system properties. The public ground urban electric transport system is considered as a complex process of conversion, transmission and use of electrical energy and information in the electrical complex of urban electric transport, manifested in the organization of controlled movement of vehicles in specific conditions of production tasks and technology of passenger transportation. Based on the synergetic description of the properties, principles of organization and functioning of a complex production and technical system of urban electric transport, the controlled movement of vehicles has been presented as a multilevel technological process implemented by the electrical complex of urban electric transport. It has been proved that the basis of this process, formed by 5 hierarchically arranged levels, each of which provides a separate specific task of building the movement of vehicles, is the implementation of algorithms of traction electrical equipment. A theoretical system of levels of vehicle motion construction as a multilevel process has been formulated, mathematical models of each level have been identified, and sets of conditions characterizing "external" and "internal" "order parameters" defining hierarchical interlevel interrelations have been determined. The results of the work may be of interest to the developers of control systems of autonomous vehicles and driver assistance systems during the selection and justification of algorithms for the effective control of the electrical complex of traction electrical equipment of urban electric transport.

Aukhadeev, A. E. 2024. Theoretical system of levels of constructing vehicle movement of ground urban electric transport vehicle. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 577–590. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-577-590>.

Введение

На протяжении нескольких последних лет Правительство РФ реализует инициативы, направленные на развитие городского электрического транспорта, что соответствует мировым тенденциям "возрождения" систем общественного транспорта на основе электрической тяги. Одной из наиболее значимых, предполагающей выделение на модернизацию городского электрического транспорта (ГЭТ) более 230 млрд руб., является совместная с Министерством транспорта программа Комплексного развития ГЭТ, реализуемая с 2023 г. в рамках федерального проекта "Развитие общественного транспорта" национального проекта "Безопасные качественные дороги". Основными задачами программы являются строительство и реконструкция около 700 км трамвайных путей, 97 тяговых подстанций и 11 депо, укомплектование парков предприятий ГЭТ более 600 трамваями и 300 электробусами, установка не менее 90 станций зарядки и др. (Морозов, 2022). Активная поддержка транспортной отрасли направлена, в первую очередь, на стимулирование российского производителя, что обеспечит снижение импорта готовых технических решений и предотвращение отставания технологического уровня отечественного производства от зарубежных аналогов (Шишкарёв, 2011).

Необходимо отметить, что в рамках программы Комплексного развития ГЭТ планируется реализация проекта по созданию цифровой платформы по управлению общественным транспортом, которая позволит контролировать весь процесс пассажироперевозок, осуществлять диспетчерское управление, планировать маршруты и др. Данный проект соответствует целям стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 г., в которых особое внимание уделяется цифровизации пассажирских перевозок и цифровизации управления транспортным комплексом с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) (Чеченова, 2021; Pisareva et al., 2021). Также решаются задачи цифровизации транспортных средств (ТС), для решения которых активно ведутся разработки, связанные с беспилотным общественным электротранспортом (Гузъ и др., 2023; Пролиско и др., 2018). Все это определяет востребованность новых научных исследований фундаментального и прикладного характера в области производства новых типов ТС и тягового электрооборудования (ТЭО), перспективных систем управления и др. с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) (Romanova et al., 2020; Рябченко и др., 2022).

В настоящее время общая теория и методы расчета электротехнических комплексов и систем транспортного назначения позволяют решать широкий круг задач в различных отраслях проектирования и эксплуатации ТС ГЭТ. Возрастающая актуальность исследований и разработок в области систем автоведения, помощи водителю, беспилотного управления ТС и др. с применением технологий ИИ определяет необходимость изменения существующих подходов к выбору и обоснованию режимов работы и параметров алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО ТС.

Целью научного исследования является развитие теоретических основ повышения эффективности режимов работы и алгоритмов управления ТЭО ТС за счет совершенствования представлений о принципах формирования управляемого движения ТС, являющегося результатом преобразования, передачи и использовании электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ. В данном случае управляемое движение ТС рассматривается как реализация работы последовательности режимов ТЭО, заданных водителем в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ. Научная новизна исследования заключается в рассмотрении ГЭТ как сложной производственно-технической системы и применении системно-синергетического подхода для описания принципов ее организации и функционирования (Аухадеев и др., 2019а; Аухадеев et al., 2019а).

Для достижения цели исследования был проведен анализ структурно-функциональных связей и свойств электротехнического комплекса ГЭТ, определяющего реализацию технологического процесса производственно-технической системы ГЭТ; обосновано применение концепции "уровней построения движения", реализующей принципы организации работы мозга человека, на основании которой разработана теоретическая система уровней построения движения ТС ГЭТ; разработаны математические модели для каждого уровня построения движения, а также определены параметры и ограничения, характеризующие их "внешние" и "внутренние" системные свойства и взаимосвязи.

Теоретические основы

В зависимости от решаемых научных и практических задач исследователи относят систему ГЭТ к разным видам и их сочетаниям: к технической, производственной, организационной, экономической, эргатической, социально-технической, производственно-экономической и др. (Якимов, 2008; Михальченко и др., 2017). Интерпретация системы ГЭТ с позиций современной синергетической методологии, основы которой разработал и сформулировал как новую научную парадигму немецкий математик Герман Хакен (он же ввел и термин "синергетика" (Хакен, 1980)), послужит решению актуальной проблемы получения адекватной модели ГЭТ как сложноорганизованной системы (Kashapov et al., 2019; Аухадеев, 2014).

В отечественной научной литературе уже делаются попытки описать транспортные системы в терминах открытых сложноорганизованных систем и синергетики, а также определить сферу проблем теоретического и практического характера, которые можно при этом решать (Вельможин и др., 2011; Сечкарев, 2011). Вместе с тем опыта подобного рассмотрения системы ГЭТ в ходе исследования выявлено не было.

Методологическая значимость представления ГЭТ как открытой сложноорганизованной системы заключается в том, что основные процессы функционирования такой системы требуют пересмотра подходов к их описанию с позиций достижения современной науки. В частности, необходимо учесть синергетическое взаимодействие внутри системы ГЭТ с внешней средой, проявляющееся в специфических свойствах и воздействии на процесс формирования и реализации управляемого движения ТС множества случайных факторов, определяющих в конечном итоге параметры режимов работы ТЭО.

Все вышесказанное определяет необходимость развития методологических представлений о процессе преобразования, передачи и использовании электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ в управляемое движение ТС, реализуемое в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ.

Методы исследования

Функционирование электротехнического комплекса ГЭТ в конкретных условиях транспортной работы и технологии перевозок в системе ГЭТ является сложным процессом, выражающимся в управляемом движении ТС и зависящего от множества параметров (тип ТЭО, условия движения, мастерство водителя, расписание движения и др.). Исследование особенностей построения данного технологического процесса, анализ его системных свойств и связей позволит развить общую теорию электротехнических комплексов и систем транспортного назначения в целом и методы выбора и обоснования алгоритмов эффективного управления ТЭО в частности (Aykhadeev et al., 2019b).

Процесс формирования управляемого движения ТС как результата функционирования электротехнического комплекса ГЭТ можно условно разделить на составляющие: "электротехническую" и "механическую". "Электротехническая" составляющая процесса связана с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии и электротехнической информации в электротехническом комплексе ГЭТ, следовательно, определяется структурой этого комплекса и применяемой системой электрической тяги. Будем условно называть его "электротехнический процесс".

Имеется возможность иерархически выделить 5 подпроцессов, определяющих уровни организации электротехнического комплекса ГЭТ (рис. 1, а) в части системы тягового электроснабжения (Сонов, 2013), а именно:

- 1) *уровень тягового электрооборудования* ($U_{ТЭО}$) – включает тяговый электродвигатель (ТЭД) или группу взаимосвязанных (электрически и механически) ТЭД, являющихся основным электроприемником, преобразующим электрическую энергию в механическую энергию движения ТС;
- 2) *уровень секции контактной сети* ($U_{КС}$) – определяет процессы распределения (связанные с ним потери и др.) электрической энергии от стационарной тяговой подстанции (ТП) до движущегося ТС ГЭТ и решает важную задачу обеспечения стабильного токосяема при любых условиях эксплуатации;
- 3) *уровень РУ постоянного тока* ($U_{ПТ}$) – устанавливает процессы распределения электроэнергии и взаимодействия ТС через КС, находящихся в одной подстанционной зоне;
- 4) *уровень РУ переменного тока среднего напряжения* ($U_{СН}$) – формирует процессы преобразования электроэнергии;
- 5) *уровень РУ высокого напряжения* ($U_{ВН}$) – указывает процессы распределения электроэнергии и взаимодействия с внешней энергосистемой.

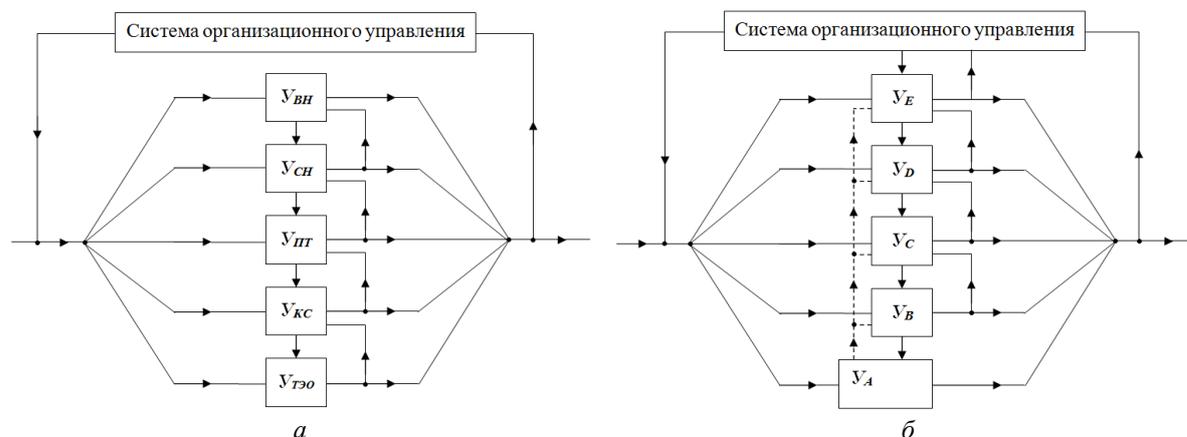


Рис. 1. Структуры процессов электротехнического комплекса ГЭТ:
а – электротехнического; б – механического

Fig. 1. Structures of processes of the electrical engineering complex of urban electric transport:
а – electrical; б – mechanical

Анализ подпроцессов, реализуемых на каждом уровне показывает, что все они происходят параллельно, но каждый уровень решает свою специфическую задачу. При этом наблюдается строгая иерархия, при которой результаты выполнения подпроцесса на более высоком иерархическом уровне являются условиями для выполнения подпроцесса на более низком при условии их непрерывного взаимодействия и подчинения условиям задачи общего "электротехнического процесса". Подпроцесс вышестоящего уровня невозможен без реализации подпроцесса на нижестоящем, так как фактически включает его в себя, при этом решая иную задачу (рис 1, а). Иерархия процессов, вступая во взаимосвязи, формируют систему "электротехнического процесса", подчиняясь, в общем случае, системе организационного управления транспортного производства (рис. 1, а), формирующей контроль и управление в рамках общих производственных задач ГЭТ, таких как обеспечение эффективного использования электроэнергии, экологической совместимости с окружающей средой, бесперебойное энергоснабжение и др.

"Механическая составляющая" технологического процесса, реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ, связана с формированием механического движения ТС в условиях маршрутной сети, технологией транспортной работы и заданного пассажиропотока при взаимодействии с окружающей средой (план и профиль пути, дорожная обстановка, климатические и погодные условия и др.). Будем условно называть этот комплекс "механическим процессом". При этом под понятием "реализация механического движения ТС" следует понимать процесс создания электрической тяги, ее управление и регулирование посредством задания водителем алгоритмов управления работой ТЭО в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ, что приводит к управляемому механическому перемещению ТС (Аухадеев и др., 2019б).

Согласно представленной обобщенной структурной схеме (рис. 2) можно выделить три основных вида ТС, использующие ТЭО и различающиеся по способу получения электроэнергии: 1 – контактный рельсовый и безрельсовый транспорт (трамвай, троллейбус); 2 – безрельсовый транспорт с полностью (электробусы) или частичным автономным ходом с бортовым накопителем электроэнергии (химический аккумулятор, суперконденсатор и др.); 3 – безрельсовый транспорт с бортовым источником электроэнергии (на основе теплового двигателя, топливных элементах и др.), требующий заправки энергоносителем.

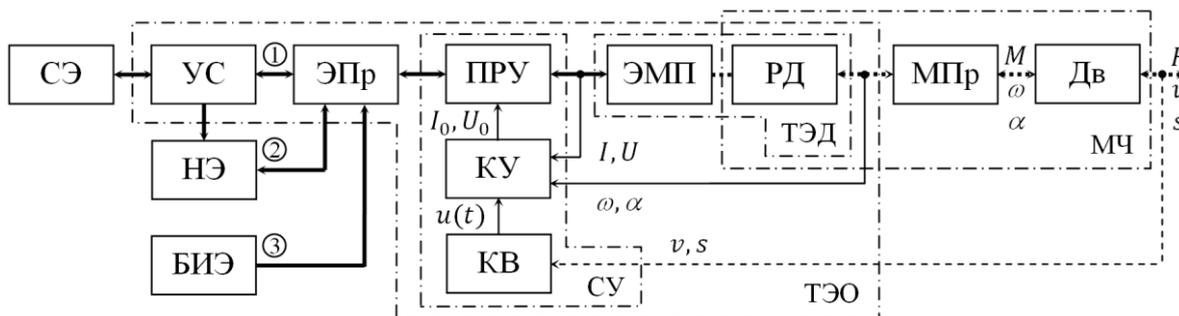


Рис. 2. Обобщенная структурная схема электротехнического комплекса ТЭО ТС:

СЭ – система электроснабжения; УС – устройство сопряжения; НЭ – накопитель электроэнергии; БИЭ – бортовой источник энергии; ЭПр – электрический преобразователь; ПРУ – пускорегулирующее устройство; ТЭД – тяговый электрический двигатель; ЭМП – электромеханический преобразователь; РД – ротор ТЭД; МПр – механический преобразователь; Дв – движитель (колеса, колесные пары и др.); КУ – контроллер управления; КВ – контроллер водителя; СУ – система управления; МЧ – механическая часть ТС

Fig. 2. Generalized structural diagram of the electrical engineering complex of vehicle traction electrical equipment: СЭ – power supply system; УС – interfacing device; НЭ – electric energy storage;

БИЭ – on-board energy source; ЭПр – electric converter; ПРУ – starting regulating device; ТЭД – traction electric motor; ЭМП – electromechanical converter; РД – rotor of traction electric motor; МПр – mechanical converter; Дв – propulsor (wheels, wheel pairs, etc.); КУ – operator's controller; КВ – driver controller; СУ – control system; МЧ – mechanical part of the vehicle

Основным элементом электротехнического комплекса ТЭО является ТЭД, представленный на схеме (рис. 2) двумя элементами: электромеханическим преобразователем энергии ЭМП и ротором тягового электродвигателя РД, на который воздействует момент двигателя M при угловой скорости ω . ТЭД в общем случае определяет вид статических и динамических характеристик ТС. Ротор РД механически жестко связан с движителем Дв (пневматическое колесо, колесная пара и т. д.) посредством механической передачи МПр. Основной задачей движителя Дв является обеспечение преобразования механической энергии РД через взаимодействие со средой в полезную работу по перемещению ТС ГЭТ.

Контроллер КУ осуществляет управление с целью обеспечения заданного режима работы ТЭО. В зависимости от типа ТЭД по каналам обратной связи на вход КУ поступают сигналы, характеризующие текущий режим работы ТЭО (значения токов I , напряжений U , магнитного потока Φ , угловой скорости ω и угла поворота α ротора и др.). На выходе КУ формируются управляющие алгоритмы работы ПРУ, обеспечивающие реализацию требуемого режима работы ТЭД. Данные алгоритмы работы формируются на этапе проектирования ТЭО для определенного типа ТС под конкретные условия эксплуатации. Водитель на основании анализа получаемой обратной связи по скорости v и положению s ТС с помощью изменения положения ручки (трамвай) или педали (троллейбус) контроллера водителя КВ задает продолжительность и последовательность данных алгоритмов управляющим воздействием $u(t)$.

Управление угловой скоростью ω ротора РД обеспечивается посредством регулирования момента M согласно уравнению движения электропривода

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \quad (1)$$

где $J_{\Sigma} = J_{РД} + J_{МПр} + J_{Дв} + J_{ТС}$ – суммарный момент инерции; $J_{РД}$, $J_{МПр}$, $J_{Дв}$, $J_{ТС}$ – момент инерции ротора РД, механической передачи МПр, двигателя Дв и момент инерции, определяемый массой ТС соответственно; M_c – статический момент, определяемый моментом сопротивления, в том числе и от внешней силы сопротивления движению ТС W ; α – угол поворота ротора.

Регулируемый момент ТЭД M при угловой скорости ω формирует управляемую силу F_k при движении ТС с линейной скоростью v , которые определяются следующим образом:

$$F_k = \frac{2 \cdot \mu}{D_k} M \eta_{мп}, \quad v = \frac{1,8 \cdot D_k}{\mu} \omega, \quad (2)$$

где μ – передаточное число механической передачи; $\eta_{мп}$ – к.п.д. механической передачи; D_k – диаметр движущих колес.

С учетом этого выражение (1) может быть преобразовано в уравнение движения ТС соответственно в "первой форме" и во "второй форме" (Бирюков и др., 2022):

$$\frac{(1+\gamma)}{\xi} m \frac{dv}{dt} = F - W, \quad (3)$$

$$\frac{(1+\gamma)}{\xi'} m v \frac{dv}{ds} = F - W, \quad (4)$$

где m – фактическая масса ТС; $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей; s – координата пути ТС; ξ , ξ' – переводные коэффициенты.

Выражения (3) и (4) определяют зависимости $v(t)$ и $v(s)$, называемые "кривые движения" ТС (рис. 3) и описывающие режимы движения транспортного средства ГЭТ: тяговый режим ($0; s_p$], режим выбега ($s_p; s_T$] и режим торможения ($s_T; S$]).

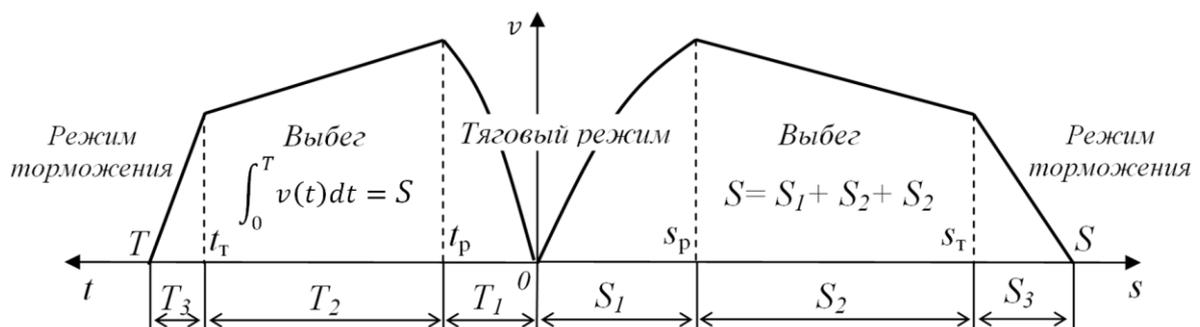


Рис. 3. "Кривые движения" $v(t)$ и $v(s)$ во взаимосвязи:

$S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3$ – протяженность и продолжительность участков разгона, выбега и торможения соответственно; t_p – время разгона; t_T – время начала торможения; s_p – координата окончания участка разгона; s_T – координата начала участка торможения; T – время хода на перегоне; S – длина перегона

Fig. 3. "Motion curves" $v(t)$ and $v(s)$ in interrelation:

$S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3$ – length and duration of acceleration; coasting and braking sections respectively; t_p – acceleration time; t_T – braking start time; s_p – coordinate of acceleration section end; s_T – coordinate of braking section start; T – distance travel time; S – distance length

Согласно ГОСТ 19350 "Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения"¹ выделяют следующие режимы работы ТЭО, соответствующие режимам движения ТС: тяговый режим (0; t_p] – при различных уровнях возбуждения и режим торможения (t_r ; T] – с разными видами типов торможения и уровня возбуждения. Этим режимам соответствуют характерные режимы работы ТЭД, определяемые в общем случае выражением (1).

Водитель ТС посредством контроллера водителя КВ (рис. 2) задает структуру и параметры (последовательность и продолжительность режимов, определяемых t_p , t_r и T) алгоритма управления электротехническим комплексом ТЭО, таким образом формируя определенные реализации движения ТС на заданном участке пути (рис. 3). Выбор водителя, предопределенный его опытом и квалификацией, формируется под влиянием множества эксплуатационных факторов, в том числе и случайных, характеризующих реальные дорожные условия и технологию перевозочного процесса.

Очевидно, что "механический процесс" реализации движения ТС по аналогии с "электротехническим процессом" также является сложной многоуровневой системой технологического процесса, реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ. Следовательно, процесс управляемого движения ТС ГЭТ может быть в общем случае представлен совокупностью подпроцессов, реализуемых на иерархически выстроенных уровнях общего "механического процесса". Для описания таких уровней воспользуемся концепцией "уровней построения движения", используемой академиком Д. Е. Охочимским в работах по динамике космического полета, робототехнике и мехатронике (Платонов, 2010). Данная концепция реализует принципы организации работы мозга человека при выполнении спортивных, трудовых и других движений, которые были изучены и сформулированы выдающимся советским биомехаником Н. А. Бернштейном в его научном труде "О построении движений" (Бернштейн, 1947).

Такой подход при изучении управляемого движения ТС ГЭТ соответствует современным тенденциям заимствования биологических аналогий при исследовании работы сложных технических систем. Следует отметить, что прототипом искусственных нейронных сетей, активно применяющихся во многих технологиях ИИ и утвержденных для транспортной отрасли, являются именно биологические нейронные сети человеческого мозга (Малахов и др., 2021; Сивицкий, 2021).

Согласно выбранной концепции реализация управляемого движения объектов или систем происходит в общем случае по 5 уровням ("А", "В", "С", "D", "Е"), которые называются уровни построения движения. Описание принципов построения движения на каждом уровне и интерпретация в данном контексте уровней построения "механического процесса", его иерархическое выстраивание, параллельность и взаимосвязь при реализации на каждом уровне ($У_A$, $У_B$, $У_C$, $У_D$, $У_E$), а также подчиненность системе "организационного управления" транспортного производства (рис. 1, б), формирующей контроль и управление в рамках общих стратегических задач ГЭТ, подробно представлены в серии работ автора (Аухадеев et al., 2019b; Аухадеев, 2014; Аухадеев и др., 2019a).

Результаты и обсуждение

Процесс функционирования электротехнического комплекса ГЭТ невозможно однозначно разделить на "механическую" и "электротехническую" составляющие, но схожесть их структур и механизмов работы позволили сформулировать теоретическую систему уровней построения движения ТС ГЭТ, включающей 5 уровней $У_1 - У_5$ (рис. 4).

Уровни выстраиваются в соответствии с иерархией конкретных специфических задач, решаемых параллельно. Процесс каждого уровня непрерывно формируется вышестоящим уровнем и подчиняется условиям задачи общего процесса ("параметрам порядка"). Основным условием реализации управляемого движения транспортного средства ГЭТ является обмен энергетическими R_E (тепловая, электрическая и др. энергия), материальными R_M (в т. ч. финансовыми и кадровыми) и информационными R_I (инструкции, нормы и др.) ресурсами между уровнями и внешней средой.

1. *Уровень формирования ресурсного обеспечения ($У_1$).* Первый уровень является определяющим для всех остальных уровней, так как обеспечивает возможность (посредством ресурсного обеспечения) реализации процесса функционирования всего электротехнического комплекса ГЭТ. Ресурсное обеспечение в общем случае определяется методами и средствами приема, преобразования и распределения энергии электротехническим комплексом ГЭТ, его технологическим уровнем, наличием резерва по мощности, материальным и техническим обеспечением, а также квалификацией обслуживающего персонала. На данном уровне не происходит непосредственного процесса движения ТС, а формируется его готовность путем

¹ ГОСТ 19350. Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/36531/?ysclid=m40y9n53bb978564400>.

стабильного и надежного энергетического (R_E) и технического (R_M) обеспечения с заданными показателями (R_I), реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ.

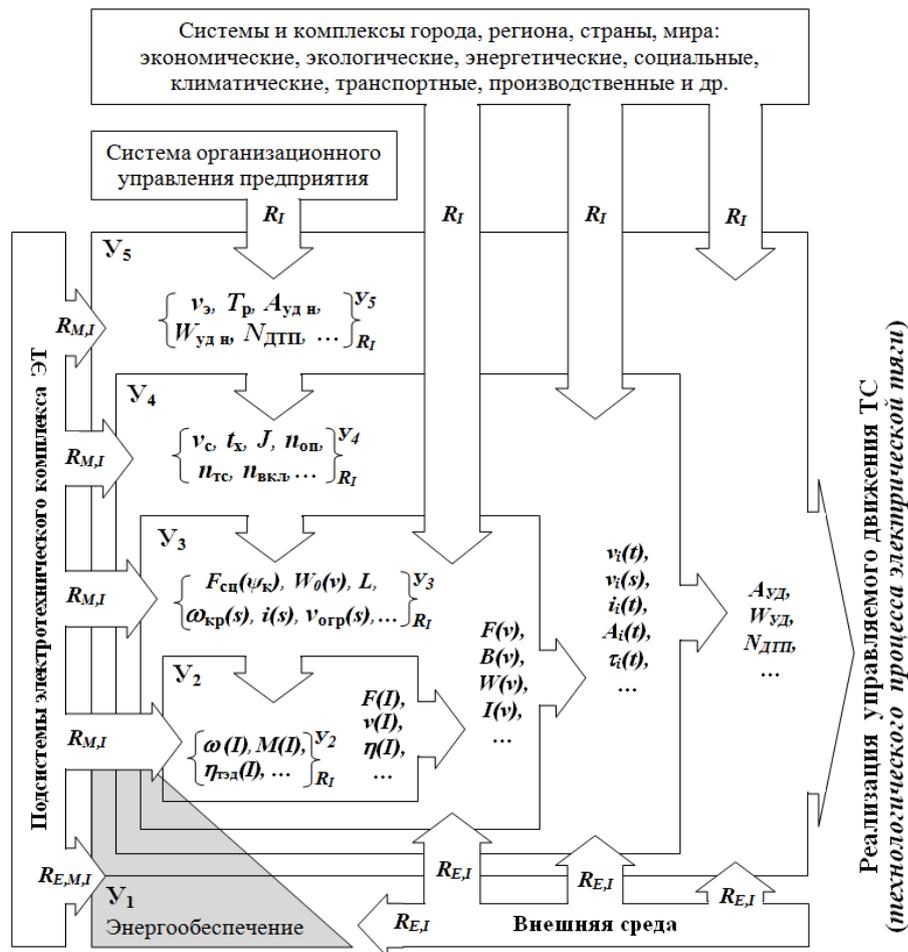


Рис. 4. Система уровней построения процесса движения ТС:
 $U_1 - U_5$ – уровни построения движения; $R_{M,E,I}$ – обмен соответственно материальными, энергетическими и информационными ресурсами
 Fig. 4. System of levels of construction process of vehicle movement:
 $U_1 - U_5$ – levels of movement construction; $R_{M,E,I}$ – exchange of material, energy and information resources, respectively

Энергообеспечение процесса движения ТС осуществляется посредством системы тягового электроснабжения (СТЭ) – сложным электротехническим комплексом с иерархической структурой (рис. 3). Критериями энергообеспеченности могут быть выбраны достаточная мощность (определяемая мощностью тяговой подстанции (ТП) $P_{ТПд}$, обслуживающей i -й участок) и стабильность параметров СТЭ (характеризуемая отклонением напряжения ΔU в контактной сети (КС)).

Достаточная мощность тяговой подстанции $P_{ТПд}$ определяет также предельную пропускную способность участка, которая в общем случае зависит от коэффициента α_n , характеризующего оперативную готовность элементов электротехнического комплекса ГЭТ в данный момент времени t_1 находиться в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнять требуемую функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) . Таким образом, коэффициент α_n характеризует состояние и надежность функционирования системы ГЭТ и может быть выбран в качестве критерия технического обеспечения. Модель уровня U_1 построения движения ТС в общем случае может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{кc}(t, s, \theta) = U_{ном} - \Delta U(s, n, I_{тc}) \\ P_{ТПд} > K_2 \sum_1^{N(\alpha_n)} P_{тc} \\ \alpha_n = \prod_1^m K_{o.g.i}(t_1, t_2) \end{cases}, \quad (5)$$

где $U_{ном} = M[U_{ТП}(t, P_{ТПд}, \theta)]$ – номинальное напряжение на шине ТП, В; $P_{ТПд}$ – достаточная мощность ТП, кВт; $\Delta U(s, n, I_{тc})$ – отклонение напряжения, В; n – число ТС, находящихся в подстанционной зоне; $P_{тc}$ –

мощность ТС, кВт; $N(\alpha_n) \rightarrow N_{\text{норм}} \leq N_{\text{max}}$, $N_{\text{норм}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{J}$ – пропускная способность участка

маршрута движения ТС в нормальных условиях эксплуатации; $t_{\text{техн}}$ – продолжительность свободного от ТС промежутка времени, предоставляемого для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств, сооружений и т. д.); J – интервал следования ТС, с; K_2 – коэффициент энергопотребности; $K_{\text{ог}}(t_1, t_2)$ – коэффициенты оперативной готовности m элементов электротехнического комплекса ГЭТ; θ – совокупность случайных факторов.

В общем случае напряжение на шинах тяговой подстанции $U_{\text{тп}}$ является случайной величиной, зависящей от мощности $P_{\text{тп}}$, времени суток t и ряда случайных факторов θ . В этом случае значение $U_{\text{норм}}$ будет иметь смысл математического ожидания напряжения $U_{\text{тп}}(t, P_{\text{тп}}, \theta)$. Величина $U_{\text{кв}}$ определяется потерями в тяговой сети, зависящими от числа ТС n на секции подстанционной зоны и токов ТС $I_{\text{тс}}$, формирующих ток линии (фидера), которые в реальных условиях эксплуатации являются случайными.

2. Уровень построения алгоритмов работы электротехнического комплекса ТЭО (Y_2) является "основой" процесса управляемого движения ТС. Уровни $Y_3 - Y_5$ фактически только задают условия для уровня Y_2 , на котором формируются основные характеристики (тепловые, электромеханические, энергетические и др.) процесса электрической тяги.

Условно можно считать, что на данном уровне реализуется определенный набор "заложенных" при проектировании ТС режимов работы ТЭО, формируемый в автоматизированном режиме алгоритмами косвенной системы управления посредством задания определенных ходовых и тормозных позиций контроллера водителя КВ (рис. 2). При этом реализуются электротяговые характеристики ТС: на ободе колеса – статические $v(I)$, $F(I)$, $\eta(I)$ и динамические $v(t)$, $F(t)$ и др., однозначно определяющиеся электромеханическими характеристиками ТЭД, соответственно, статическими $\omega(I)$, $M(I)$, $\eta_{\text{тэд}}(I)$ и динамическими $\omega(t)$, $M(t)$ и др. Динамические характеристики транспортного средства ГЭТ и ТЭО определяются уравнениями движения (3) и (1). Необходимо отметить, что по аналогии с уровнем Y_B уровень Y_2 характеризует построение движения ТС в собственных координатах без взаимодействия с внешней средой (Y_3), т. е. ТС рассматривается как "закрытая система".

Если исключить влияние "внешних" сил (т. е. условно "приподнять" ТС над рельсами, чтобы пропала реакция опоры) и реализовывать одинаковые алгоритмы управления $u(t)$ посредством переключения КВ (рис. 2), то формируемые режимы ТЭО будут идентичны, но при этом движения ТС не будет. Таким образом, на уровне Y_2 решается конкретная специфическая задача для "закрытой системы" ТС, в результате которой реализуются определенные запроктированные режимы работы ТЭО.

В том случае когда ТС установлено на рельсы (или дорожное полотно), возникает "внешняя" сила сцепления $F_{\text{сц}}(\Psi_k)$, которая определяет касательную силу $F_{\text{к}}$. Появление $F_{\text{сц}}$ требует рассмотрения уже "открытой системы", характеризующейся взаимодействием ТС с окружающим пространством и его элементами, а также определяет "переход" процесса построения движения на следующий уровень Y_3 .

Реализация электротяговых характеристик осуществляется под влиянием определенных условий ("параметров порядка"): "внешних" для уровня Y_2 – множество $\left\{ \right\}_{R_i}^{Y_3}$ (сопротивление движению $W_0(v)$, сопротивление от кривых $w_{\text{кр}}(s)$ и от уклонов $i(s)$, ограничения скорости $v_{\text{огр}}(s)$ на перегоне L и др.) и "внутренних" – множество $\left\{ \right\}_{R_i}^{Y_2}$ (ЭМХ ТЭД $\omega(I)$, $M(I)$, $\eta_{\text{тэд}}(I)$ и др.), определяющих подмножество $\{ \dots \}_{\text{ТЭД}}$ и элементов ТЭО (рис. 2) (подмножества $\{ \dots \}_{\text{ПРУ}}$, $\{ \dots \}_{\text{КУ}}$, $\{ \dots \}_{\text{КВ}}$, $\{ \dots \}_{\text{ЭПр}}$, $\{ \dots \}_{\text{МПР}}$, и др.). Модель уровня Y_2 может быть представлена системой уравнений, характеризующих механическую, электрическую и тепловую работу ТЭО транспортного средства ГЭТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n (u \cdot M_i(\omega) - M_c(\Psi_k, \mu, \eta_{\text{мп}}, \theta)) \\ F_{\text{ки}} = \frac{2\mu\eta_{\text{мп}}}{D_{\text{к}}} M_i; \quad v_{\text{к}} = \omega \frac{D_{\text{к}}}{2\mu}; \quad u = u(t) \\ \frac{dA}{dt} = \sum_{i=1}^n (U_{\text{тэд}i}(U_{\text{кв}}(t, s, \theta)) \cdot I_{\text{тэд}i}(t, u)) \\ \frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_{\infty}(I_{\text{тэд}}(t, u), U_{\text{кв}}(t, s, \theta)) - \tau(t)}{T_{\text{тэд}}(I_{\text{тэд}}(t, u), U_{\text{кв}}(t, s, \theta))} \end{array} \right. , \quad \text{где } u(t) = \begin{cases} (0; 1] & \text{при } t \in (t_0; t_p] \\ 0 & \text{при } t \in (t_p; t_t) \\ [-1; 0) & \text{при } t \in [t_t; T] \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{при } \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{\text{ПРУ}}, \{ \dots \}_{\text{ТЭД}}, \{ \dots \}_{\text{МПР}}, \\ \{ \dots \}_{\text{ЭПр}}, \{ \dots \}_{\text{КВ}}, \{ \dots \}_{\text{КУ}}, \dots \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_2}$$

где $U_{\text{тэд}}$, $U_{\text{кв}}$ – напряжение на ТЭД и в контактной сети, В; $I_{\text{тэд}}$ – ток якоря ТЭД, А; $F_{\text{ки}}$ – касательная сила на ободе колеса, кН; τ – температура нагрева ТЭД, °С; $T_{\text{тэд}}$ – тепловая характеристика ТЭД; $A(t)$ – расход электрической энергии на тягу ТС, кВт·ч; $u(t)$ – управляющее воздействие, n – число ТЭД.

В общем случае величина момента сопротивления M_c зависит от параметров ТЭО и его отдельных элементов (рис. 2): коэффициента полезного действия МПр $\eta_{мп}$, коэффициента трения Ψ_k , коэффициента передачи МПр μ , а также случайной величины θ , характеризующей среду.

Управляющее воздействие $u(t)$ на данном уровне зависит только от времени t и принимает дискретные значения в интервале $u \in [-1; 1]$, где $u = 1$ при моменте $M_{ЭМ \max}$, реализуемом ТЭД в режиме тяги, а $u = -1$ при моменте $M_{ТОРМ \max}$, реализуемом ТЭД в режиме торможения.

3. *Уровень реализации механического движения ТС ($У_3$)* формирует "простое" движение ТС, которое необходимо для обеспечения перемещения по заданному участку пути S (с конкретными характеристиками) при воздействии определенных внешних факторов (климатические, погодные и др.). При этом на реализуемые режимы движения не накладываются условия или ограничения (время хода, скорость и др.), характеризующие технологический процесс перевозок. Электротехнический комплекс ТС в данном случае рассматривается как "открытая" система, взаимодействующая с внешней средой.

Если на уровне $У_2$ электрическая энергия посредством ТЭО преобразовывалась в механическую энергию вращения Дв (рис. 4), то на уровне $У_3$ происходит преобразование механической работы ТЭО в линейное перемещение ТС под действием внешней по отношению к ТС касательной силы тяги F_k , возникающей на ободе колеса/колесной пары в результате реакции опоры.

Уровень $У_3$ характеризуется воздействием на ТС внешних сил различной природы. При этом из теории электрической тяги известно, что в основном внешние силы представляют собой силы сопротивления движения W , которые, воздействуя на ТС, фактически создают через МПр момент сопротивления M_c действующий РД ТЭД (рис. 2). Таким образом, параметр θ , ранее введенный в переменную $M_c(\Psi_k, \mu, \eta_{мп}, \theta)$, определяющую реализацию режимов работы ТЭО на уровне $У_2$ в выражении (6), формируется характеристиками внешней среды, в общем случае имеющими стохастическую природу, и должен также учитываться в $W(v, \theta)$.

На уровне $У_3$ формируются алгоритмы управления ТЭО $u(t(s))$ при движении ТС по типовым участкам (прямолинейный участок, с уклоном i , с кривой R и др.) с характерными условиями (определенный уровень загрузки ТС и др.) или их комбинации. В дальнейшем "сложное" движение транспортного средства ГЭТ будет формироваться из совокупности "простых" движений по типовым участкам, на которые можно разбить весь заданный маршрут.

Управление режимами движения на уровне $У_3$ происходит так же, как на $У_2$ – посредством переключения ручки контроллера водителя КВ (рис. 2), алгоритмы управления аналогичны. Но если на уровне $У_2$ управляющее воздействие $u(t)$ являлось функцией только времени, то при линейном перемещении по участку пути определенной конфигурации необходимо рассматривать управление $u(t(s))$ как учитывающее координату положения s ТС на участке движения S .

Для каждого типового участка алгоритмы работы ТЭО (уровень $У_2$) реализуются идентично, формируя с учетом "внутренних" "параметров порядка" (множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_3}$, включающее подмножества характеристик ТС $\{ \dots \}_{ТС}$, путей сообщения $\{ \dots \}_{ПС}$, системы тягового электроснабжения $\{ \dots \}_{СТЭ}$, окружающей среды $\{ \dots \}_{ОС}$) характеристики уровня $У_3$ – тяговые характеристики ТС ($F(v)$, $B(v)$, $I(v)$ и др.). Процесс движения на уровне $У_3$ еще не является управляемым, т. е. реализуемым по условиям технологии транспортной работы формируемым множеством $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_4}$ на уровне построения движения $У_4$.

Первая форма уравнения движения (3) с учетом некоторых дополнений определяется уравнением движения ТЭД, входящего в уравнение (6), в связи с этим модель уровня $У_3$ построения движения ТС на участке S можно в общем виде представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{(1+\gamma)m} (u \cdot F(v) - W(v, \theta)) \\ F = \sum_{i=1}^n F_{ki}; \quad u = u(t(s)) \\ S = \int_0^{T_x} v(t) dt; \quad S = \sum_1^n S_k \end{cases}, \quad \text{где } u(t(s)) = \begin{cases} (0; 1] \text{ при } t \in (0; t(s_p)] \\ 0 \text{ при } t \in (t(s_p); t(s_\tau)) \\ [-1; 0) \text{ при } t \in [t(s_\tau); t(S)] \end{cases} \quad (7)$$

при $\{ \dots \}_{ТС}, \{ \dots \}_{ПС}, \{ \dots \}_{СТЭ}, \{ \dots \}_{ОС} \}_{R_i}^{Y_3}$,

где v – скорость движения ТС, км/ч; $u(t(s))$ – управляющее воздействие, учитывающее характеристики пути s ; $F(v)$ – управляемая сила, создаваемая ТЭО, кН; $W(v, \theta)$ – сила сопротивления движению, кН; S_k – типовой участок перегона S , м; T_x – время хода по перегону S , с; s_p, s_τ – участки разгона и торможения, м; $t(s_p) = t_p, t(s_\tau) = t_\tau$ – время разгона и торможения, с.

Согласно (7) при $t \in [t(s_\tau); t(S)]$ управляющее воздействие $u(t(s)) < 0$, следовательно, $F(v)$ становится отрицательной и преобразуется в тормозную силу $B(v)$, проявляющуюся в режиме торможения ТС. При этом управляемая сила F однозначно определяется электромеханическими характеристиками ТЭД ТС, приведенных к ободу колеса.

4. *Уровень построения технологической системы транспортной работы* ($У_4$) обеспечивает формирование управляемого движения ТС, которое соответствует технологическим условиям перевозочного процесса и выстраиваемого путем реализации задач на уровнях $У_1 - У_3$. В результате на уровне $У_4$ формируется движение ТС в условиях таких динамически изменяющихся параметрах транспортной работы, как время хода T_x , эксплуатационная скорость v_s , интервал следования ТС J , время стоянки на остановочных платформах $t_{оп}$ и др. При этом все параметры непрерывно меняются из-за сложной дорожной обстановки, которой характеризуются реальные условия эксплуатации ГЭТ.

На данном уровне важным определяющим фактором реализации управляемого движения является водитель, так как именно он управляет ручкой контроллера КВ (рис. 2) и задает необходимые алгоритмы управления $u(t(s))$. Квалификация водителя определяет возможность реализации алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО. Уровень квалификации и стаж работы в этом случае являются одними из основных факторов, определяющих условия реализации управляемого движения на уровне $У_4$. Условно можно доопределить управляющее воздействие $u(t(s))$ как функцию параметра k_b , характеризующего качество вождения ТС в эксплуатации и использовать далее запись $u(t(s, k_b))$.

Для описания процесса движения на уровне $У_4$, реализующегося в условиях перемещения по маршруту, целесообразно использовать вторую форму уравнения движения (4), определяющую "кривую движения" $v(s)$. При этом $v(s)$ однозначно зависит от $v(t)$ (рис. 3), характеризующую процесс построения движения на уровне $У_3$.

Реализация движения по маршруту, выраженная зависимостью $v(s)$, формируется на уровне $У_4$ как совокупность реализаций движения на элементарных участках движения, выстраиваемых на уровне $У_3$, под контролем "параметров порядка" технологии транспортной работы $У_4$, которые представляют собой множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_4}$: требования правил дорожного движения – подмножество $\{ \dots \}_{ПДД}$, правил технической эксплуатации ТС – $\{ \dots \}_{ПТЭ}$, графика движения ТС – $\{ \dots \}_{ГрДв}$, инструкция водителя ТС – $\{ \dots \}_{ИВ}$ и др. При этом на построение движения на уровне $У_4$ влияют также "внешние" "параметры порядка" уровня $У_5$: множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_5}$, решающего задачи производственного процесса ГЭТ в контексте обеспечения комфортных и безопасных пассажироперевозок при минимальных материальных затратах, выражающихся в том числе и уровнем электропотребления на тягу ТС.

Характеристиками процесса движения ТС на уровне $У_4$ являются кривые движения $v_i(t)$ и $v_i(s)$, кривые потребления тока $i_i(t)$, кривые нагрева ТЭД $\tau_i(t)$ и др. для конкретных условий эксплуатации ГЭТ. Модель уровня $У_4$ построения движения ТС может быть представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{dv}{dt} \right)_i = \frac{\xi}{v(1+\gamma)m} (u \cdot F(v) - W(v, s, \theta))_i \\ \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{1}{v_i(s)} ds \leq t_{xi}; u = u(t(s, k_b)) \\ \sum_{i=0}^{n_0} (t_{xi}(u(t(s, k_b))) + t_{oi}(J)) \leq T_P(W_{пас}, \theta) \end{cases} \quad \text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{ПДД} \\ \{ \dots \}_{ПТЭ} \\ \{ \dots \}_{ИВ} \\ \{ \dots \}_{ГрДв} \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_4}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^n s_i = L_m$ – длина маршрута, км; n – число перегонов; J – интервал следования ТС, мин; t_{xi} , t_{oi} – время хода по i -му перегону и стоянки на остановке, мин; n_0 – число остановок на маршруте; $T_P(W_{пас}, \theta)$ – рейсовое время, мин; $u(t(s, k_b))$ – управляющее воздействие, учитывающее параметры пути s и качество вождения k_b ; $W_{пас}$ – пассажиропоток, тыс. пасс./км.

5. *Уровень организации производственного процесса ГЭТ* ($У_5$) обеспечивает формирование движения ТС для реализации с задачами производственного процесса ГЭТ. При этом задаются внутренние "параметры порядка" уровня $У_5$: множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_5}$, включающее подмножества: план по выполнению технологических $\{ \dots \}_{ТП}$ и производственных показателей $\{ \dots \}_{ПП}$; нормы расхода электроэнергии $\{ \dots \}_{Норм}$ и др. Характеристики процесса движения ТС на уровне $У_5$ определяются внешними "параметрами порядка", которые формируются как системой организационного управления предприятием (рис. 1), так и системами более высокого уровня (экономические, экологические, энергетические, социальные и др.) (рис. 3). Модель уровня $У_5$ в общем виде может быть представлена так

$$\begin{cases} W_{пас н} (v_{э} (J, k_{орп}, k_c, k_{тс})) \rightarrow W_{пас н} \\ A (I_{ТС} (u(t(s, k_b)), U_{кв} (t, s, n)) \rightarrow A_{уд н} \\ N_{ДТП} (u(t(s, k_b), k_{орп}, k_c, k_{тс})) \rightarrow \min \end{cases} \quad \text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{Норм} \\ \{ \dots \}_{ТП} \\ \{ \dots \}_{ПП} \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_5}, \quad (9)$$

где $W_{пас н}$ – норма пассажиропотока, тыс. пасс./км; $A_{уд н}$ – норма удельного расхода электроэнергии на тягу ТС, кВт·ч/т·км; $N_{ДТП}$ – количество аварий, случаев; $k_{орп}$, k_c , $k_{тс}$ – коэффициенты, характеризующие

соответственно вид и количество ограничения скорости на перегоне, сложность перегона и/или маршрута движения, техническое состояние электротехнического комплекса ГЭТ.

Необходимо отметить, что данный уровень реализует процесс движения, соответствующий прогнозным расчетам, т. е. идеализированный процесс (аналогично уровню U_E), который является целевым результатом для предприятия ГЭТ. Прогнозный и реальный процессы будут отличаться, но при эффективном управлении уровнями $U_1 - U_4$ будет достигнуто максимальное приближение.

Одним из основных условий реализации процесса управляемого движения ТС в открытой сложноорганизованной системе ГЭТ является обмен материальными R_M , энергетическими R_E и информационными R_I ресурсами между уровнями и внешней средой (Аухадеев, 2014; Хакен, 1980; Пригожин и др., 1986). Условная схема обмена ресурсами представлена на рис. 4.

Эффективность функционирования электротехнического комплекса ГЭТ является одной из важнейших задач развития отрасли и определяется соответствием эксплуатационных и энергетических параметров реализации транспортной работы парка ТС планируемому значению. Применение более полной и точной модели движения ТС ГЭТ на основе системного подхода и синергетической методологии позволит определить направления повышения эффективности системы.

Модель управляемого движения ТС как многоуровневого процесса строится на основе математических моделей каждого из уровней в их взаимосвязи и взаимоподчиненности. Основной процесс управляемого движения ТС носит стохастический характер, так как зависит от множества случайных параметров, определяемых на различных уровнях его построения экспериментальным путем в реальных условиях эксплуатации ГЭТ (Rylov et al., 2017; Zhang et al., 2021; da Silva et al., 2021).

Заключение

Проведенное исследование позволило с позиции синергетического подхода к описанию свойств, принципов организации и функционирования сложноорганизованной производственно-технической системы ГЭТ обосновать, что управляемое движение ТС является многоуровневым технологическим процессом, реализуемым электротехническим комплексом ГЭТ. Это позволило разработать теоретическую систему, а на ее основе математическую модель уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта, что является важным научным результатом исследований.

В ходе работы теоретически обоснованы следующие положения:

1. Реализация процесса движения ТС или его "построение" происходит по иерархически выстроенным уровням (подпроцессам), каждый из которых решает определенную специфическую задачу. Результаты выполнения подпроцесса на более высоком иерархическом уровне являются условиями для выполнения подпроцесса на более низком при условии их непрерывного взаимодействия и подчинения условиям общей задачи построения управляемого движения ТС ГЭТ.

2. Режимы работы и алгоритмы управления электротехническим комплексом ТЭО, формируемые на уровне U_2 , являются основой процесса управляемого движения ТС. В соответствии с предложенной теоретической системой уровень U_2 формирует построение остальных уровней, определяющих технологию производственного процесса ГЭТ.

3. Непрерывное взаимодействие между уровнями и внешней средой, выражающееся в потоках энергетических, материальных и информационных ресурсов, является обязательным условием существования и стабильного функционирования сложных динамических систем, к которым относится производственно-техническая система ГЭТ.

Разработанная математическая модель может быть использована при создании цифрового двойника ТС ГЭТ, что является важным направлением практического применения результатов исследования. Идентификация эксплуатационных и технологических параметров, входящих в состав предложенных математических моделей по уровням построения движения $U_1 - U_5$, позволит повысить точность и адекватность модели.

Результаты анализа, выявленного в ходе исследования перечня и состава параметров и ограничений, характеризующих "внешние" и "внутренние" системные свойства и взаимосвязи уровней построения движения ГЭТ, могут быть рекомендованы разработчикам систем управления автономных ТС и систем помощи водителю для обоснования критериев выбора режимов работы и алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования городского электрического транспорта.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Аухадеев А. Э. Саморазвитие транспортной системы современного города. Поиск инновационной модели интеллектуального управления. М. : ВИНТИ, 2014. 218 с.
- Аухадеев А. Э., Литвиненко Р. С., Киснеева Л. Н., Егорова П. В. Концептуальная модель процесса электрической тяги как основа развития теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019а. № 1–2(29–30). С. 119–128. EDN: GYGHPI.
- Аухадеев А. Э., Литвиненко Р. С., Киснеева Л. Н., Тухбатуллина Д. И. К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019б. Т. 15, № 4. С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18>. EDN: XMUJDE.
- Бернштейн Н. А. О построении движений. М : Медгиз, 1947. 255 с.
- Бирюков В. В., Щуров Н. И., Штанг А. А. Основы электрической тяги. Новосибирск : НГТУ, 2022. 332 с.
- Вельможин А. В., Гудков В. А., Сериков А. А. Проблемы синергетического подхода к организации автомобильных перевозок // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Наземные транспортные системы. 2011. Т. 4, № 12(85). С. 76–79. EDN: ONCMNF.
- Гузь А. Р., Пальмов С. В. Цифровой двойник в интеллектуальной транспортной системе // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 1. С. 112–116. DOI: https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_112. EDN: LSWMXF.
- Малахов С. В., Капустин М. Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 1. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>. EDN: VTGPTM.
- Михальченко А. А., Парфенов Б. Б., Сафроненко А. А., Старовойтов А. Н. Основы теории транспортных процессов и систем. Гомель : БелГУТ, 2017. 379 с.
- Морозов В. Д. Трансформация управления транспортным комплексом крупнейших городов: экономические аспекты // Финансовые рынки и банки. 2022. № 12. С. 112–114. EDN: NDQZHY.
- Платонов А. К. О построении движений в баллистике и мехатронике // Прикладная механика и управление движением : сб. ст. Москва : Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша, 2010. С. 127–222.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса : Новый диалог человека с природой. М. : Прогресс, 1986. 431 с.
- Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2018. Т. 9. С. 16–23. EDN: MITOLZ.
- Рябченко Н. Л., Алексева Т. Л., Астраханцев Л. А., Асташков Н. П. [и др.]. Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4(76). С. 215–226. DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).215-226](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226). EDN: WUQVEY.
- Сечкарев А. А. Региональная транспортная система с позиций синергетики. Брянск, 2011. 122 с.
- Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(57). С. 33–41. DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_57_33. EDN: EPTXTN.
- Сопов В. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе. Новосибирск : НГТУ, 2013. 728 с.
- Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.
- Чеченова Л. М. Устойчивое развитие транспортной отрасли на базе систем искусственного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-125-138>. EDN: OZTFDI.
- Шишкарев С. Н. К вопросу о модернизации городского общественного транспорта // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2011. № 2(33). С. 18–19. EDN: NTNPSV.
- Якимов М. Р. Транспортные системы крупных городов. Анализ режимов работы на примере города Перми. Пермь : ПГТУ, 2008. 184 с.
- Auhadeev A. E., Idiyatullin R. G., Pavlov P. P., Butakov V. M. [et al.]. Improving the theory for calculating the rational modes of traction electrical equipment // E3S Web Conferences. 2019a. Vol. 124. Article number: 05077. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405077>. EDN: CQWQJZ.
- Aykhadeev A., Idiyatullin R., Kisneeveva L., Zalyalov R. [et al.]. Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Electric Power Conference 23–24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation, 2019b. Vol. 643. Article number: 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/643/1/012027>.
- da Silva L. D., Lollini P., Mongelli D., Bondavalli A. [et al.]. A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning // Journal of the Brazilian Computer Society. 2021. Vol. 27. Article number: 2 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>.

- Kashapov N. F., Sabitov L. S., Auhadeev A. E., Litvinenko R. S. [et al.]. Description of a complex technical system of urban electric transport from the standpoint of synergistic methodology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018) 5–7 December 2018, Kazan, Russia, 2019. Vol. 570. Article number: 012040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/570/1/012040>.
- Pisareva O. M., Alexeev V. A. Organizational aspects of ensuring information security in the framework of creating an intelligent transport system in the Russian Federation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, International science and technology conference "Earth science" 8–10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation, 2021. Vol. 666. Article number: 062077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/6/062077>. EDN: APDCIG.
- Romanova N., Kakhrianova D., Semenova A., Safronova A. [et al.]. Development of artificial intelligence as a modern business technology using the transport industry as an example // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia – 2020, 22–27 May, 2020, Russia, Novosibirsk, 2020. Vol. 918. Article number: 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012065>. EDN: ZRKSZN.
- Rylov Yu. A., Aukhadeev A. E., Solovyeva S. I., Korolkov A. Yu. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock // Modern Science. 2017. № 9. P. 137–140. EDN: ZISOWR.
- Zhang Yu., Zhang Z., Xu L., Ying T. [et al.]. Coupling real-time simulation of power supply, trains and dispatching for urban rail transit // Transportation Safety and Environment. 2021. Vol. 3, Issue 3. Article number: tdab010. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab010>.

References

- Aukhadeev, A. E. 2014. Self-development of the transportation system of a modern city: Search for an innovative model of intellectual management. Moscow. (In Russ.)
- Aukhadeev, A. E., Litvinenko, R. S., Kisneeva, L. N., Egorova, P. V. 2019a. Conceptual model of the electric traction process as a basis for the development of the theory of traction electrical equipment of urban electric transport. *Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society*, 1–2 (29–30), pp. 119–128. EDN: GYGHPI. (In Russ.)
- Aukhadeev, A. E., Litvinenko, R. S., Kisneeva, L. N., Tukhbatullina, D. I. 2019b. To the issue of the development of the theory of traction electrical equipment of urban electric transport. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 15(4), pp. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18>. EDN: XMUJDE. (In Russ.)
- Bernstein, N. A. 1947. On the construction of movements. Moscow. (In Russ.)
- Biryukov, V. V., Shchurov, N. I., Stang, A. A. 2022. Fundamentals of electric traction. Novosibirsk. (In Russ.)
- Velmozhin, A. V., Gudkov, V. A., Serikov, A. A. 2011. Problems of synergetic approach to the organization of road transportation. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. Nazemnyye Transportnyye Sistemy*, 4(12(85)), pp. 76–79. EDN: ONCMNF. (In Russ.)
- Guz, A. R., Palmov, S. V. 2023. Digital twin in the intelligent transportation system. *Regional and Branch Economy*, 1, pp. 112–116. DOI: https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_112. EDN: LSWMXF. (In Russ.)
- Malakhov, S. V., Kapustin, M. Yu. 2021. Method of building an adaptive suboptimal stationary regulator of train motion based on artificial neural networks. *Russian Railway Science Journal*, 80(1), pp. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>. EDN: VTGPTM. (In Russ.)
- Mikhailchenko, A. A., Parfyonov, B. B., Safronenko, A. A., Starovoitov, A. N. 2017. Fundamentals of the theory of transportation processes and systems. Gomel. (In Russ.)
- Morozov, V. D. 2022. Transformation of management of the transport complex of the largest cities: Economic aspects. *Financial Markets and Banks*, 12, pp. 112–114. EDN: NDQZHY. (In Russ.)
- Platonov, A. K. 2010. On motion construction in ballistics and mechatronics. In *Applied Mechanics and Motion Control*. Coll. of articles. Moscow, pp. 127–222. (In Russ.)
- Prigozhin, I., Stengers, I. 1986. Order out of chaos: A new dialogue between man and nature. Moscow. (In Russ.)
- Prolisko, E. E., Shut, V. N. 2018. Opportunities and prospects of unmanned urban public transportation. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh – MMTT*, 9, pp. 16–23. EDN: MITOLZ. (In Russ.)
- Ryabchenok, N. L., Alekseeva, T. L., Astrakhantsev, L. A., Astashkov, N. P. et al. 2022. Perspective energy technologies of the electric traction of trains. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 4(76), pp. 215–226. DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).215-226](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226). EDN: WUQVEY. (In Russ.)
- Sechkarev, A. A. 2011. Regional transport system from the position of synergetics. Bryansk. (In Russ.)
- Sivitskiy, D. A. 2021. Analysis of experience and prospects of application of artificial neural networks on railway transport. *Bulletin of Siberian State University of Railway Transport*, 2(57), pp. 33–41. DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_57_33. EDN: EPTXTN. (In Russ.)
- Sopov, V. I. 2013. Systems of electric power supply of electric transportation on direct current. Novosibirsk. (In Russ.)
- Haken, G. 1980. Synergetics. Moscow. (In Russ.)

- Chechenova, L. M. 2021. Sustainable development of the transportation industry on the basis of artificial intelligence systems. *Bulletin of Scientific Research Results*, 4, pp. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-125-138>. EDN: OZTFDI. (In Russ.)
- Shishkarev, S. N. 2011. To the question of modernization of urban public transport. *Transport of the Russian Federation*, 2(33), pp. 18–19. EDN: NTNPSV. (In Russ.)
- Yakimov, M. R. 2008. Transport systems of large cities. Analysis of operation modes on the example of the city of Perm. Perm. (In Russ.)
- Auhadeev, A. E., Idiyatullin, R. G., Pavlov, P. P., Butakov, V. M. et al. 2019a. Improving the theory for calculating the rational modes of traction electrical equipment. *E3S Web Conferences*, 124. Article number: 05077. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405077>. EDN: CQWQJZ.
- Aykhadeev, A., Idiyatullin, R., Kisneeva, L., Zalyalov, R. et al. 2019b. Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, International Scientific Electric Power Conference 23–24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation, 2019. Vol. 643. Article number: 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/643/1/012027>.
- da Silva, L. D., Lollini, P., Mongelli, D., Bondavalli, A. et al. 2021. A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 27. Article number: 2 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>.
- Kashapov, N. F., Sabitov, L. S., Auhadeev, A. E., Litvienko, R. S. et al. 2019. Description of a complex technical system of urban electric transport from the standpoint of synergistic methodology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018) 5–7 December 2018, Kazan, Russia, 2019. Vol. 570. Article number: 012040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/570/1/012040>.
- Pisareva, O. M., Alexeev, V. A. 2020. Organizational aspects of ensuring information security in the framework of creating an intelligent transport system in the Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, International Science and Technology Conference "Earth Science" 8–10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation, 2021. Vol. 666. Article number: 062077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/6/062077>. EDN: APDCIG.
- Romanova, N., Kakhriyanova, D., Semenova, A., Safronova, A. et al. 2020. Development of artificial intelligence as a modern business technology using the transport industry as an example. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia – 2020, 22–27 May, 2020, Russia, Novosibirsk, 2020. Vol. 918. Article number: 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012065>. EDN: ZRKSZ.
- Rylov, Yu. A., Aukhadeev, A. E., Solovyeva, S. I., Korolkov, A. Yu. 2017. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock. *Modern Science*, 9, pp. 137–140. EDN: ZISOWR.
- Zhang, Yu., Zhang, Z., Xu, L., Ying, T. et al. 2021. Coupling real-time simulation of power supply, trains and dispatching for urban rail transit. *Transportation Safety and Environment*, 3(3). Article number: tdab010. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab010>.

Сведения об авторе

Аухадеев Авер Эрикович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;

Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;

e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Aver E. Aukhadeev – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;

Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;

e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Моделирование качки судна с подвешенным грузом

А. А. Соловьев, С. Н. Шугай*

*Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: shugaysn@mstu.edu.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
13.12.2023;

принята
к публикации
26.12.2023

Ключевые слова:

качка судна,
подвешенный груз,
начальная
остойчивость,
регулярное
волнение

Остойчивость судна определяет его способность безопасно совершать плавание при любом состоянии моря. В процессе изучения динамики судна на волнении применяется метод математического моделирования, основанный на линейной теории волн и качки. Модели позволяют получать расчетные формулы и методики, используемые для анализа качки судов, имеющих на борту смещающиеся грузы (жидкие, сыпучие, подвешенные). Влияние подвешенного груза на мореходные качества судна в настоящее время рассматривается только при решении задач статической устойчивости. При решении задач динамики предложены математические модели бортовой качки судна с подвешенным грузом на тихой воде и регулярном волнении и получены линейные дифференциальные уравнения качки судна с подвешенным грузом. Наличие на судне подвешенного груза значительно изменяет параметры качки за счет возникновения кренящего и переменного моментов инерции судна. Предложенные математические методы позволяют моделировать качку на любом регулярном волнении с учетом произвольных значений поперечной метацентрической высоты, веса груза и длины подвеса.

Для цитирования

Соловьев А. А. и др. Моделирование качки судна с подвешенным грузом. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 591–597. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-591-597>.

Modeling the motion of a ship with suspended cargo

Andrey A. Solovyov, Sergey N. Shugay*

*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: shugaysn@mstu.edu.ru

Article info

Received
13.12.2023;

accepted
26.12.2023

Key words:

ship motions,
suspended cargo,
initial stability,
regular waves

Abstract

The stability of a vessel determines its ability to safely navigate in any sea state. In the process of studying the dynamics of a vessel in rough seas, the method of mathematical modeling based on the linear theory of waves and rolling has been used. The models allow obtaining calculation formulas and methods used to analyze the rolling of vessels with shifting cargo on board (liquid, bulk, suspended). The effect of suspended cargo on the seaworthiness of a vessel is currently considered only when solving problems of static stability. When solving problems of dynamics, mathematical models of the roll of a vessel with suspended cargo in calm water and regular waves have been proposed, and linear differential equations of the roll of a vessel with suspended cargo have been obtained. The presence of suspended cargo on a vessel significantly changes the parameters of the roll due to the occurrence of heeling and variable moments of inertia of the vessel. The proposed mathematical methods allow simulating the roll in any regular waves, taking into account arbitrary values of the transverse metacentric height, cargo weight and suspension length.

For citation

Solovyov, A. A. et al. 2024. Modeling the motion of a ship with suspended cargo. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 591–597. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-591-597>.

Введение

Теоретический анализ качки – колебаний плавающего судна под воздействием внешних сил – представлен в работе известного ученого XVIII в. члена Петербургской Академии наук Леонарда Эйлера "Корабельная наука", изданной в России в 1749 г. Дальнейшее развитие теория качки судна получила в многочисленных трудах отечественных и зарубежных авторов (Собрание..., 1951; Семенов-Тянь-Шанский и др., 1969; Благовещенский и др., 1975; Ремез, 1983; Нечаев, 1989; Чижумов, 1999, 2010).

В настоящее время при совершенствовании теории качки возникла необходимость в строгой математической формулировке задачи о динамике судна на волнении и разработке надежных теоретических методов анализа соответствующих математических моделей. Известные решения для сравнительно простых нелинейных моделей, полученных с помощью бесконечных рядов, не всегда позволяют выявить из найденных выражений наиболее важные зависимости. Исключением являются только простейшие модели, описываемые линейными дифференциальными уравнениями, для которых решение может быть представлено в замкнутой форме, т. е. в виде аналитических формул. Особенность таких моделей состоит в том, что они описывают процессы, протекающие одинаково при различных воздействиях. С увеличением интенсивности воздействия изменения остаются количественными, новые качественные изменения не учитываются.

Область применения линейных моделей, основанных на использовании метацентрических формул в задачах качки и остойчивости, очень широка. Следует отметить, что методы анализа качки и остойчивости с помощью линейных моделей схожи и эффективны при использовании.

Важной задачей при изучении характера поведения судна в морских условиях является моделирование качки судна с находящимся на нем перемещающимся грузом (жидким, подвешенным). В немногих работах, посвященных этой проблеме (Рахманин и др., 1997; Шауб, 2013; Buchner, 2002), рассматривается вопрос о влиянии жидкого груза на динамику судна.

В настоящей статье предложена линейная модель качки судна с подвешенным грузом на тихой воде и регулярном волнении.

Теоретические основы

Влияние подвешенного и жидкого грузов на остойчивость (рис. 1) заключается в создании кренящего момента за счет смещения их центра тяжести при наклонении судна. В теории начальной статической остойчивости действие этого момента учитывается уменьшением восстанавливающего момента посредством введения соответствующих поправок к начальной поперечной метацентрической высоте.

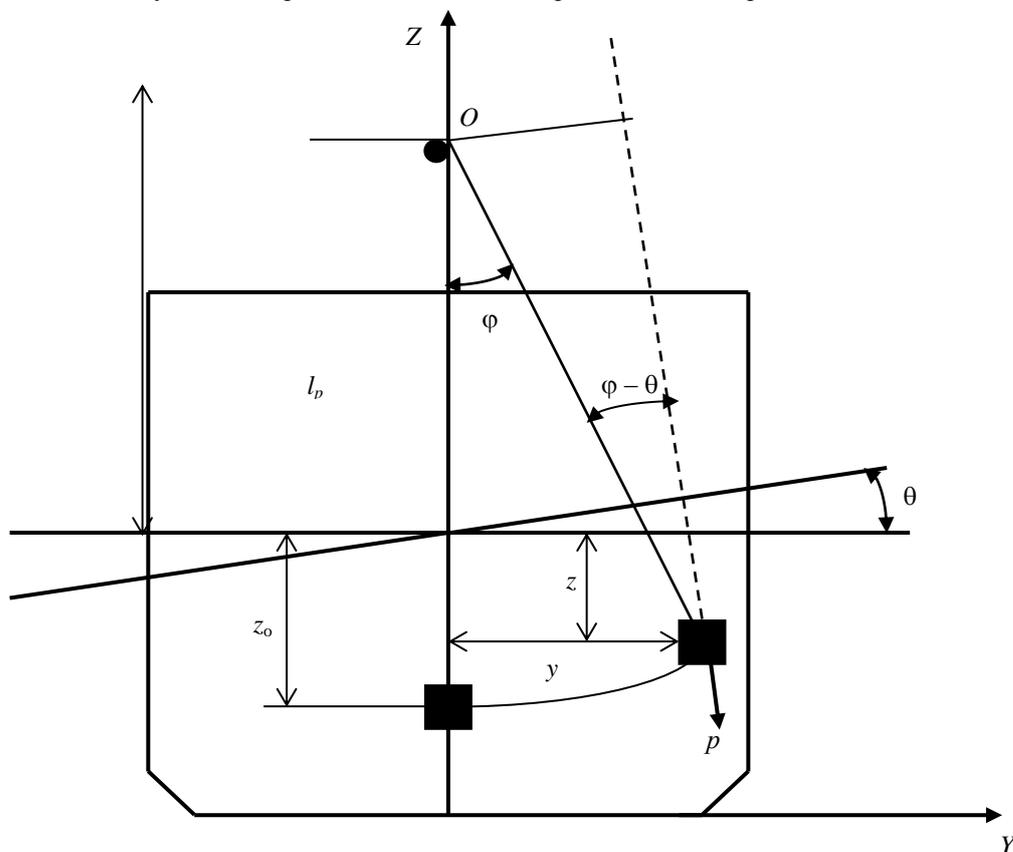


Рис. 1. Влияние подвешенного груза на остойчивость судна
Fig. 1. The influence of suspended load on the stability of a ship

Поправки вычисляются по формулам:
– для подвешенного груза

$$\delta h = -\frac{P}{D} l_p, \quad (1)$$

– для жидкого груза, имеющего свободную поверхность:

$$\delta h = -\frac{P}{D} \rho_x, \quad (2)$$

где p – вес груза; D – весовое водоизмещение судна; l_p – длина подвеса; ρ_x – метацентрический радиус цистерны или танка.

Выражения (1) и (2) идентичны, что позволяет сделать вывод об идентичности влияния на остойчивость судна жидкого груза и подвешенного твердого тела, имеющего длину подвеса, равную ρ_x . В дальнейшем в ходе анализа параметров качки будем рассматривать только подвешенный груз, так как для замены его на жидкий достаточно длину подвеса l_p заменить на метацентрический радиус цистерны, величина которого может быть вычислена по формуле

$$\rho_x = \frac{\gamma i_x}{p}, \quad (3)$$

где γ – удельный вес жидкости; i_x – момент инерции свободной поверхности относительно ее главной центральной оси.

При рассмотрении вопроса о влиянии подвешенного груза на параметры качки судна используем линейную теорию качки корабля. Уравнение бортовой качки на тихой воде представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$(J_x + \delta J_x) \ddot{\theta} + 2N_\theta \dot{\theta} + Dh\theta = 0, \quad (4)$$

где J_x – момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси G_x ; δJ_x – присоединенный момент инерции массы воды; $2N_\theta$ – постоянный коэффициент пропорциональности в выражении момента сил сопротивления качке; h – начальная поперечная метацентрическая высота.

Разделив уравнение (4) на множители при второй производной, получим

$$\ddot{\theta} + 2v_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 \theta = 0, \quad (5)$$

где

$$v_\theta = \frac{N_\theta}{J_x + \delta J_x}, \quad (6)$$

$$n_\theta^2 = \frac{Dh}{J_x + \delta J_x}, \quad (7)$$

здесь v_θ – коэффициент затухания; n_θ – частота собственных свободных колебаний судна.

Решение уравнения (5), написанное в тригонометрической форме, имеет вид

$$\theta = e^{-vt} \left[\theta_0 \cos \omega t + \frac{1}{\omega} (\dot{\theta}_0 + v_\theta \theta_0) \sin \omega t \right], \quad (8)$$

где θ_0 и $\dot{\theta}_0$ – начальные значения угла крена и угловой скорости; частота качки с учетом сил сопротивления равна

$$\omega = \sqrt{n_\theta^2 - v_\theta^2}. \quad (9)$$

Уравнение (8) определяет гармоническое затухающее колебательное движение с постоянным периодом $T = \frac{2\pi}{\omega}$ и переменной амплитудой $\theta_0 e^{-vt}$.

При составлении уравнения бортовой качки судна на тихой воде с учетом наличия подвешенного груза в уравнение (4) необходимо добавить момент инерции и момент силы веса, создаваемый этим грузом. Поэтому момент J_x будем рассматривать как сумму двух составляющих:

$$J_x = J_{x_0} + J_{xp},$$

где J_{x_0} – момент инерции массы судна без подвешенного груза; J_{xp} – момент инерции подвешенного груза.

Момент инерции J_{xp} также состоит из суммы двух составляющих: первая зависит от расположения груза относительно оси наклона при конкретном угле отклонения от вертикали φ и является величиной переменной, вторая – собственный момент инерции массы груза:

$$J_{xp} = \frac{P}{g} (z_\varphi^2 + y_\varphi^2) + \frac{P}{g} \frac{l_z^2 + l_y^2}{12},$$

где z и y – координаты груза при заданном угле φ ; l_z и l_y – линейные размеры груза.

Поскольку второе слагаемое является величиной постоянной, то его можно объединить с моментом инерции судна J_{x0} .

Как видно из рис. 1, координаты центра тяжести груза при произвольном угле φ могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\begin{aligned} z_\varphi &= z_0 - (l_p - l_p \cos \varphi) \approx z_0, \\ y_\varphi &= l_p \sin \varphi \approx l_p \varphi, \end{aligned}$$

где l_p – длина подвеса; φ – угол отклонения линии подвеса от вертикали.

С учетом полученных зависимостей общий момент инерции массы судна будет вычисляться по формуле

$$J_x = J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2]. \quad (10)$$

Момент силы веса подвешенного груза, противоположный по знаку восстанавливающему моменту, вычисляется так:

$$M_p = pl_p \sin(\varphi - \theta) \approx pl_p (\varphi - \theta). \quad (11)$$

С учетом выражений (10) и (11) уравнение качки судна на тихой воде с подвешенным грузом имеет вид

$$\left\{ J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2] + \delta J_x \right\} \ddot{\theta} + 2N_\theta \dot{\theta} + Dh\theta - pl_p (\varphi - \theta) = 0. \quad (12)$$

Раскрывая скобки и группируя слагаемые, содержащие θ , получим выражение

$$\left\{ J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2] + \delta J_x \right\} \ddot{\theta} + 2N_\theta \dot{\theta} + (Dh + pl_p)\theta - pl_p \varphi = 0. \quad (13)$$

Разделив на множитель при второй производной, получим

$$\ddot{\theta} + 2\nu_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 \theta - m_\theta \varphi = 0, \quad (14)$$

где

$$\nu_\theta = \frac{N_\theta}{J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2] + \delta J_x}, \quad (15)$$

$$n_\theta^2 = \frac{Dh + pl_p}{J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2] + \delta J_x}, \quad (16)$$

$$m_\theta = \frac{pl_p}{J_{x0} + \frac{P}{g} [z_0^2 + (l_p \varphi)^2] + \delta J_x}. \quad (17)$$

Из формул (15) и (16) видно, что коэффициент затухания ν_θ , частота собственных колебаний n_θ и зависящий от них период качки T являются переменными величинами, так как зависят от угла φ , значение которого может быть определено из решения дифференциального уравнения качания подвешенного груза

$$J_\varphi \ddot{\varphi} + N_\varphi \dot{\varphi} + pl_p (\varphi - \theta) = 0, \quad (18)$$

где $J_\varphi = \frac{P}{g} l_p^2$ – момент инерции подвешенного груза относительно точки подвеса; N_φ – постоянный коэффициент пропорциональности в выражении момента сил сопротивления качанию груза.

Таким образом, для расчета параметров качки судна с подвешенным грузом необходимо решение системы двух дифференциальных уравнений (14) и (18), реализовать которое можно только численными методами.

Бортовая качка судна на регулярном волнении описывается уравнением

$$(J_x + \delta J_x) \ddot{\theta} + 2N_\theta \dot{\theta} + Dh(\theta - \alpha) = 0, \quad (19)$$

где α – текущий угол волнового склона.

После преобразования уравнение будет иметь вид

$$(J_x + \delta J_x) \ddot{\theta} + 2N_\theta \dot{\theta} + Dh\theta = Dh\alpha. \quad (20)$$

Угол волнового склона в данном месте и данный момент времени вычисляется по формуле

$$\alpha = \alpha_m \sin \sigma t, \quad (21)$$

где $\alpha_m = \aleph_{\theta_b} \aleph_{\theta_T} \alpha_o$; $\alpha_o = \frac{2\pi r_b}{\lambda}$; α_o – наибольший угол волнового склона; α_m – исправленный угол волнового склона; \aleph_{θ_b} , \aleph_{θ_T} – поправочные коэффициенты, учитывающие конечные размеры судна; $2r_b$ – высота волны; λ – длина волны; σ – частота волны.

С учетом приведенных выражений (21), уравнение (20) принимает следующий вид:

$$(J_x + \delta J_x) \ddot{\theta} + 2N_{\theta} \dot{\theta} + Dh\theta = \alpha_m Dh \sin \sigma t. \quad (22)$$

Разделив все члены уравнения (22) на коэффициент при второй производной, приводим его к виду

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta} \dot{\theta} + n_{\theta}^2 \theta = \alpha_m n_{\theta}^2 \sin \sigma t. \quad (23)$$

Общий интеграл уравнения (23) имеет вид

$$\theta = e^{-\nu t} (C_1 \cos n_{\theta} t + C_2 \sin n_{\theta} t) + \bar{\theta}, \quad (24)$$

где $\bar{\theta}$ – частное решение уравнения, которое определяет вынужденные колебания и находится по формуле

$$\bar{\theta} = \theta_m \sin(\sigma t - \delta), \quad (25)$$

здесь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\nu_{\theta} \sigma}{n_{\theta}^2 - \sigma^2}, \quad (26)$$

$$\theta_m = \frac{\alpha_m n_{\theta}^2}{\sqrt{(n_{\theta}^2 - \sigma^2)^2 + 4\nu_{\theta}^2 \sigma^2}}. \quad (27)$$

Итак, общий интеграл дифференциального уравнения бортовой качки в абсолютных координатах рассчитывается как

$$\theta = e^{-\nu t} \left(\theta_0 \cos \omega t + \frac{1}{\omega} (\dot{\theta}_0 + \nu_{\theta} \theta_0) \sin \omega t \right) + \theta_m \sin(\sigma t - \delta). \quad (28)$$

Для составления уравнения, описывающего бортовую качку судна с учетом подвешенного груза, уравнение (20) необходимо дополнить моментом веса подвешенного груза и моментом инерции его массы; после преобразований данное уравнение приводится к следующему виду:

$$\left\{ J_{x_0} + \frac{p}{g} \left[z_o^2 + (l_p \varphi)^2 \right] + \delta J_x \right\} \ddot{\theta} + 2N_{\theta} \dot{\theta} + (Dh + pl_p) \theta - pl_p \varphi = Dh \alpha. \quad (29)$$

Разделив все члены уравнения (29) на коэффициент при второй производной и учитывая выражения (21), получим формулу

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta} \dot{\theta} + n_{\theta}^2 \theta - m_{\theta} \varphi = \alpha_m n_{\theta}^2 \sin \sigma t, \quad (30)$$

где $n_{\theta}^2 = \frac{Dh}{J_{x_0} + \frac{p}{g} \left[z_o^2 + (l_p \varphi)^2 \right] + \delta J_x}$; коэффициенты ν_{θ} , n_{θ}^2 и m_{θ} вычисляются по выражениям (15)–(17)

соответственно.

Моменты инерции J_{x_0} обычно находят по приближенным формулам. Из опубликованных в технической литературе приближенных формул, дающих более точные результаты, наиболее часто рекомендуют:

1) формулу Шиманского $J_{x_0} = \frac{D}{g} \left(\frac{B^2 \alpha^2}{11,4\delta} + \frac{H^2}{12} \right)$, где B – ширина судна; H – высота борта;

α – коэффициент полноты площади ватерлинии; δ – коэффициент общей полноты. Формула выведена в предположении, что корпус судна представляет сплошной параболический цилиндр;

2) формулу Дуайера $J_{x_0} = \frac{D}{12g} (B^2 + 4z_g^2)$, где z_g – аппликата центра тяжести судна. Формула

предполагает, что корпус судна представляет собой сплошной прямоугольный параллелепипед шириной B и высотой $2z_g$;

3) формулу Павленко $J_{x_0} = \frac{D}{16g} (B^2 + H^2)$;

4) эмпирическую формулу $J_{x_0} + \delta J_x = \frac{D}{g} \rho_x^2$, где ρ_x – приведенный радиус инерции судна с учетом

присоединенной массы воды $\rho_x = cB$. Эмпирический коэффициент c вычисляется по рекомендованной ИМО и Российским морским регистром судоходства формуле $c = 0,373 + 0,023B/d - 0,043L_{wl}/100$, где L_{wl} – длина судна по ватерлинии.

Момент инерции присоединенной массы определяется по формуле

$$\delta J_x = \frac{D}{12g} (B^2 + 4d^2) \frac{\pi}{108}.$$

Результаты и обсуждение

Уравнения (4) и (22) описывают качку судна на тихой воде и на регулярном волнении без учета момента, создаваемого подвешенным грузом; системы уравнений (14), (18) и (29), (18) – с учетом влияния подвешенного груза на кренящий момент и момент инерции судна.

Для вычислений была использована математическая модель судна водоизмещением 1 000 т, длиной 50 м, шириной 9 м; осадка 3,68 м; начальная поперечная метацентрическая высота 1,0 м.

Инклинограммы качки судна на тихой воде, полученные посредством решения уравнения (4) и системы уравнений (14), (18), показывают классические периодические затухающие колебания (рис. 2) и выраженную аperiodичность, вызванную влиянием подвешенного груза (рис. 3).

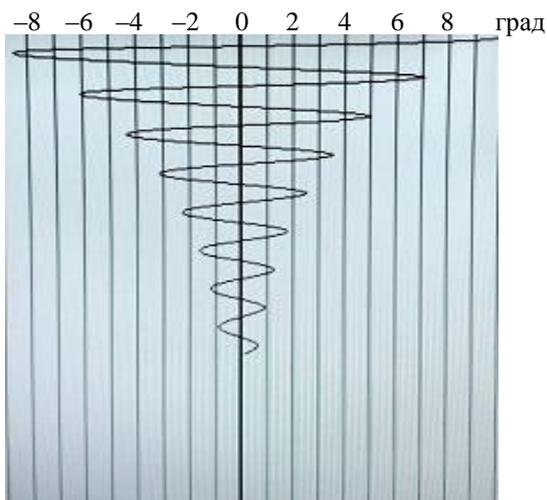


Рис. 2. Качка судна без подвешенного груза на тихой воде
Fig. 2. Rolling of a ship without suspended cargo on calm water

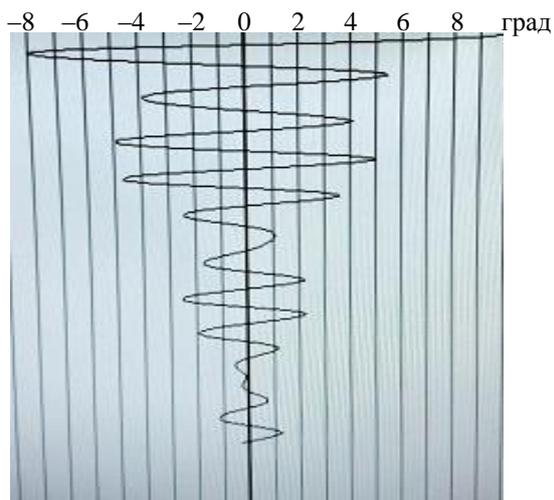


Рис. 3. Качка судна с подвешенным грузом на тихой воде
Fig. 3. Rolling of a ship with suspended cargo on calm water

Инклинограммы качки судна на регулярном волнении получены в результате решения уравнения (22) и системы уравнений (29), (18). Качка судна на регулярном волнении имеет постоянный период (рис. 4), а наличие подвешенного груза (рис. 5) увеличивает амплитуду и период качки.

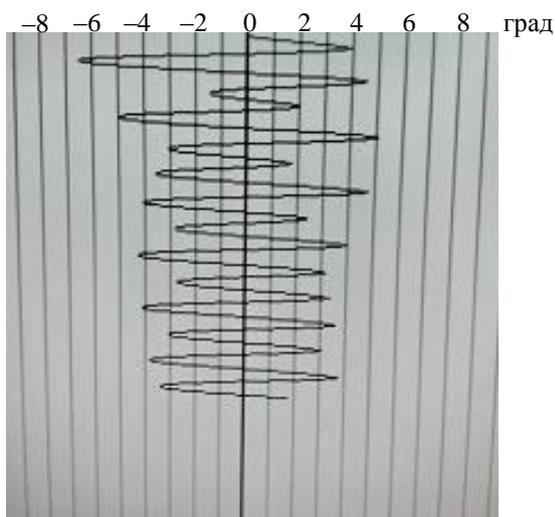


Рис. 4. Качка судна без подвешенного груза на волнении
Fig. 4. Rolling of a ship without suspended cargo in rough seas

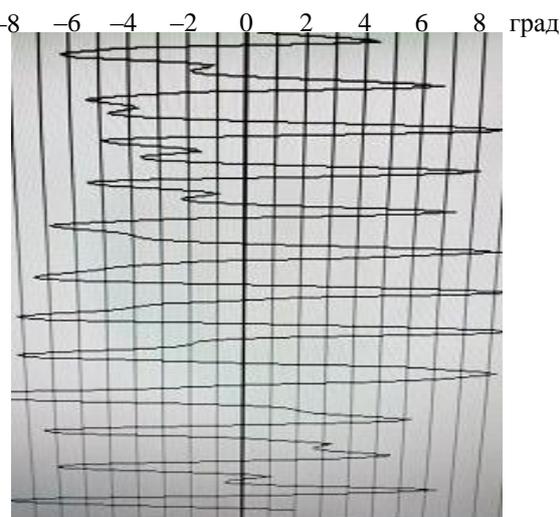


Рис. 5. Качка судна с подвешенным грузом на волнении
Fig. 5. Rolling of a ship with suspended cargo in rough seas

Заключение

В результате исследования получены линейные дифференциальные уравнения качки судна с подвешенным грузом на тихой воде и регулярном волнении. Наличие на судне подвешенного груза значительно изменяет параметры качки за счет возникновения кренящего и переменного моментов инерции судна.

Предложенные математические методы позволяют моделировать качку на любом регулярном волнении с учетом произвольных значений поперечной метацентрической высоты, веса груза и длины подвеса.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. В 2 ч. Ч. 2. Динамика (качка) корабля. Л. : Судостроение, 1975. 175 с.
- Нечаев Ю. И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л. : Судостроение, 1989. 240 с.
- Рахманин Н. Н., Живица С. Г. Влияние динамики жидкого груза на остойчивость судна // Научно-технический сб. Вып. 20, т. 2. Российский морской регистр судоходства. С.-Петербург, 1997.
- Ремез Ю. В. Качка корабля. Л. : Судостроение, 1983. 328 с.
- Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин С. Н. Качка корабля. Л. : Судостроение, 1969. 392 с.
- Собрание трудов академика А. Н. Крылова / отв. ред. В. И. Смирнов, Ю. А. Шиманский. М. ; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1936–1956. Т. 11. Качка корабля: Качка корабля, 1951. 469 с.
- Чижиумов С. Д. Основы динамики судов на волнении. Комсомольск-на-Амуре : КиАГТУ, 2010. 110 с.
- Чижиумов С. Д. Численные модели в задачах динамики судна. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1999. 182 с.
- Шaub П. А. Качка поврежденного корабля. Динамическая непотопляемость. СПб. : Моринтех, 2013. 144 с.
- Buchner B. Green Water on Ship-type Offshore Structures. Grafisch Bedrijf Ponsen & Looijen bv, Wageningen, The Netherlands, 2002.

References

- Blagoveshchensky, S. N., Kholodilin, A. N. 1975. Handbook on ship statics and dynamics. In 2 parts. Vol. 2. Leningrad. (In Russ.)
- Nechaev, Yu. I. 1989. Modeling of stability in waves. Modern trends. Leningrad. (In Russ.)
- Rakhmanin, N. N., Zhivitsa, S. G. 1997. Influence of liquid cargo dynamics on ship stability. *Science and Technology Digest*, 20, vol. 2. St. Petersburg. (In Russ.)
- Remez, Yu. V. 1983. Ship motions. Leningrad. (In Russ.)
- Semenov-Tyann-Shansky, V. V., Blagoveshchensky, S. N., Kholodilin, S. N. 1969. Ship motions. Leningrad. (In Russ.)
- Collected papers of Academician A. N. Krylov. 1951. Eds.: Smirnov V. I., Shimansky Yu. A. Vol. XI. Ship motions. Moscow ; Leningrad. (In Russ.)
- Chizhiumov, S. D. 2010. Fundamentals of ships dynamics in waves. Komsomolsk-on-Amur. (In Russ.)
- Chizhiumov, S. D. 1999. Numerical models in ship dynamics problems. Vladivostok. (In Russ.)
- Shaub, P. A. 2013. Damaged ship motions. Dynamic unsinkability. St. Petersburg. (In Russ.)
- Buchner, B. 2002. Green water on ship-type offshore structures. Grafisch Bedrijf Ponsen & Looijen bv, Wageningen, The Netherlands.

Сведения об авторах

Соловьев Андрей Аркадьевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: solovievaa@mstu.edu.ru

Andrey A. Soloviev – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: solovievaa@mstu.edu.ru

Шугай Сергей Николаевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, доцент;
e-mail: shugaesn@mstu.edu.ru

Sergey N. Shugay – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Associate Professor;
e-mail: shugaesn@mstu.edu.ru

УДК 621.316.1

Повышение эффективности системы электроснабжения судостроительного завода

В. Ф. Белей, К. В. Коротких*

*Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
18.10.2024;
получена
после доработки
25.11.2024;
принята
к публикации
27.11.2024

Ключевые слова:

судостроительный
завод,
система
электроснабжения,
гармонические
составляющие, ток,
напряжение, нагрузка

Развитие судостроительной отрасли предполагает рост уровня конкурентоспособности выпускаемой продукции, замену устаревшего электротехнического оборудования, повышение эффективности систем электроснабжения. Внедрение новейших технологий обеспечивает снижение массогабаритных показателей оборудования, расширяет их функциональные возможности, но эти технологии основаны на базе нелинейных и несимметричных электроприемников, что обуславливает негативное влияние на питающую сеть. Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" отличается значительной долей нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. Комплексный подход при анализе системы электроснабжения завода включал экспериментальные исследования нелинейных электроприемников, в ходе которых установлен высокий уровень высших гармоник тока (3-, 5- и 7-го порядков). Одним из эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . Схемные, технологические решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин; повышение фазности полупроводниковых преобразователей; подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания) и фильтрующие устройства (узкополосные фильтры, фильтросимметрирующие устройства и активные фильтры) используются для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

Для цитирования

Белей В. Ф. и др. Повышение эффективности системы электроснабжения судостроительного завода. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 598–610. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-598-610>.

Efficiency increasing of a shipyard power supply system

Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh*

*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Article info

Received
18.10.2024;
received
in revised
25.11.2024;
accepted
27.11.2024

Key words:

shipyard,
power supply system,
harmonic components,
current,
voltage, load

Abstract

The development of the shipbuilding industry involves increasing the competitiveness of manufactured products, replacing obsolete electrical equipment, and increasing the efficiency of power supply systems. The introduction of the latest technologies reduces the weight and size of equipment, expands their functionality, but these technologies are based on nonlinear and asymmetrical power consumers, which causes a negative impact on the power grid. The power supply system of the Baltic Shipyard "Yantar" is characterized by a significant share of nonlinear, asymmetrical loads, often single-phase. An integrated approach to the analysis of the plant's power supply system included experimental studies of nonlinear power consumers, during which a high level of higher current harmonics (3rd, 5th and 7th orders) was established. One of the effective methods for reducing zero-sequence voltage asymmetry is to replace a transformer with a Y/Y_0 winding connection diagram with a Δ/Y_0 diagram. Circuit and technological solutions (separation of nonlinear loads to a separate bus system; increasing the phase of semiconductor converters; connecting a nonlinear load to a system with greater short-circuit power) and filtering devices (narrow-band filters, filter-balancing devices and active filters) are used to increase the efficiency of the power supply system when it operates under conditions of increasing distorting loads.

For citation

Beley, V. F. et al. 2024. Efficiency increasing of a shipyard power supply system. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 598–610. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-598-610>.

Введение

Государственная программа "Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 гг."¹ предусматривает повышение уровня конкурентоспособности продукции российского судостроения на отечественном и мировом рынках. Технология реализации такого подхода включает замену устаревшего электротехнического оборудования, рост эффективности систем электроснабжения, снижение потерь электрической энергии; повышение надежности и безопасности оперативного обслуживания.

Широкое внедрение новейших технологий обеспечивает снижение массогабаритных показателей оборудования, расширяет их функциональные возможности, однако эти технологии основаны на базе нелинейных и несимметричных электроприемников, что обуславливает негативное влияние на питающую сеть. В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость нормирования уровня высших гармоник (ВГ) тока. Нормирование определяет требования к производителям электрооборудования по уровню эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть и способствует реализации мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на судостроительных предприятиях.

Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" (г. Калининград) отличается значительной долей нелинейных, несимметричных нагрузок. В результате экспериментальных исследований нелинейных электроприемников завода установлен высокий уровень высших гармоник тока (преимущественно 3-, 5- и 7-го порядков). Одним из эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . В ходе исследования показаны схемные, технологические решения и фильтрующие устройства, используемые для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

Материалы и методы

В работе предложен комплексный подход при проведении исследований системы электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода (ПСЗ) "Янтарь", отличительной особенностью которой является значительная доля нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. При решении задачи повышения уровня конкурентоспособности продукции российского судостроения на ПСЗ "Янтарь" намечена замена используемых трансформаторов (ввиду значительного превышения ими нормативных сроков эксплуатации) на современные энергоэффективные трансформаторы.

Для обоснования методов повышения эффективности системы электроснабжения судостроительного завода использованы результаты эмпирического и теоретического исследования. Измерение показателей качества электрической энергии, снятие оцифрованных кривых тока и напряжения осуществлялись с помощью анализатора Fluke-434.

Результаты и обсуждение

Система электроснабжения судостроительного завода "Янтарь" выполнена по двухуровневой схеме, предполагающей распределение электроэнергии от четырех секций шин 6 кВ к четырем головным подстанциям (ПС): ЦРТП № 1 – центральная распределительная подстанция; ПС № 7; ПС № 47; ПС № 27 (рис. 1).

В составе системы электроснабжения завода эксплуатируется значительная доля нелинейных электроприемников (ЭП) трех- и однофазного исполнения (табл. 1).

Таблица 1. Доля нелинейных электроприемников
Table 1. Share of nonlinear electrical receivers

Тип электрооборудования и приборов	% от установленной мощности всех электроприемников завода
Сварочные аппараты	19
Электротермические установки и гальванические ванны	12
Светодиодные лампы	3
Линейные и компактные люминесцентные лампы	2
Офисные электроприемники	Более 6

¹ Государственная программа РФ "Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы". Утверждена постановлением Правительства РФ № 304 от 15 апреля 2014 г. (с изменениями от 19 августа 2022 г.). URL: https://www.sudprom2030.ru/files/public/PP_1454.pdf.

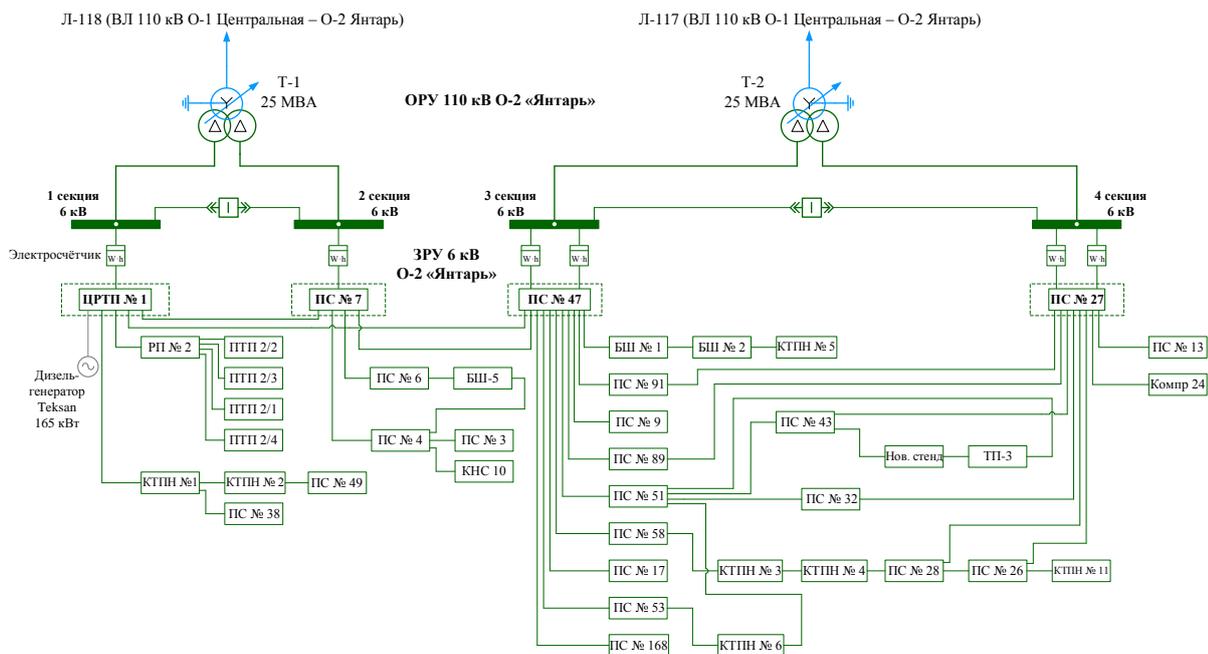


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения ПСЗ "Янтарь"
 Fig. 1. Block diagram of the BS "Yantar" power supply system

Электроприемники офисного назначения

Более 30 % работников на судостроительном заводе заняты офисной деятельностью, что характеризует высокую долю электроприемников офисного назначения. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования гармонических составляющих и энергетических характеристик оборудования офисного назначения с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke-434 (табл. 2):

- 1) компьютера: процессор Intel(R) Celeron(R) CPU N1620 @ 2,70 GHz, ОЗУ 4 Гб, 64-разрядная операционная система;
- 2) ноутбука: HP Laptop 15-ra0xx, процессор Intel(R) Celeron(R) CPU N3060 @ 1,60 GHz, ОЗУ 4 Гб, 64-разрядная операционная система.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик офисных электроприемников
 Table 2. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of office electrical receivers

Приемник	Параметр											
	U, В	P, Вт	Q, вар	S, ВА	K _i , %	% высших гармоник тока фазы A от основной гармоники						
						3	5	7	9	11	13	15
Компьютер	224	68,7	81,4	106,5	116	81,5	64,5	40,5	19,4	6,0	6,7	11,2
Ноутбук	224	37,2	69,5	78,8	175	87,6	73,9	55,4	44,4	39,7	41,9	43,0
Роутер	234	9	0,4	10	137	86,4	81,7	72,1	62,0	42,5	27,6	19,8

Измерения проводились с учетом большого количества включенных программ на ноутбуке и компьютере (рис. 2).

Результаты исследований (табл. 2) свидетельствуют об эмиссии нелинейными офисными электроприемниками в низковольтную электрическую сеть завода всего спектра высших гармонических составляющих тока, преобладающими из которых являются гармоники 3-, 5- и 7-го порядков, а также о преобладании потребляемой реактивной мощности над активной у персональной вычислительной техники. Как известно, гармоника 3-го порядка и кратные ей гармоники замыкаются по путям нулевой последовательности. Таким образом, по нулевому проводу протекают ток частотой 50 Гц, обусловленный несимметричной нагрузкой, и ток третьей гармоники частотой 150 Гц, что приводит к нагреву нулевого провода, падению напряжения (Жежеленко, 1984; Белей и др., 2024).

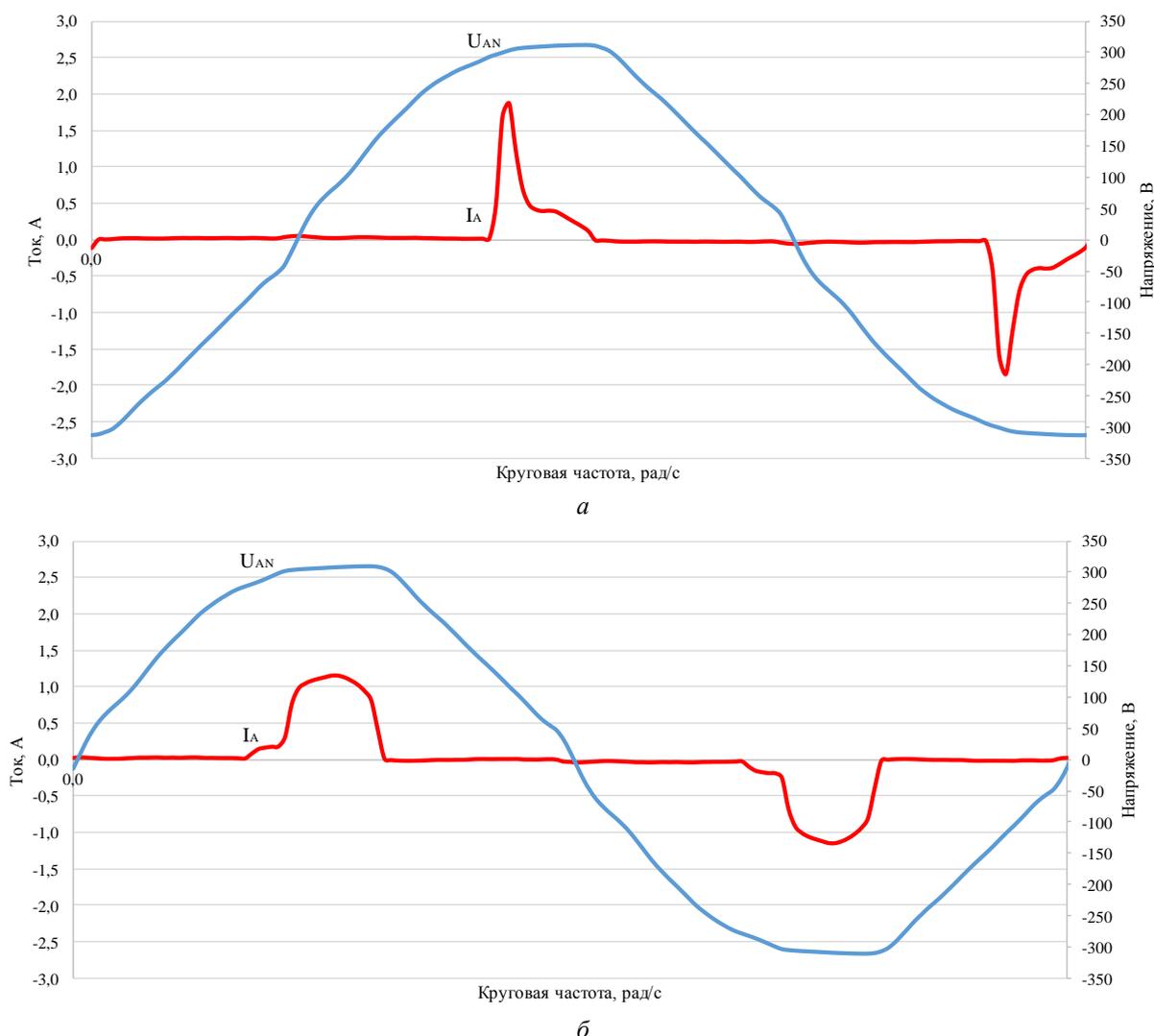


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения: *a* – ноутбука при 100%-м заряде аккумулятора и с подключенным зарядным устройством к сети; *б* – подключенного к сети компьютера
Fig. 2. Current and voltage oscillograms: *a* – laptop with 100% battery charge and with charger connected to the network; *b* – computer connected to the network

Светодиодные и люминесцентные лампы

Доля светодиодных (СЛ) и люминесцентных (ЛЛ) ламп на судостроительном заводе составляет соответственно 24 и 30 % от общего числа осветительных приборов. Оставшаяся часть осветительной нагрузки приходится на лампы накаливания, дуговые ртутьсодержащие и газоразрядные натриевые лампы. В ходе экспериментального исследования светодиодных и люминесцентных ламп рассмотрены их гармонические составляющие и энергетические характеристики (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик светодиодных и люминесцентных ламп

Table 3. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of LED and fluorescent lamps

ЭП	Параметр							% высших гармоник тока от фундаментальной гармоники					
	I , мА	P , Вт	Q , вар	$\cos\varphi_{\text{пасп}}$	$\cos\varphi_{\text{факт}}$	K_i , %							
СЛ № 1	37	5,9	5,7	0,81	0,72	50	42,3	22	2,2	7,8	0,7	9,3	7,3
СЛ № 2	86	11,8	14,8	0,90	0,63	98	70,9	42,8	34,4	30,5	18,1	8,67	13,0
СЛ № 3	52	9,4	6,5	0,90	0,82	33	23,5	18,2	5,9	7,8	1,4	7,2	4,7
ЛЛ № 1	500	24,2	17,7	0,99	0,85	43	34,5	18,4	10,8	7,2	4,8	3,4	2,6

На рис. 4 приведены энергетические характеристики двух светодиодных ламп с наихудшими (рис. 4, а) и наилучшими (рис. 4, б) показателями (Белей и др., 2016).

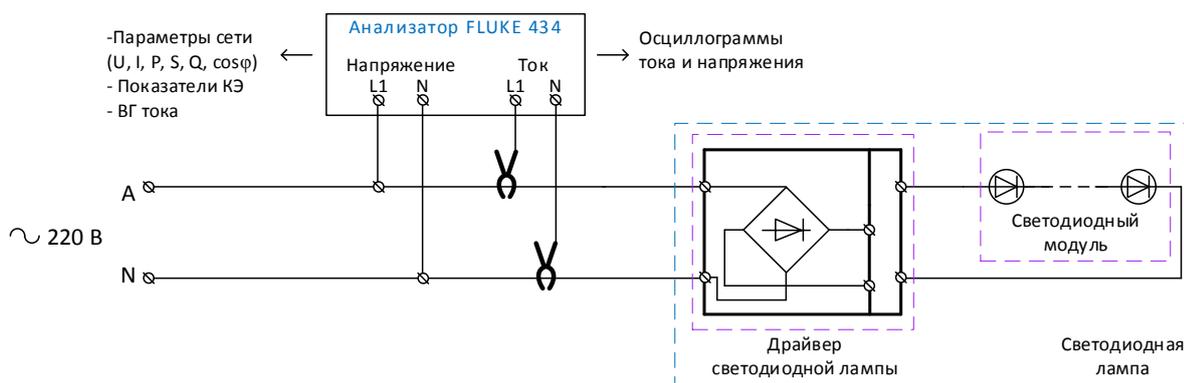


Рис. 3. Электрическая функциональная схема исследования светодиодной лампы
Fig. 3. Electrical functional diagram of the LED lamp research

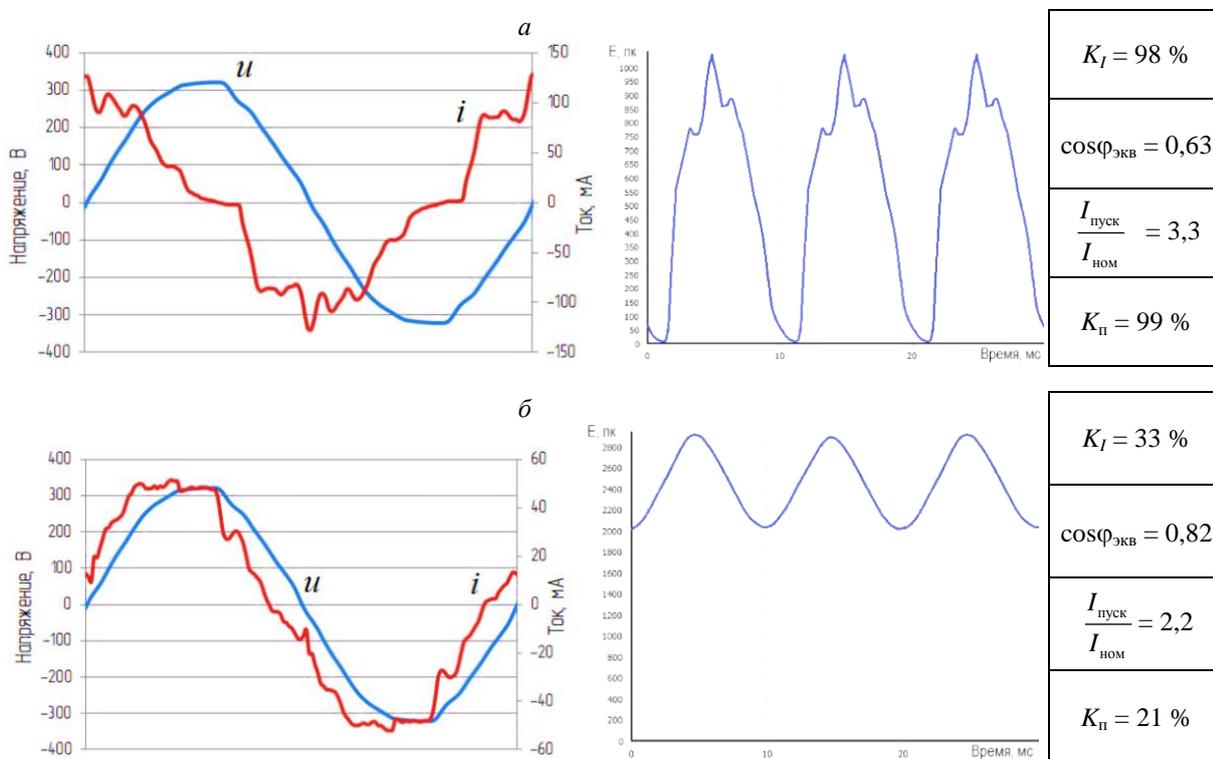


Рис. 4. Осциллограммы токов, напряжений и коэффициента пульсации освещенности. Данные по гармоническим составляющим и энергетическим характеристикам исследуемых светодиодных ламп
Fig. 4. Oscillograms of currents, voltages and pulsation coefficient of illumination. Data on harmonic components and energy characteristics of the LED lamps under study

Сварочные установки

В цехах судостроительного завода эксплуатируются сварочные установки ВДМ-1601, ВКСМ-1000, PL 100, TETRIX 451, ARISTOTIG DTG 405, Elotor 502, характеризующиеся резкопеременными набросами и провалами активной и реактивной мощности. Они оказывают воздействие на величину светового потока ламп; оценка этого воздействия осуществляется через кратковременную и длительную дозы фликера (рис. 5) и рассчитывается (Белей и др., 2016; 2017) по выражению

$$\Psi = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T dt \int_0^{25} G_f^2 S(f, t) df,$$

где G_f – коэффициент приведения размахов колебания напряжения к эквивалентным; T – интервал времени усреднения; $S(f, t)$ – частотный спектр процесса колебания напряжения.

Превышение значения длительной дозы фликера до уровня 2,22 о. е. наблюдается на подстанции № 168 и до уровня 2,73 – на подстанции № 13 (рис. 5) (нормативное значение равно 1,0 согласно ГОСТ 32144-2013² в течение 100 % времени интервала в одну неделю).

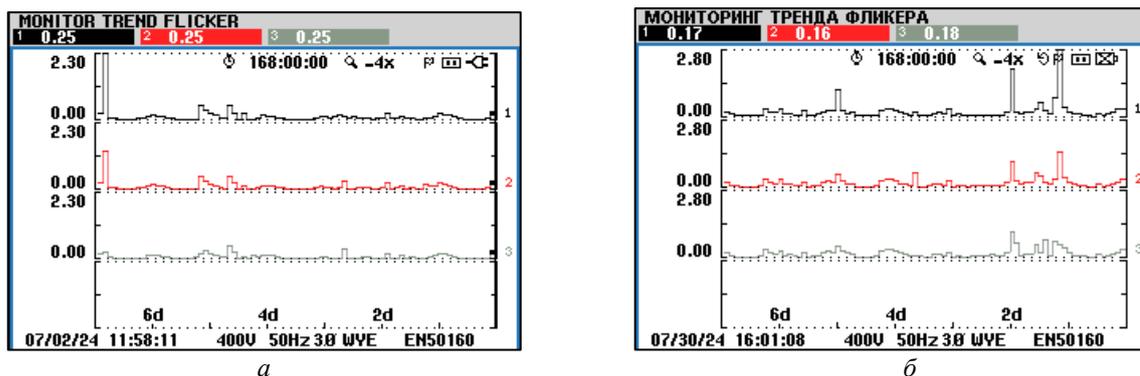
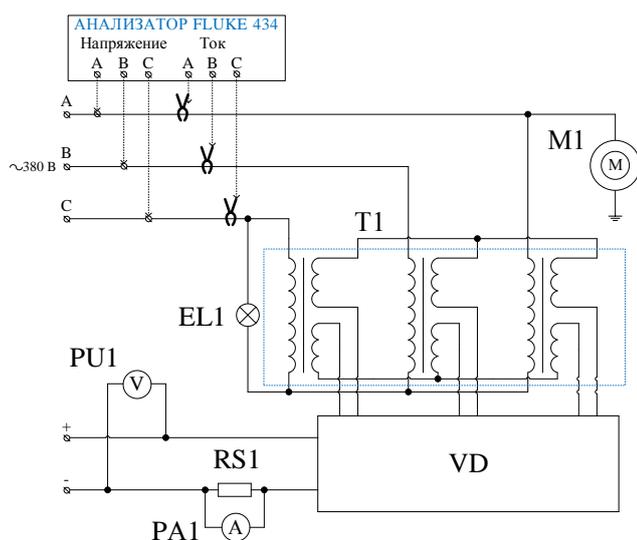


Рис. 5. Измерение длительной дозы фликера на подстанциях № 168 (а) и № 13 (б)
Fig. 5. Measurement of long-term flicker dose at substations N 168 (a) and N 13 (b)

Токи гармоник, поступающие от сварочного выпрямителя, различны в следующих режимах: прерывистые токи при малых нагрузках; трехвентильная коммутация при средних и максимальных нагрузках (Жежеленко, 1984). Результаты проведенных экспериментальных исследований сварочного аппарата ВДМ-1600 (рис. 6) на ПС № 3 завода представлены в табл. 4.



Тип	ВДМ-1600
$U_{\text{сети}}, \text{В}$	380
$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	125
$U_{\text{ном. раб}}, \text{В}$	60
$I_{\text{ном. выпрям}}, \text{А}$	1600
$I_{\text{ном. 1-го поста}}, \text{А}$	315
Число сварочных постов	Не более 10
$\eta, \%$	85

Рис. 6. Электрическая функциональная схема исследования сварочного аппарата и его технические характеристики
Fig. 6. Electrical functional diagram of the welding machine research and its technical characteristics

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик сварочного аппарата
Table 4. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of a welding machine

Фаза	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_{\text{факт}}$	$K_i, \%$	% высших гармоник тока от основной гармоники						
							3	5	7	9	11	13	15
A	392,4	19,9	0,5	4,47	0,12	31	28	11	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2
B	406,7	24,5	1,41	5,61	0,26	11	2	10	0,7	0,1	0,5	0,4	0,1
C	402,6	16,0	2,12	3,03	0,59	28	26	10	0,5	0,7	0,5	0,4	0,2

² ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. Москва : Стандартинформ. 2014. 19 с.

Батареи статических конденсаторов в низковольтной электрической сети

На судостроительном заводе активно реализуются мероприятия по внедрению систем компенсации реактивной мощности, в частности батарей статических конденсаторов в низковольтной электрической сети (табл. 5).

Таблица 5. Результаты, характеризующие неэффективность использования батарей статических конденсаторов в низковольтной электрической сети³
 Table 5. Results characterizing the inefficiency of using static capacitor banks in a low-voltage electrical network

Год реализации мероприятия	Выделено средств, тыс. руб.	Экономия электроэнергии в 2022–2024 гг., (тыс. кВт·ч)/год	Экономия денежных средств в 2022–2024 гг., тыс. руб./год
2022	727,0	0,00	0,00

Неэффективность использования системы компенсации определяется двумя факторами. Первый фактор – повышение напряжения, в частности, результаты мониторинга показателей качества электроэнергии на низшей стороне ПС № 168 (рис. 7) показали отклонение напряжения выше допустимой (согласно ГОСТ 32144-2013) отметки на 10 %.

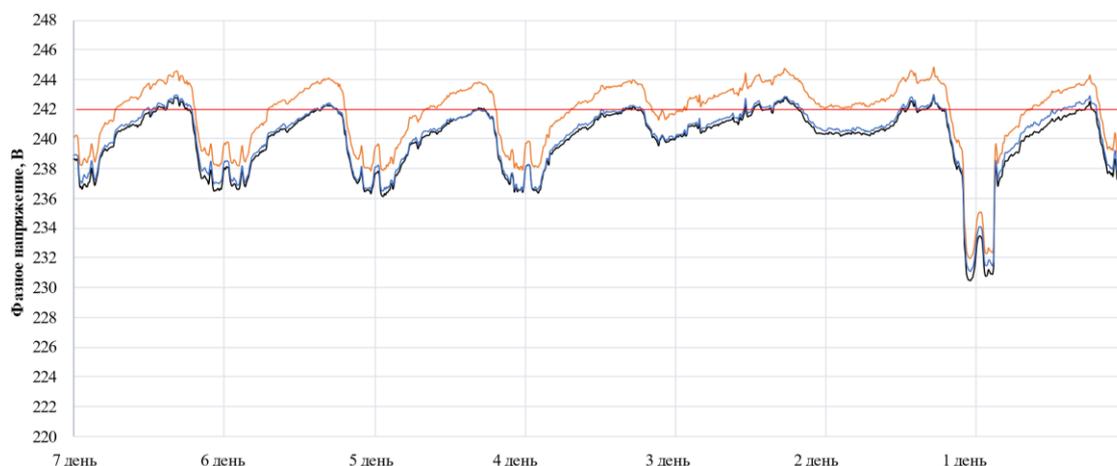


Рис. 7. Результаты измерения отклонений напряжения на подстанции № 168
 Fig. 7. Results of voltage deviation measurements at substation N 168

Второй фактор – нагрев выше допустимого значения конденсаторных установок. Нелинейный элемент в составе сети потребляет меньшую часть передаваемой от источника мощности, затем преобразует ее в гармоническую мощность, которая возвращается в сеть и рассеивается на активных сопротивлениях ее элементов (рис. 8), тем самым вызывая нагрев конденсаторных установок токами высших гармонических и способствуя появлению резонансных условий (Аррилага и др., 1990).

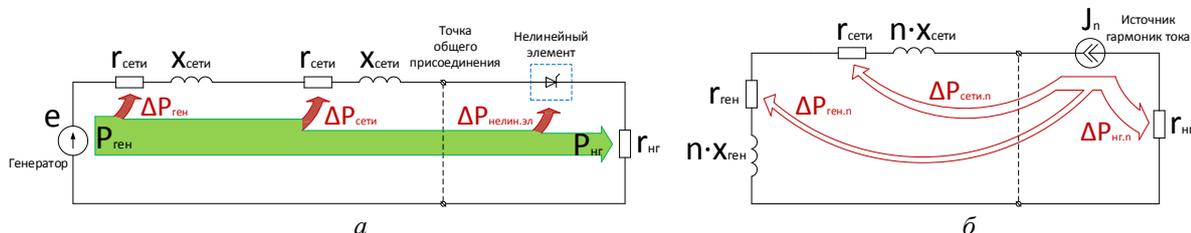


Рис. 8. Поток мощности на основной (а) и гармонической (б) частоте
 Fig. 8. Power flow at fundamental (a) and harmonic (b) frequencies

На подстанциях завода доля распределительных трансформаторов напряжением 6/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y_0 составляет более 70 %, остальные имеют схему Δ/Y_0 . Многие трансформаторы

³Годовой отчет АО «ПСЗ "Янтарь"» за 2023 г. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>.

(около 70 %) эксплуатируются более 40 лет (Белей и др., 2022), поэтому целесообразно заменить их на более эффективные с группой соединения обмоток Δ/Y_0 .

Таблица 6. Технические параметры трансформаторов ТМ-630/6/0,4 и ТМГвэ-630/6/0,4 со схемой соединения обмоток Δ/Y_0

Table 6. Technical parameters of transformers ТМ-630/6/0.4 and ТМГвэ-630/6/0.4 with winding connection diagram Δ/Y_0

Тип	Параметр							Класс энергоэффективности
	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{1\text{НОМ}}$, кВ	$U_{2\text{НОМ}}$, кВ	u_k , %	ΔP_x , кВт	ΔP_k , кВт	I_x , %	
ТМ-630/6/0,4	630	6	0,4	5,5	1,31	7,6	2,0	Отсутствует
ТМГвэ-630/6/0,4	630	6	0,4	5,5	0,73	5,6	2,0	ХЗКЗ

Исследование трансформаторов проведено на наиболее загруженной головной подстанции ПС № 27. Измерения (рис. 9, табл. 7) проводились с помощью анализатора Fluke-434 в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ 30804.4.30-2013⁴ на низшей стороне подстанции.

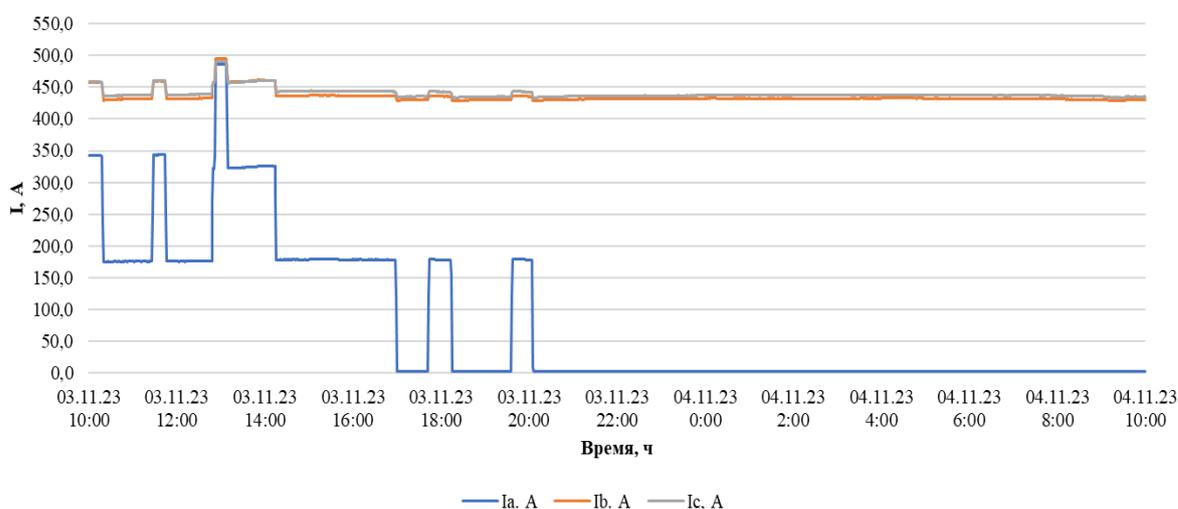


Рис. 9. Графики отклонений токов на низшей стороне подстанции № 27
Fig. 9. Graphs of currents deviations on the low-side of substation N 27

Таблица 7. Результаты измерений коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на подстанции № 27
Table 7. Results of measurements of the zero-sequence voltage unbalance coefficient at substation N 27

Параметр	Результат измерений, %	Нормативное значение в течение 100 % времени интервала в одну неделю, %
K_{0U}	16,34	4,00

При наличии в обмотках трансформатора токов нулевой последовательности (Копылов, 2000)

$$\dot{U}_A = \dot{I}_{A\phi} z_1 = -\dot{E}_A - \dot{E}_0, \quad \dot{U}_B = \dot{I}_{B\phi} z_1 = -\dot{E}_B - \dot{E}_0, \quad \dot{U}_C = \dot{I}_{C\phi} z_1 = -\dot{E}_C - \dot{E}_0,$$

где E_A, E_B, E_C – ЭДС, наводимые трехфазным магнитным полем; E_0 – ЭДС, наводимая полем нулевой последовательности.

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_0

$$\dot{I}_{A\phi} + \dot{I}_{B\phi} + \dot{I}_{C\phi} = \dot{I}_0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Отсюда

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = -3\dot{E}_0 = 3\dot{I}_0 z_0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0,$$

где $z_0 = r_0 + jx_0$ – полное сопротивление нулевой последовательности (табл. 8).

⁴ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2014-01-01. Москва : Стандартинформ. 2014. 58 с.

Таблица 8. Сопротивления трансформатора ТМ-630/6/0,4 при различных схемах соединения обмоток
Table 8. Resistances of the ТМ-630/6/0.4 transformer with different winding connection schemes

$S_{\text{ном}}$, кВА	Схема соединения	Значение сопротивления трансформатора			
		По прямой последовательности		По нулевой последовательности	
		r_1	x_1	r_0	x_0
630	Y/Y ₀	3,1	13,6	30,2	95,8
	Δ/Y ₀	3,4	13,5	3,4	13,5

Рекомендации по снижению несимметрии напряжений

В результате проведенных экспериментов определены следующие предложения по снижению несимметрии напряжений:

1. Одним из самых эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y₀ на трансформатор со схемой Δ/Y₀. При использовании трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀ коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} составляет 16,3 %, при соединении по схеме Δ/Y₀ – 2,3 % (рис. 10), тем самым не превышая допустимого в течение 100 % времени интервала в одну неделю нормативного значения 4 % согласно ГОСТ-32144-2013.

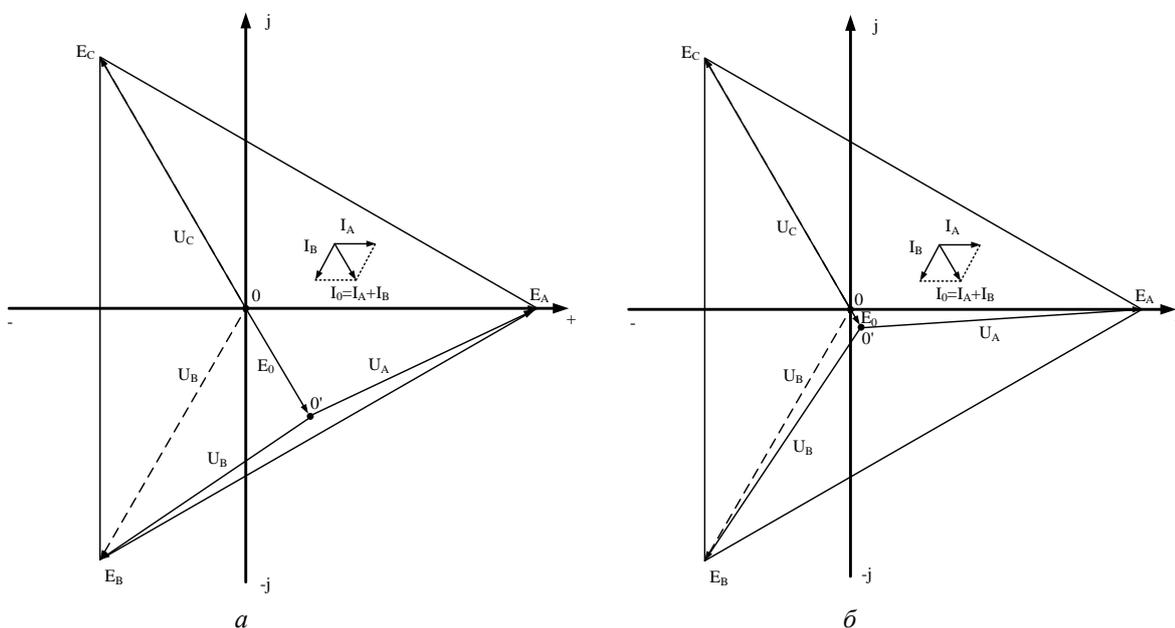


Рис. 10. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений трансформатора при наличии поля нулевой последовательности, собранного по схемам Y/Y₀ (а) и Δ/Y₀ (б)

Fig. 10. Vector diagrams of phase and line voltages of a transformer in the presence of the zero-sequence field assembled according to the Y/Y₀ (a) and Δ/Y₀ (b) schemes

Диаграммы (рис. 10) построены с учетом следующего условия: по двум фазам протекают номинальные токи, а в третьей фазе ток отсутствует. При соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Y₀ в первичной обмотке также имеет место ток нулевой последовательности, который создает встречное поле нулевой последовательности, и результирующее поле нулевой последовательности значительно уменьшается, что приводит к значительному снижению полного сопротивления нулевой последовательности z_0 , ЭДС нулевой последовательности E_0 и снижению коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} (Копылов, 2000).

2. Использование светодиодных осветительных приборов, характеризующихся коэффициентом мощности, близким к 1, позволяет повысить их энергоэффективность за счет снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I и коэффициента пульсаций освещенности $K_{\text{п}}$.

Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности, реализуемая на судостроительном заводе согласно "Стратегии развития объединенной судостроительной компании на период до 2030 г.", предусматривает модернизацию внутрицеховой и наружной систем освещения. Так, замена в цехе № 3 люминесцентных ламп и ламп накаливания (табл. 9) на светодиодные позволила добиться снижения потерь активной мощности и экономии затрат на электроэнергию (табл. 10) в низковольтной электрической сети.

Таблица 9. Предшествующая модернизации структура системы освещения цеха № 3
Table 9. Pre-modernization structure of the lighting system of workshop N 3

Тип лампы	Число ламп, шт	Коэффициент, учитывающий потери в пускорегулирующих устройствах	$T_{\text{ср}}^*$, ч/год	$W_{\text{год}}$ (тыс. кВт·ч)/год
ЛЛ-18	344	1,1	2250	15,33
ЛЛ-36	100	1,1	2250	8,91
ЛЛ-40	84	1,1	2250	8,32
ЛЛ-80	52	1,1	2250	10,30
ЛН-1000	2	1,0	200	0,40
ЛН-300	10	1,0	200	0,60
ЛН-75	21	1,0	200	0,32
Итого	613	–	–	44,16

Примечание. * $T_{\text{ср}}$ – средняя продолжительность работы в год, ч/год.

Таблица 10. Результаты, характеризующие эффективность модернизации системы освещения цеха № 3⁵
Table 10. Results characterizing the effectiveness of modernization of the lighting system of workshop N 3

Выделено средств, тыс. руб.	Экономия электроэнергии в 2023 г., тыс. кВт·ч/год	Экономия денежных средств, за 2023 г., тыс. руб./год	Планируемый срок окупаемости
1 074,7	2,27	260,9	4,12 года

3. Применение систем компенсации реактивной мощности в сети 6 кВ и подключение их к узловой точке с большей мощностью короткого замыкания способствуют снижению несимметрии напряжений.

4. Способы снижения уровня гармоник можно разделить на две группы:

а) схемные и технологические решения:

– выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин;

– повышение фазности полупроводниковых преобразователей. В настоящее время в основном применяются шестифазные преобразователи, генерирующие высокий уровень ВГ тока. Повышение фазности преобразователей до 12, а в ряде случаев до 24 и 48 резко снижает уровни высших гармоник тока;

– подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания $S_{\text{кз}}$;

б) использование фильтрующих устройств: узкополосных фильтров; филтросимметрирующих устройств; статических тиристорных компенсаторов; активных фильтров, которым в последнее время уделяется все большее внимание. Включенный в сеть активный фильтр вырабатывает ВГ тока такой величины и фазы, при которых обеспечивается полная компенсация ВГ тока нелинейного электроприемника (*Вендель и др., 2018*). Для снижения в нулевом проводе уровня высших гармоник тока прямой (7, 13 и т. д.), обратной (5, 11 и т. д.) последовательностей, обусловленных однофазными электроприемниками, целесообразно их симметрирование. При симметричной нагрузке эти гармоники отсутствуют в нулевом проводе (рис. 11, табл. 11). Токи гармоники 3-го порядка и кратных ей гармоник всегда замыкаются по путям нулевой последовательности (*Belej, 2002*). Один из способов их снижения – применение фильтрокомпенсирующего устройства для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками (*Фильтрокомпенсирующее устройство..., 2016*).

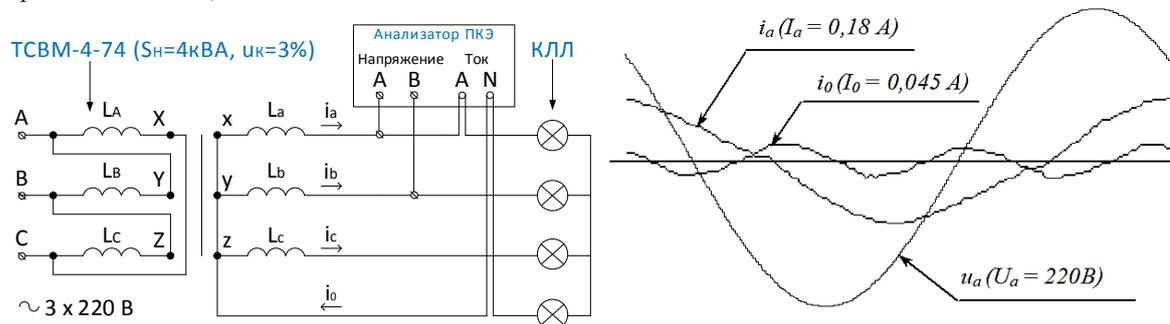


Рис. 11. Лабораторная установка, осциллограммы напряжения и токов компактной люминесцентной лампы ($P = 21$ Вт, $U = 220$ В) (*Belej, 2002*)

Fig. 11. Laboratory setup, voltage and current oscillograms of a compact fluorescent lamp ($P = 21$ W, $U = 220$ V) (*Belej, 2002*)

⁵ См.: Годовой отчет АО "ПСЗ "Янтарь" за 2023 год. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>. ; Годовой отчет АО "ПСЗ "Янтарь" за 2024 год. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>.

Таблица 11. Результаты измерений и обработки данных по энергетическим характеристикам и гармоническим составляющим компактной люминесцентной лампы (Belej, 2002)
 Table 11. Results of measurements and data processing on energy characteristics and harmonic components of a compact fluorescent lamp (Belej, 2002)

Параметр	Значение параметра при напряжении U , В		
	198	220	242
I , А	0,132	0,18	0,23
P , Вт	17	21	26
Q , вар	20	34	49
K_U , %	2,58	2,18	2,3
K_i , %, в том числе	10,83	9,16	10,48
K_3 , %	10,5	9,05	10,21
K_5 , %	2,32	0,86	0,86
K_7 , %	1,55	1,55	1,82
K_9 , %	0,86	0,52	0,41

Для решения задачи снижения несимметрии напряжений необходимо также нормирование уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения.

Меры по нормированию высших гармоник тока в системах электроснабжения

Стандарты многих стран, в том числе и нормативные документы РФ, устанавливают допустимые значения только для гармоник напряжения. Уровень гармоник тока нормируется в Англии и в ряде других стран согласно IEEE⁶ (табл. 12).

В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость в нормировании уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения РФ, что приведет к повышению требований к производителям электрооборудования, касающихся уровня эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, и будет способствовать принятию мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на предприятиях РФ.

Таблица 12. Пределы искажения по току для сетей различного класса напряжения согласно IEEE
 Table 12. IEEE current distortion limits for different voltage class networks

$\frac{I_{кз}^*}{I_{нр}^{**}}$, о. е.	Максимальные гармонические искажения по току, % от тока нагрузки					TDD ^{***} , %
	Порядковые номера нечетных гармоник					
	$3 \leq n \leq 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 \leq n \leq 50$	
Сети напряжением 0,12–69 кВ						
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1 000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Сети напряжением 69–161 кВ						
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1 000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1 000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
Сети напряжением выше 161 кВ						
<20	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
20 < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Примечания: * $I_{кз}$ – максимальный ток короткого замыкания в точке общего присоединения;

** $I_{нр}$ – максимальный потребляемый ток нагрузки нормального режима в точке общего присоединения;

*** TDD – суммарный коэффициент искажения с учетом максимального потребляемого тока.

⁶ Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE Standard 519-1992. 2014. 112 p.

Заключение

Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" включает значительную долю нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. Комплексный подход при проведении исследований такой системы электроснабжения заключается в проведении измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и выявлении взаимосвязей между ПКЭ, реактивной мощностью и потерями электроэнергии.

В результате экспериментальных исследований нелинейных электроприемников установлен высокий уровень высших гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть, преимущественно 3-, 5-, 7-го порядков. Гармоника 3-го порядка и кратные ей гармоники тока замыкаются по путям нулевой последовательности. Таким образом, по нулевому проводу протекают ток частотой 50 Гц, обусловленный несимметричной нагрузкой, и ток третьей гармоники частотой 150 Гц, что приводит к нагреву нулевого провода, падению напряжения.

В ходе исследования показана эффективность использования светодиодных осветительных приборов с улучшенными энергетическими характеристиками для систем освещения завода.

Одним из методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . На судостроительном заводе "Янтарь" намечена замена используемых трансформаторов (ввиду значительного превышения ими нормативных сроков эксплуатации) на энергоэффективные.

Схемные, технологические решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин; повышение фазности полупроводниковых преобразователей; подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания) и фильтрующие устройства (узкополосные фильтры, фильтросимметрирующие устройства и активные фильтры) используются для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость нормирования уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения РФ, что приведет к повышению требований к производителям электрооборудования, касающихся уровня эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, и будет способствовать принятию мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на предприятиях РФ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИОКР № 122030900054-0 "Повышение безопасности и эффективности электроэнергетических систем объектов морской индустрии". Авторы благодарят кандидата технических наук, доцента М. С. Харитонову за предоставление результатов проведенных экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик светодиодных ламп.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ариллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М. : Энергоатомиздат, 1990. 319 с.
- Белей В. Ф., Коротких К. В. О необходимости контроля и нормирования гармоник тока // *Электроснабжение. Передача и распределение*. 2024. № 6(87). С. 36–42. EDN: LUJZFP.
- Белей В. Ф., Коротких К. В. Рекомендации по повышению эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода // *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 4–3(58). С. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.37220/mit.2022.58.4.064>. EDN: QKATAC.
- Белей В. Ф., Харитонов М. С. Оценка фликера в системах электроснабжения при использовании светодиодных источников света // *Промышленная энергетика*. 2017. № 9. С. 56–59. EDN: ZHJSZZ.
- Белей В. Ф., Харитонов М. С. Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости // *Вестник МГТУ*. 2016. Т. 19, № 4. С. 687–696. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-687-696>. EDN: XHMWNR.
- Вендин С. В., Килин С. В., Соловьев С. В. Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4–10 кВ // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2018. № 2(18). С. 3–19. EDN: XTHALB.
- Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. М. : Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
- Копылов И. П. Электрические машины. М. : Логос, 2000. 607 с.
- Фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками : № 2015117043/07 : полезная модель к пат. № 158871 МПК H02J 3/01 / В. Ф. Белей, М. С. Харитонов ; заявл. 05.05.2015 ; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
- Belej V. F. Compact luminescent lamps: Electrical characteristics, EMC problems // *Электротехника*. 2002. № 7. С. 48–51. EDN: MPNPLX.

References

- Arrillaga, J., Bradley, B., Bodger, P. 1990. Harmonics in electrical systems, Moscow. (In Russ.)
- Beley, V. F., Korotkikh, K. V. 2024. About the necessity of control and standarding of current harmonics. *Electric Power. Transmission and Distribution*, 6(87), pp. 36–42. EDN: LUJZFP. (In Russ.)
- Beley, V. F., Korotkikh, K. V. 2022. Recommendations for improving the efficiency of the transformer park of a shipyard power supply system. *Marine Intellectual Technologies*, 4–3(58), pp. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.37220/mit.2022.58.4.064>. EDN: QKATAC. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov, M. S. 2017. Assessment of flicker in power supply systems at using LED light sources. *Industrial Power Engineering*, 9, pp. 56–59. EDN: ZHJSZZ. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov, M. S. 2016. LED lamps in ship lighting systems: Aspects of electromagnetic compatibility. *Vestnik of MSTU*, 19(4), pp. 687–696. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-687-696>. EDN: XHMWNR. (In Russ.)
- Vendin, S. V., Kilin, S. V., Soloviev, S. V. 2018. Evaluation of the effectiveness of measures to reduce asymmetry and non-sinusoidality in 0.4–10 kV distribution networks. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*, 2(18), pp. 3–19. EDN: XTHALB. (In Russ.)
- Zhezhelenko, I. V. 1984. Higher harmonics in power supply systems of enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Kopylov, I. P. 2000. Electrical machines. Moscow. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov M. S. Kaliningrad State Technical University. 2016. Filter-compensating device for three-phase power supply systems with nonlinear loads, Russian Federation, Pat. 158871. (In Russ.)
- Belej, V. F. 2002. Compact fluorescent lamps: Electrical characteristics, problems of electromagnetic compatibility. *Elektrotehnika*, 7, pp. 48–51. EDN: MPNPLX.

Сведения об авторах

Белей Валерий Феодосиевич – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Коротких Кирилл Викторович – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, аспирант, преподаватель;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Kirill V. Korotkikh – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, PhD Student, Lecturer;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

УДК 637.5'6:543.272.62

Охлаждение продукции животного происхождения в воздушно-газовой среде диоксида углерода

Н. Э. Алдамаев*, С. А. Бредихин, Е. Н. Неверов

*Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия;

e-mail: Status_Diamond@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1492-4508>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
20.06.2024;

получена
после доработки
15.07.2024;

принята
к публикации
10.09.2024

Ключевые слова:

холодильная техника,
углекислый газ,
диоксид углерода,
пищевая
промышленность,
сублимация

В нашей стране, как и во всем мире в целом, уделяется особое внимание поиску более современных, энергоэффективных и экологически безопасных способов охлаждения пищевых продуктов, в том числе продукции животного происхождения. Основой большинства технологических процессов холодильной обработки являются рабочие тела, в качестве которых могут выступать природные или синтетические вещества. Ввиду негативного воздействия синтетического сырья на окружающую природную среду предпочтение отдается веществам естественного происхождения. Наибольший интерес в последние двадцать лет в мировом сообществе холодильной техники и технологии проявляется к углекислому газу. Данный холодильный агент активно применяется в традиционных парокомпрессионных холодильных машинах (ПКХМ). В Российской Федерации углекислый газ в качестве рабочего вещества в замкнутых циклах холодильных машин встречается на объектах промышленного назначения, работа которых основана на каскадных циклах. При этом углекислота выступает рабочим веществом нижнего каскада, поскольку относится к холодильным агентам высокого давления. До 2022 г. также активно развивались ПКХМ на основе углекислого газа на транскритических температурных уровнях, где температура конденсации диоксида углерода близка к температурам окружающей среды. В данном исследовании диоксид углерода будет рассматриваться в качестве хладагента при его взаимодействии с продуктом в воздушно-газовой среде во время сублимации, при котором углекислота меняет свое агрегатное состояние из снегообразного в газообразное.

Для цитирования

Алдамаев Н. Э. и др. Охлаждение продукции животного происхождения в воздушно-газовой среде диоксида углерода. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 611–620. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-611-620>.

Cooling of animal products in an air-gas environment of carbon dioxide

Nursultan E. Aldamatov*, Sergey A. Bredihin, Evgeniy N. Neverov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;

e-mail: Status_Diamond@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1492-4508>

Article info

Received
20.06.2024;

received
in revised form
15.07.2024;

accepted
10.09.2024

Key words:

refrigeration,
carbon dioxide,
food industry,
sublimation

Abstract

In our country, as well as throughout the world, special attention is paid to finding more modern, energy-efficient and environmentally friendly methods of cooling food products, including animal ones. The basis of most technological processes of refrigeration treatment is working fluids, which can be natural or synthetic substances. Due to the negative impact of synthetic raw materials on the environment, preference is given to substances of natural origin. The greatest interest in the last twenty years in the world community of refrigeration equipment and technology is shown to carbon dioxide. This refrigerant is actively used in traditional vapor-compression refrigeration machines. In Russia carbon dioxide as a working substance in closed cycles of refrigeration machines is found at industrial facilities whose operation is based on cascade cycles. In this case, carbon dioxide acts as a working substance of the lower cascade, since it belongs to high-pressure refrigerating agents. Until 2022, carbon dioxide-based refrigerants were also actively developed at transcritical temperature levels, where the condensation temperature of carbon dioxide is close to ambient temperatures. In this study, carbon dioxide will be considered as a refrigerant when it interacts with the product in an air-gas environment during sublimation, in which carbon dioxide changes its aggregate state from snow-like to gaseous.

For citation

Aldamatov, N. E. et al. 2024. Cooling of animal products in an air-gas environment of carbon dioxide. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 611–620. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-611-620>.

Введение

В последние годы наша планета столкнулась с двумя основными проблемами, связанными с хладагентами, это разрушение озонового слоя и глобальное потепление. Шагом вперед стала замена хлорфторуглеродов (ХФУ) и гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) на фторуглероды, которые являются продуктами искусственного происхождения и обладают относительно низким потенциалом разрушения стратосферного озона. Однако это не помогает снизить скорость глобального потепления, поскольку прямой вклад этих хладагентов остается. Именно по этой причине научное сообщество рассматривает возможность использования альтернативных природных веществ и других хладагентов с минимальным потенциалом глобального потепления и нулевым потенциалом разрушения озонового слоя (Алдаматов и др., 2023а).

Одними из перспективных направлений, разрабатываемых в холодильной технологии в настоящее время, являются методы, основанные на применении диоксида углерода и позволяющие использовать его в качестве хладоносителя с его последующей утилизацией. К такому направлению можно отнести применение диоксида углерода для транспортировки охлажденных и замороженных пищевых продуктов. Введение Монреальского и Киотского протоколов по вопросу защиты окружающей среды оказало существенное влияние на развитие данного направления. Также в настоящее время остановлено производство хлор- и бромсодержащих хладонов, попадание которых в окружающую среду наносит большой вред экологии, поэтому их применение в холодильных системах законодательно ограничено. В связи с этим многие производители холодильного оборудования, в том числе и используемого для транспортировки пищевых продуктов, рассматривают возможность работы своих систем на альтернативных – "природных" – хладагентах, одним из которых является диоксид углерода (Неверов и др., 2022).

Материалы и методы

Существуют различные способы охлаждения пищевых продуктов при помощи углекислого газа: охлаждение при непосредственном контакте снегообразного CO_2 с поверхностью продукта (Неверов и др., 2015б; Коротких и др., 2019), с подачей снегообразной углекислоты во внутреннюю полость продукта (Буянов и др., 2011б; Неверов, 2014), с нанесением снега как на поверхность, так и во внутреннюю полость мясных продуктов (Буянов и др., 2011а; Буянов и др., 2006; Неверов, 2015), с применением смеси водного льда и снегообразного диоксида углерода (Баилыков и др., 2018) и т. д.

Понижение температуры продукта при непосредственном контакте с хладагентом является эффективным процессом при необходимости интенсивного теплоотвода за короткий временной промежуток, например при замораживании. Достигается это за счет температуры "сухого льда"¹, которая составляет $-78,3\text{ }^\circ\text{C}$, и удельной теплоемкости снегообразной углекислоты, равной $1\ 380\ \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})^2$.

Исследования показывают, что охлаждение при непосредственном контакте снегообразного рабочего вещества с продуктом приводит к подмораживанию поверхностных слоев при чрезмерном количестве диоксида углерода. Поэтому охлаждение при контакте со снегом следует осуществлять при строгом контроле количества подаваемого углекислого газа на поверхность продукта. Аналогичная ситуация происходит при подаче углекислоты во внутреннюю полость. Количество поступающего снега должно соответствовать количеству охлаждаемого продукта. При расчетном количестве подаваемого диоксида углерода подмораживание не наблюдается благодаря создаваемой воздушной пленке на поверхности продукта, которая защищает его от низкотемпературного "ожога" и сохраняет товарный вид сырья (Гринюк и др., 2018).

Целью статьи является анализ различных способов охлаждения пищевых продуктов при сублимации диоксида углерода в воздушно-газовой среде 1) с естественной конвекцией, 2) принудительной конвекцией и 3) наличием холодильной машины с принудительным движением воздушно-газовой среды.

Результатом анализа данных способов будет определение теоретической эффективности их достоинств, недостатков, степени применимости в тех или иных областях пищевой промышленности.

Результаты и обсуждение

При теплообмене сублимирующей углекислоты с естественной конвекцией воздушно-газовой среды рассмотрен процесс охлаждения тушек кролика в установке для транспортировки продуктов в среде диоксида углерода (рис. 1) (Установка..., 2020).

Внутренняя обшивка корпуса изготовлена из листовой нержавеющей стали, разрешенной к применению в пищевой промышленности, а наружная обшивка корпуса – из листового алюминия. Между обшивками уложена теплоизоляция (1). Внутренняя часть корпуса установки разделена на отсеки (2), в которые подается снегообразная углекислота, преобразующаяся из жидкой фазы в форсунках (3). Подача жидкой углекислоты осуществляется через вентиль (4) из баллонов, предусмотренных в кузове транспортного средства.

¹ Углекислый газ, он же углекислота, он же двуокись углерода. URL: <https://weldering.com/uglekislyy-gaz-uglekislota-dvuokis-ugleroda> (Дата обращения: 05.05.2024).

² Удельная теплоемкость сухого льда. URL: <https://www.center-pss.ru/math/teploemkost/suhoiliod.htm> (Дата обращения: 06.05.2024).

По периметру корпуса установки расположены роликовые направляющие (5) для перемещения стальных ящиков (6) с теплоизолированными днищами, в которые предварительно загружается продукт (7). С целью предотвращения поступления теплопритоков извне внутренняя полость двери (9) корпуса установки также заполнена теплоизолированным материалом. Для равномерной подачи снегообразного диоксида углерода в каждую из полостей отсеков внутри последних установлены ряды форсунок, расположенных по всей длине отсеков (соответственно, по всей длине корпуса установки). Распределение диоксида углерода по рядам форсунок в отсеках происходит по распределительным трубопроводам (8).

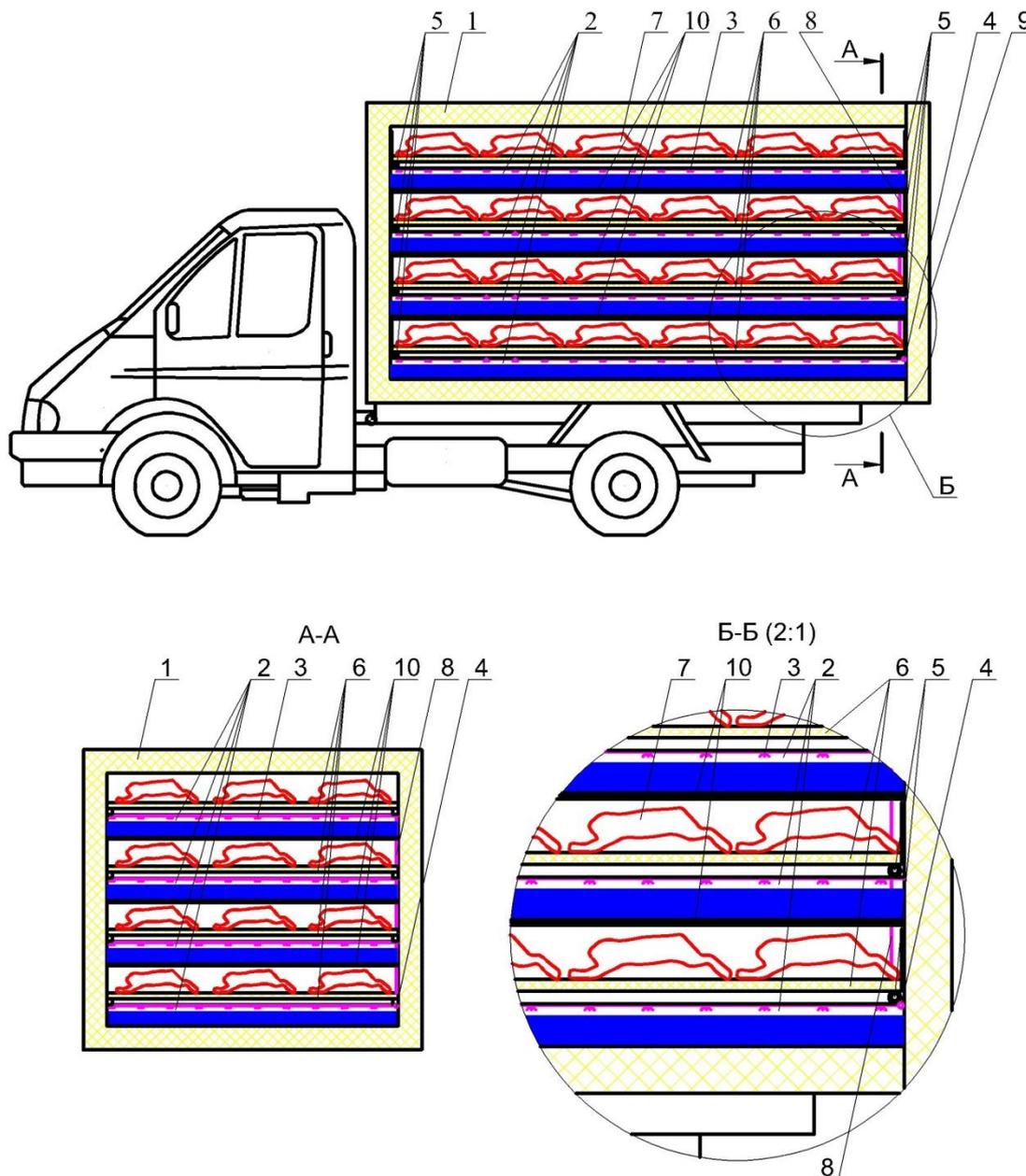


Рис. 1. Макет для транспортировки продуктов в среде диоксида углерода (*Установка..., 2020*)
Fig. 1. Layout for transporting products in a carbon dioxide environment (*Installation..., 2020*)

Благодаря перегородкам (10) установка имеет отдельные теплоизолированные автономные отсеки на случай, если требуется частичная загрузка продукта. Количество отсеков обусловливается высотой ящиков (6) и высотой кузова автомобиля. На рис. 2 показан разрез А-А установки для транспортировки продуктов (на примере тушек кролика) в среде диоксида углерода, а также представлен увеличенный вид выносного элемента Б.

Принцип работы установки заключается в следующем. Продукт загружается непосредственно в стальные ящики (6), где он охлаждается воздушно-газовой средой сублимируемого диоксида углерода. Диоксид углерода подается в жидкой фазе по распределительным трубам трубопровода (8) к форсункам (3),

где происходит его дросселирование и подача в снегообразном состоянии в отсек (2). Распределительные трубы трубопровода (8) расположены под каждым отсеком (2) для охлаждения продуктов. В каждый отсек подается диоксид углерода, позволяющий поддерживать нормируемую температуру в продукте. Необходимое количество углекислоты определяется временем ручного открытия вентиля (4) в зависимости от количества загружаемого продукта. В боковых стенках ящиков (6) имеются перфорации, через которые обеспечивается свободная циркуляция смеси воздуха с диоксидом углерода. Кроме того, ящики (6) не имеют крышек, что обеспечивает охлаждение продуктов воздушно-газовой смесью сверху. Для мелких партий пищевых продуктов предлагается использовать установку для транспортировки продуктов в среде диоксида углерода, конструкция которой представлена на рис. 2 (Неверов и др., 2015б). Устройство состоит из внешнего теплоизолированного контура (11), внутреннего теплоизолированного контура (12), крышки внешнего контура (13), фиксаторов (14), опор (15), перегородок (16), распределительного трубопровода (17), дроссельных форсунок (18), входного патрубка подачи жидкого CO₂ (19) (Установка..., 2020).

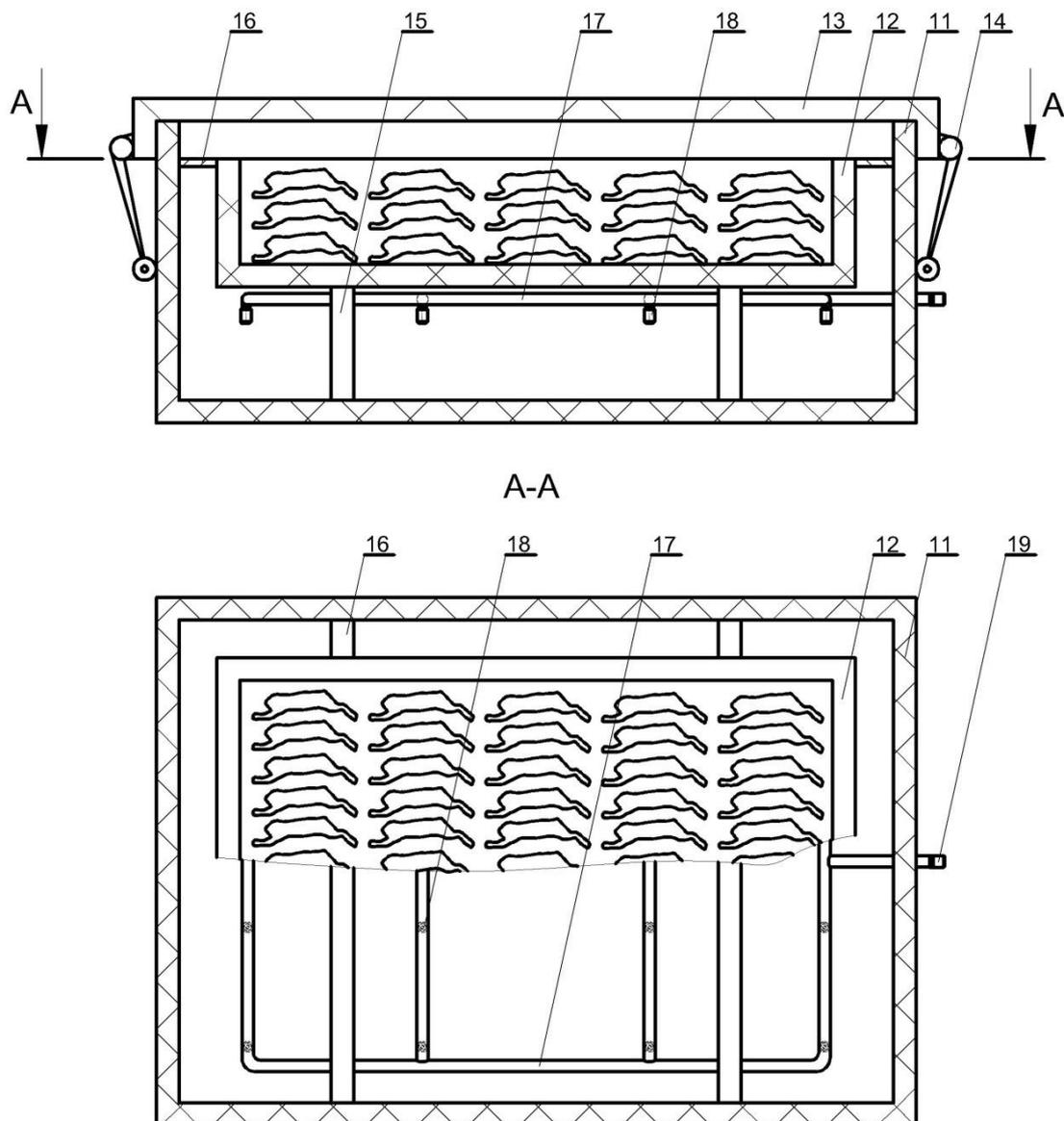


Рис. 2. Установка для транспортировки продуктов в среде диоксида углерода (Установка..., 2020)
 Fig. 2. Installation for transporting products in a carbon dioxide environment (Installation..., 2020)

Принцип работы установки следующий. Охлаждаемый продукт укладывается во внутренний теплоизолированный контур (12). Внутренняя полость устройства изолируется от внешней окружающей среды крышкой (12), которая закрывает внешний теплоизолированный контур (11).

Установка предварительно загружается продуктом и устанавливается на весы для последующего контроля количества подаваемой углекислоты, уточняется вес установки с продуктом без углекислого газа. Баллон с жидкой углекислотой подключается ко входному патрубку подачи (19). Углекислота подается

во внутреннюю часть устройства по распределительному трубопроводу (17). Диоксид углерода, проходя через дроссельные форсунки (18), изменяет свое агрегатное состояние из жидкого в снегообразное. Опоры внутреннего теплоизолированного контура (15) с перегородками (16) образуют свободное пространство, которое в последующем заполняется снегообразной углекислотой. В стенках внутреннего теплоизолированного контура (12) предусмотрены отверстия, благодаря которым диоксид углерода попадает внутрь. В результате во время транспортировки происходит равномерное охлаждение продукта. При этом подмораживание верхних слоев продукта не происходит благодаря внутреннему теплоизолированному контуру (12). Внешний теплоизоляционный контур (11) предотвращает интенсивную сублимацию снегообразной углекислоты, препятствуя поступлению теплопритоков из окружающей среды (*Установка..., 2020*).

В настоящее время ряд исследователей активно разрабатывает системы, работающие на диоксиде углерода для транспортировки замороженной и охлажденной продукции (*Неверов и др., 2015б*). Описанный вид обработки является современным, выгодным и технологичным, так как внутри камеры с продуктом во время транспортировки образуется воздушно-газовая среда, которая обеспечивает необходимый температурно-влажностный режим и отводит часть теплоты от продукта. Данный режим образуется при сублимации углекислоты из снегообразного состояния, тем самым при транспортировке тушек значительно снижается усушка мяса, предотвращаются снижение его качества и порча, увеличивается время транспортировки, что в целом позволяет перевозить продукт на дальние расстояния с минимальными рисками (*Неверов и др., 2022*).

Аппарат, показанный на рис. 1 и 2, применялся авторами для охлаждения тушки кролика. Охлажденным мясом считается при температуре в толще от 0 °С до плюс 4 °С³. Данный аппарат можно использовать не только при транспортировке пищевых продуктов, но и при складском хранении. Вместе с тем температура снегообразного углекислого газа (минус 78,3 °С) позволяет применять данный холодильный агент и аппарат для замораживания продуктов или хранения в замороженном состоянии. Это регулируется количеством заправляемого снегообразного СО₂.

В производственном цикле пищевых продуктов процессу хранения предшествует процесс интенсивного охлаждения или замораживания. Однако с практической точки зрения при естественной конвекции воздушно-газовой среды данные процессы не находят широкого применения, так как предполагают увеличенное количество отведенного тепла за единицу времени. Процессы хранения и интенсивного теплоотвода удобно сравнивать через величину суммарных тепловых поступлений в камеры, где происходит холодная термическая обработка. Основных типов теплопритоков в холодильные камеры существуют пять: теплопритоки через ограждающие конструкции, от продуктов, при вентиляции, теплопоступления при эксплуатации (освещение, мобильный транспорт, при открывании дверей, от людей, от работающего внутри помещений оборудования), а также теплопритоки при дыхании плодоовощной продукции (*Комарова, 2012*). При хранении процентное соотношение теплопоступлений от продуктов составляет от 5 до 20 %, при интенсивном теплоотводе данная величина может достигать от 40 до 60 % от общих значений. Обусловлено это тем, что при хранении продукция чаще всего поступает на складирование в предварительно охлажденном или замороженном состоянии, т. е. до температур, близких к температурам хранения. Работа холодильной установки при этом затрачивается на погашение теплопритоков от четырех основных типов теплопоступлений, практически не воспринимая тепло от продуктов.

При интенсивном теплоотводе продукция поступает с температурой, близкой к температуре окружающей среды, в случае если это плодоовощное сырье, и с температурой более 25 °С – с продукцией животного происхождения после убоя. Одним из важнейших причин высоких теплопоступлений при интенсивном теплоотводе является время, которое зачастую составляет не более 24 часов. Для обеспечения таких сроков теплоотвода появляется необходимость использовать принудительную циркуляцию охлаждающей среды.

На рис. 3 представлен макет установки для охлаждения пищевых продуктов при помощи диоксида углерода с принудительной циркуляцией воздушно-газовой среды.

Установка состоит из теплоизолированного контейнера (1), термической крышки (2), фиксаторов крышки (3), крючков (4), вентилятора с электродвигателем (5). Перед началом процесса теплоотвода от продукта (9) контейнер (1) наполняется снегообразным углекислым газом (10) через дросселирующие устройства (форсунки) (7). Углекислота подается на форсунки через магистральный трубопровод (6), расположенный внутри теплоизолированного контейнера, и через входной штуцер (8). При помощи весов происходит контроль необходимого количества углекислоты. Фиксаторы крышки (3) обеспечивают плотное прилегание крышки к теплоизолированному корпусу, исключая подвод "паразитных" теплопоступлений и отвод газообразного углекислого газа. От герметичности установки также зависит эффективность охлаждения

³ ГОСТ 18157-88. Термины и определения термического состояния мяса. URL: <https://meat-opt.ru/article/termicheskoe-sostoyanie-meat> (Дата обращения: 07.05.2024).

с принудительной конвекцией, так как нагнетаемый вентилятором газо-воздушный поток теряет свою эффективность при разгерметизации. В качестве продукта рассмотрена продукция животного происхождения. Для обеспечения принудительной циркуляции воздушно-газовой среды используется вентилятор (5). В отличие от установки, представленной на рис. 2, мясо подвешивается на крючки (4) таким образом, что продукт не касается снегообразной фракции углекислоты. Это позволяет обеспечить более эффективную циркуляцию воздушно-газовой среды.

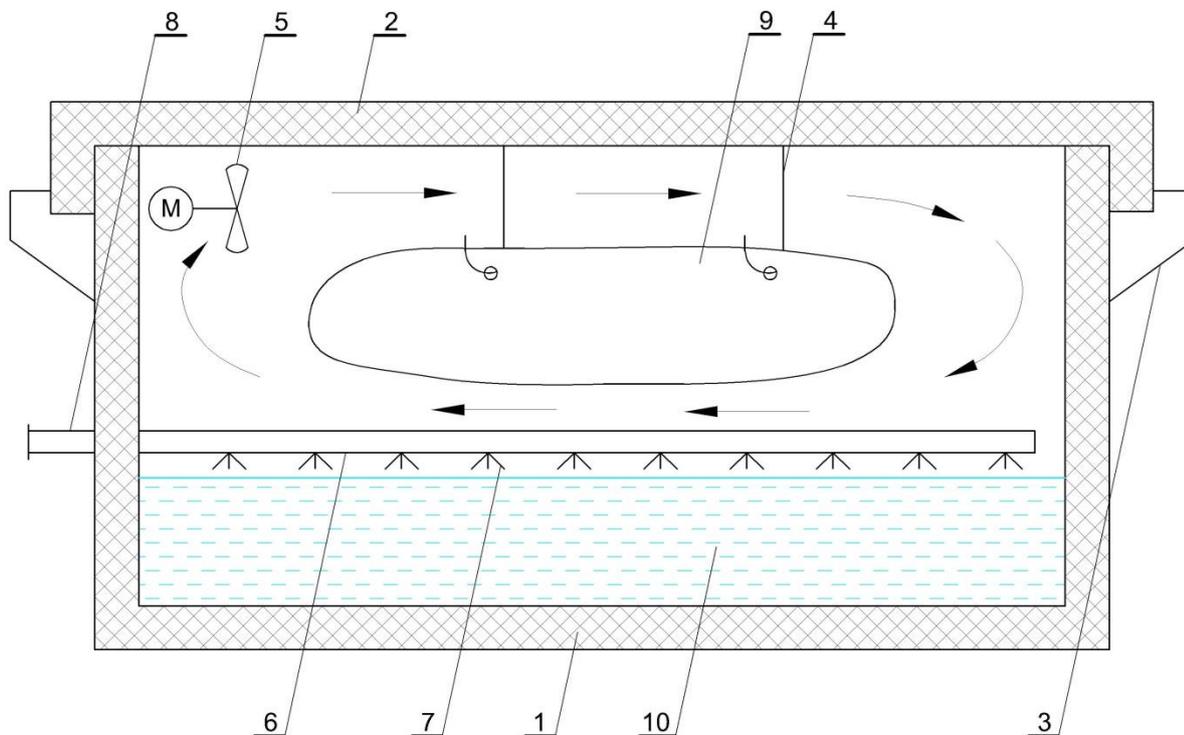


Рис. 3. Макет установки для охлаждения пищевых продуктов при помощи диоксида углерода с принудительной циркуляцией воздушно-газовой среды

Fig. 3. Mock-up of the installation for cooling food products using carbon dioxide with forced circulation of an air-gas medium

Таким образом вентилятор нагнетает холодный воздушно-газовый поток в пространство между сырьем и крышкой установки, забирая теплоту от продукта. Отопленный поток, отражаясь от стенки установки, направляется в ее нижнюю часть – в пространство между нижней частью продукта и снегообразным диоксидом углерода, отдавая теплоту охлаждаемому продукту и одновременно забирая теплоту от его нижней части. За счет подводимой теплоты углекислота сублимирует, а воздушно-газовый поток охлаждается.

Затем поток всасывается вентилятором, нагнетается и процесс повторяется, т. е. обеспечивается более равномерный теплоотвод от охлаждаемого продукта. Это способствует интенсификации процесса теплообмена. В свою очередь, более интенсивный теплообмен позволяет сократить время охлаждения. С точки зрения производства это дает возможность увеличивать производственную мощность системы охлаждения. Растет отношение количества сублимированной для отвода теплоты от продукта углекислоты к количеству углекислоты, сублимировавшей для отвода теплопритоков через ограждающие конструкции. Происходит рост эффективности процесса охлаждения за единицу сублимировавшего хладоносителя, иначе говоря, рабочее вещество затрачивает энергию сублимации для охлаждения продукта в большей степени, чем для восполнения "паразитных" теплопритоков.

Метод не ограничивается применением в условиях стационарного производства. При транспортировке пищевых продуктов имеется возможность интенсивного кратковременного охлаждения транспортируемого продукта в начальный период транспортировки. С достижением необходимой температуры продукта можно осуществлять долгосрочную транспортировку с отключенным вентилятором при естественной конвекции воздушно-газовой среды.

Однако данный аппарат имеет свои минусы. Отрицательной стороной охлаждения с принудительной конвекцией является увеличение величины усушки продукта. При чрезмерно высокой усушке продукция теряет свой товарный вид. Часть теплоотводящей энергии CO_2 уходит на отвод теплоты от работающего двигателя вентилятора.

На рис. 4 представлен макет установки для охлаждения пищевых продуктов при помощи диоксида углерода с принудительной циркуляцией воздушно-газовой среды и воздухоохладителем холодильной машины.

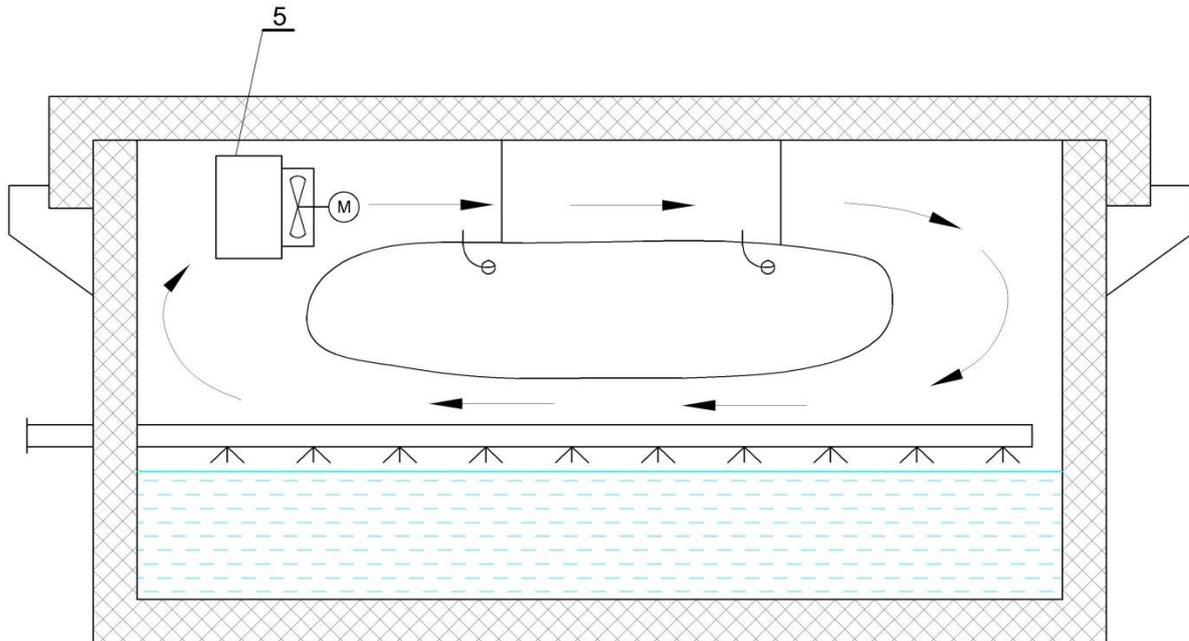


Рис. 4. Макет установки для охлаждения пищевых продуктов при помощи диоксида углерода с принудительной циркуляцией воздушно-газовой среды и воздухоохладителем холодильной машины

Fig. 4. The mock-up of the installation for cooling food products using carbon dioxide with forced circulation of an air-gas medium and an evaporator of a refrigerating machine

Отличительной особенностью данной установки является наличие воздухоохладителя (ВО) (5). Для установки выбран ВО с оребренными трубками.

Схема используемой холодильной машины представлена на рис. 5 (Алдаматов и др., 2023б). Парожидкостная смесь после расширительного устройства направляется в воздухоохладитель, где происходит отвод тепла от охлаждаемой среды. Подвод данной теплоты к хладагенту позволяет рабочему веществу полностью принять газообразное состояние, и цикл повторяется (Буянов и др., 2011б).

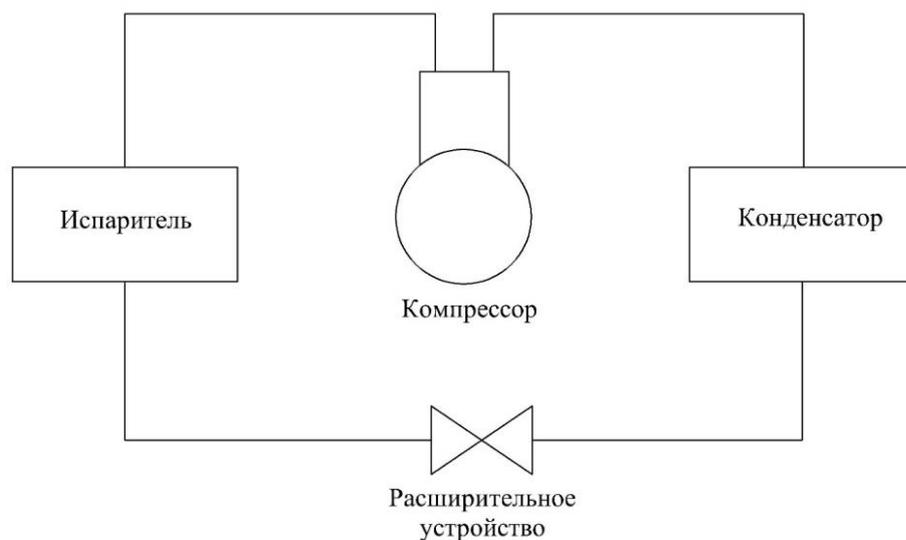


Рис. 5. Базовый цикл парокомпрессионной холодильной машины
Fig. 5. The basic cycle of a steam compression refrigerating machine

Принципиальная конструкция воздухоохладителя парокомпрессионной холодильной машины представлена на рис. 6.

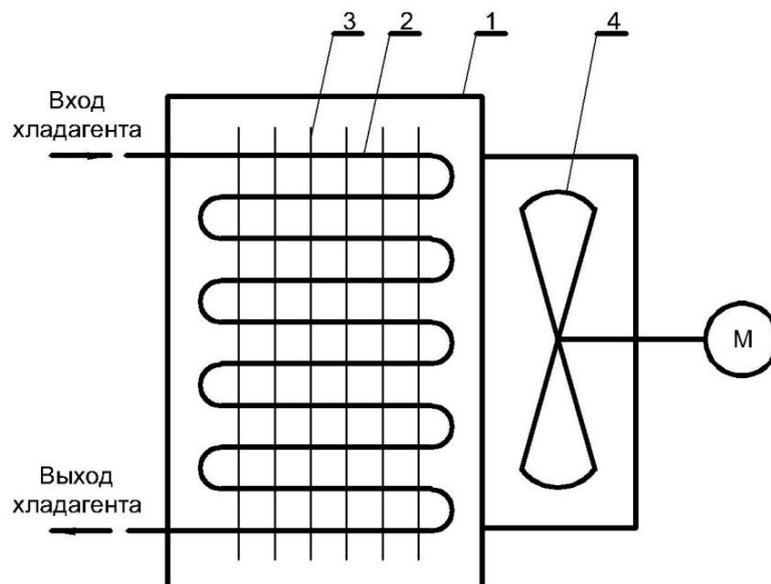


Рис. 6. Принципиальная конструкция воздухоохладителя

Fig. 6. The basic design of an air cooler

Аппарат состоит из каркаса (1), теплообменных трубопроводов (2), ребер (3) и вентилятора (4).

За счет создаваемого внутри корпуса ВО разряжения теплый воздух всасывается вентилятором (4). При этом воздух отдает свою теплоту хладагенту, который циркулирует внутри теплообменных труб (2). Оребренная поверхность теплообмена обеспечивает увеличение эффективности процесса охлаждения, что достигается увеличением площади теплообменной поверхности и повышением степени турбулизации воздушного потока. Воздух, полностью отдав расчетное количество теплоты, нагнетается вентилятором в охлаждаемый объем, одновременно забирая теплоту от двигателя вентилятора.

Таким образом, принцип действия установки с принудительной циркуляцией воздуха и воздухоохладителем холодильной машины можно описать следующим образом.

Как и в случае с установкой, представленной на рис. 3, в качестве охлаждаемого сырья рассмотрена продукция животного происхождения. Вентилятор всасывает охлажденную в трубах воздухоохладителя холодильной машины воздушно-газовую смесь и нагнетает в пространство между продуктом и крышкой. Отопленный при отведении тепла от верхней части продукта поток, отражаясь от стенки установки, направляется в нижнюю часть рабочего объема – пространство между нижней частью продукта и снегообразным диоксидом углерода. Происходит охлаждение воздушно-газовой смеси за счет сублимации углекислоты. В результате процесса сублимации практически мгновенно отводится теплота, выделяемая с нижней части продукта, за счет чего происходит частичный нагрев воздушно-газовой смеси. Затем поток всасывается вентилятором ВО, нагнетается и процесс повторяется. Это обеспечивает более равномерный и более интенсивный теплоотвод от охлаждаемого продукта за относительно короткий промежуток времени.

Наличие воздухоохладителя холодильной машины позволяет продолжать охлаждение продукта даже при полной сублимации снегообразной углекислоты. Это имеет особое значение при транспортировке продукта. Данное конструктивное решение позволяет увеличить коэффициент надежности установки как устройства в целом и сократить время интенсивного охлаждения или замораживания продукта в начальный период.

Метод применим как при стационарном производстве, так и в условиях транспортировки.

Заключение

Теоретические исследования показывают, что природные холодильные рабочие вещества применимы для охлаждения не только в традиционных замкнутых циклах холодильных машин. Имеется возможность охлаждать продукт при непосредственном контакте с углекислым газом при его сублимации. Охлаждение пищевых продуктов при непосредственном контакте с углекислым газом является наиболее энергоэффективным процессом, так как в процессе охлаждения традиционными замкнутыми холодильными машинами, при котором рабочее вещество не контактирует с продуктом, затрачивается энергия на работу основных компонентов (компрессор, конденсатор, воздухоохладитель и т. д.). Помимо этого, температура рабочего вещества замкнутой ПКХМ, в среднем, на 10 °С ниже требуемой, что также увеличивает энергозатраты

(Холодильные..., 1997). Данная разность температур обуславливается толщиной стенки трубы, в которой циркулирует хладагент, гидравлическими потерями, особенностью конструкции воздухоохладителя и т. д.

Применение углекислого газа в качестве хладоносителя благоприятно влияет на биологические процессы. Охлаждение диоксидом углерода приводит к замедлению автолитических процессов, а также снижению размножения микроорганизмов в продукции в процессе хранения, что позволяет увеличить срок хранения сырья.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алдаматов Н. Э., Бредихин С. А. Анализ углекислого газа для применения его в качестве холодильного агента // Пищевая инженерия, экспертиза и безопасность продукции АПК: инновационные решения и перспективы развития : сб. науч. тр. IV национальной науч.-практ. конф., г. Москва, 1 июня 2023. Москва, 2023а. С. 19–24. EDN: MSENIC.
- Алдаматов Н. Э., Бредихин С. А., Журавлёв А. В. Анализ эффективности транскритических углекислотных систем в сравнении с R404a и R290 // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023б. № 3. С. 201–208. EDN: EARIXX.
- Башлыков М. В., Неверов Е. Н. Исследование процесса охлаждения рыбы в среде "водный лед + снегообразный диоксид углерода" // Пищевые инновации и биотехнологии: сб. тез. VI междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Кемерово, 16 мая 2018. Кемерово : Кемеровский гос. ун-т, 2018. Т. 1. С. 98–101. EDN: XPMNNJ.
- Буянов О. Н., Киселева Т. Ф., Неверов Е. Н., Нечаев С. Н. Исследование процесса холодильной обработки рыбы диоксидом углерода // Техника и технология пищевых производств. 2011а. № 1(20). С. 64–67. EDN: NDTDDX.
- Буянов О. Н., Неверов Е. Н. Применение снегообразного диоксида углерода для охлаждения мяса птицы // Вестник международной академии холода. 2006. № 4. С. 36–39. EDN: NYOMTD.
- Буянов О. Н., Неверов Е. Н., Нечаев С. Н. Исследование процесса охлаждения упакованной рыбы в среде диоксида углерода // Вестник международной академии холода. 2011б. № 4(1). С. 39–42. EDN: ONZOML.
- Гринюк А. Н., Неверов Е. Н. Влияние диоксида углерода на качество охлаждаемого мяса кролика // Вестник КрасГАУ. 2018. № 2(137). С. 118–122. EDN: NVDRFP.
- Комарова Н. А. Холодильные установки. Основы проектирования. Кемерово: Кемеровский технологический ин-т пищевой пром-сти, 2012. 368 с.
- Коротких П. С., Неверов Е. Н. Замораживание плодоовощной продукции диоксидом углерода // Холодильная техника и биотехнологии : сб. тез. I национальной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Кемерово, 1 января – 31 декабря 2019 г., Кемерово, 2019. С. 235–237. EDN: TOTZNA.
- Неверов Е. Н. Охлаждение рыбы снегообразным диоксидом углерода // Вестник международной академии холода. 2014. № 2. С. 53–57. EDN: SQJOFR.
- Неверов Е. Н. Применение диоксида углерода для холодильной обработки тушек птицы // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 4(39). С. 111–115. EDN: SYPSQG.
- Неверов Е. Н., Гринюк А. Н., Третьякова Н. Г. Применение диоксида углерода для охлаждения тушек кролика // Современные проблемы науки и образования. 2015а. № 2(2). С. 37–42. EDN: UZIZHJ.
- Неверов Е. Н., Коротких П. С., Гринюк А. Н., Мокрушин М. Ю. Исследование процесса охлаждения диоксидом углерода тушек кролика в процессе транспортировки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 5(211). С. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-211-5-111-121>. EDN: FDMAGW.
- Неверов Е. Н., Новиков Е. В. Охлаждение мяса кролика диоксидом углерода // Будущее науки – 2015 : сб. науч. ст. 3-й междунар. молодежной науч. конф., г. Курск, 23–25 апреля 2015 г. : в 2 т. Курск : Университетская кн., 2015б. Т. 2. С. 155–159. EDN: TYBYPV.
- Установка для транспортировки продуктов в среде диоксида углерода (2 варианта) : пат. 2723500 Рос. Федерация / Е. Н. Неверов, А. Г. Шапов, П. С. Коротких, И. Б. Плотников ; № 2019115577 ; заявл. 21.05.2019 ; опубл. 11.06.2020, Бюл. № 17.
- Холодильные машины / под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. СПб. : Политехника, 1997. 991 с.

References

- Aldamatov, N. E., Bredihin, S. A. 2023a. Analysis of carbon dioxide for its use as a refrigerant. In coll. articles of the IV national scientific and practical conference *Food engineering, examination and safety of agricultural products: innovative solutions and development prospects*. Moscow, 1 June, 2023. Moscow, pp. 19–24. EDN: MSENIC. (In Russ.)
- Aldamatov, N. E., Bredihin, S. A., Zhuravlev, A. V. 2023b. Analysis of the effectiveness of transcritical carbon dioxide systems in comparison with R404a and R290. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*, 3, pp. 201–208. EDN: EARIXX. (In Russ.)

- Bashlikov, M. V., Neverov, E. N. 2018. Investigation of the fish cooling process in the "water ice + snow-like carbon dioxide" environment. In coll. articles of the VI International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Vol. 1, Kemerovo, 16 May, 2018. Kemerovo, pp. 98–101. EDN: XPMNNJ. (In Russ.)
- Buyanov, O. V., Kiseleva, T. F., Neverov, E. N., Nechaev, S. N. 2011a. Investigation of the process of refrigerating fish with carbon dioxide. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1(20), pp. 64–67. EDN: NDTDDX. (In Russ.)
- Buyanov, O. V., Neverov, E. N. 2006. The use of snow-like carbon dioxide for cooling poultry meat. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 4, pp. 36–39. EDN: HYOMTD. (In Russ.)
- Buyanov, O. N., Neverov, E. N., Nechaev, S. N. 2011b. Investigation of the cooling process of packaged fish in a carbon dioxide environment. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 4(1), pp. 39–42. EDN: ONZOML. (In Russ.)
- Grinyuk, A. N., Neverov, E. N. 2018. The effect of carbon dioxide on the quality of chilled rabbit meat. *Bulletin of KSAU*, 2(137), pp. 118–122. EDN: NVDRFP. (In Russ.)
- Komarova, N. A. 2012. Refrigeration units. Design basics. Kemerovo. (In Russ.)
- Korotkih, P. S., Neverov, E. N. 2019. Freezing of fruits and vegetables with carbon dioxide. In coll. articles of the 1 National Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Kemerovo, pp. 235–237. EDN: TOTZNA. (In Russ.)
- Neverov, E. N. 2014. Cooling fish with snow-like carbon dioxide. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2, pp. 53–57. EDN: SQJOFR. (In Russ.)
- Neverov, E. N. 2015. The use of carbon dioxide for the refrigeration treatment of poultry carcasses. *Food Processing: Techniques and Technology*, 4(39), pp. 111–115. EDN: SYPSQG. (In Russ.)
- Neverov, E. N., Grinyuk, A. N., Tretyakova, N. G. 2015a. The use of carbon dioxide for cooling rabbit carcasses. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 2(2), pp. 37–42. EDN: UZIZHJ. (In Russ.)
- Neverov, E. N., Korotkih, P. S., Grinyuk, A. N., Mokrushin, M. Yu. 2022. Investigation of the process of cooling rabbit carcasses with carbon dioxide during transportation. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 5(211), pp. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-211-5-111-121>. EDN: FDMAGW. (In Russ.)
- Neverov, E. N., Novikov, E. V. 2015. Cooling rabbit meat with carbon dioxide. In coll. articles of the 3rd International Youth Scientific Conference in 2 vol., 23–25 April, 2015. Vol. 2. Kursk, pp. 155–159. EDN: TYBYPV. (In Russ.)
- Neverov, E. N., Shamov, A. G., Korotkih, P. S., Plotnikov, I. B. 2020. Installation for transporting products in a carbon dioxide environment (2 options), Russian Federation, Pat. 2723500. (In Russ.)
- Refrigerating machines. 1997. Ed. L. S. Timifeyevsky. Saint Petersburg. (In Russ.)

Сведения об авторах

Алдаматов Нурсултан Эсенбекович – Лиственничная аллея, 2а, г. Москва, Россия, 127550;
Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия
им. К. А. Тимирязева (РГАУ – МСХА), аспирант;
e-mail: Status_Diamond@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1492-4508>

Nursultan E. Aldamatov – 2a Listvennichnaya Alley, Moscow, Russia, 127550;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, PhD Student;
e-mail: Status_Diamond@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1492-4508>

Бредихин Сергей Алексеевич – Лиственничная аллея, 2а, г. Москва, Россия, 127550;
Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия
им. К. А. Тимирязева (РГАУ – МСХА), д-р техн. наук, профессор;
e-mail: sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2191-4982>

Sergey A. Bredihin – 2a Listvennichnaya Alley, Moscow, Russia, 127550;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Dr Sci. (Engineering),
Professor; e-mail: sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2191-4982>

Неверов Евгений Николаевич – ул. Ю. Двужильного, 12б, г. Кемерово, Россия, 650040;
Кемеровский государственный университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: neverov42@mail.ru

Evgeny N. Neverov – 12b, U. Dvujhilnogo Str., Kemerovo, Russia, 650040;
Kemerovo State University, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: neverov42@mail.ru

Скорлупа кедрового ореха как сорбент в плодово-ягодном виноделии

К. Р. Иванова*, Е. А. Привалова

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия;
e-mail: kristinochka_iskakova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9353-1075>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.06.2024;

получена
после доработки
16.09.2024;

принята
к публикации
18.09.2024

Ключевые слова:
плодово-ягодное
сусло,
сорбция,
кислотность,
сахарокислотный
индекс,
скорлупа
кедрового ореха

Снижение кислотности сусла является актуальной задачей плодового виноделия в связи с необходимостью создания благоприятных условий для развития дрожжей и сбраживания сахаров. Методы кислотопонижения, применяемые в традиционном виноделии, не позволяют эффективно элиминировать яблочную кислоту, которая вносит основной вклад в кислотность плодово-ягодных вин. В ходе исследования рассмотрена возможность применения адсорбционного способа снижения кислотности сусла, полученного из плодов груши уссурийской (титруемая кислотность 15,5–18,7 г/дм³), с использованием в качестве сорбента специально подготовленной скорлупы кедрового ореха. Обработка сусла скорлупой кедрового ореха проводилась в статическом режиме и при перемешивании; продолжительность обработки варьировалась от 2 ч до 10 сут. Скорлупа кедрового ореха обладает хорошей адсорбционной способностью в отношении кислот, содержащихся в грушевом сусле, и позволяет снизить их количество на 27 %. Экспериментально установлено, что скорлупа кедрового ореха обладает низкой селективностью по отношению к технологически важным компонентам сусла и сорбирует также сбраживаемые сахара и полифенольные соединения, в результате чего возможно нежелательное снижение сахарокислотного индекса сусла. Увеличение степени измельчения ореховой скорлупы способствует увеличению ее адсорбционной активности. Изменение режима обработки сусла позволяет подобрать условия, при которых возможно добиться рекомендуемых значений сахарокислотного индекса.

Для цитирования

Иванова К. Р. и др. Скорлупа кедрового ореха как сорбент в плодово-ягодном виноделии. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 621–630. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-621-630>.

Pine nut shell as a sorbent in fruit winemaking

Kristina R. Ivanova*, Elena A. Privalova

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia;
e-mail: kristinochka_iskakova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9353-1075>

Article info

Received
04.06.2024;

received
in revised
16.09.2024;

accepted
18.09.2024

Key words:
fruit must,
sorption,
acidity
sugar acid index,
pine nut shell

Abstract

Reducing the must acidity is a critical task in fruit winemaking due to the need to create favorable conditions for the yeast development and the fermentation of sugars. Acid reduction methods used in traditional winemaking are not suitable for fruit must, since they do not effectively eliminate malic acid which is the main contributor to the fruit wines acidity. The study has examined the possibility of using the adsorption method to reduce the acidity of must obtained from Ussuri pear fruits (titratable acidity of 15.5–18.7 g/dm³) using specially prepared pine nut shells as a sorbent. The must was treated with pine nut shells in a static mode and with stirring; the treatment duration varied from 2 h to 10 days. The pine nut shells have good adsorption capacity for acids contained in pear must and can reduce their amount by 27 %. It has been experimentally established that the pine nut shells have low selectivity for technologically important components of the must and also sorb fermentable sugars and polyphenolic compounds, which may result in an undesirable decrease in the sugar-acid index (SAI) of the must. An increase in the degree of grinding the nut shells helps to increase its adsorption activity. Changing the must processing mode allows you to select conditions under which it is possible to achieve the recommended SAI values.

For citation

Ivanova, K. R. et al. 2024. Pine nut shell as a sorbent in fruit winemaking. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 621–630. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-621-630>.

Введение

Сырье для плодово-ягодного виноделия характеризуется высоким содержанием кислот, что препятствует нормальному течению процесса сбраживания сусла. Величина кислотности плодово-ягодного сусла, не оказывающая отрицательного влияния на процесс брожения, составляет 8–10 г/дм³ (Вечер и др., 1976). Содержание кислот в плодово-ягодных соках в ряде случаев может достигать уровня 30–35 г/дм³ (Литовченко и др., 2004). Наиболее распространенный способ снижения кислотности сока в плодово-ягодном виноделии – разбавление его водой. При этом одновременно происходит снижение сахаристости сока, что отрицательно сказывается на накоплении спирта в процессе брожения (Бурьян, 2003; Гусакова и др., 2011). При добавлении в сок воды рекомендуется вносить дополнительное количество сахара, которое определяется расчетом (Литовченко и др., 2004). Негативной стороной такого улучшения технологических качеств сока является снижение экстрактивности и биологической ценности вина.

Снижение кислотности в традиционном виноделии достигается также химическими (мелование, осаждение двойной соли винной и яблочной кислот) и физико-химическими (ионный обмен, электродиализ, обработка холодом) методами (Кушнерева и др., 2010; Агеева и др., 2020). Большинство химических препаратов, применяемых для обработки виноградных вин, способствует снижению содержания винной кислоты и практически не влияют на яблочную (Марковский, 2006), которая вносит основной вклад в кислотность плодово-ягодных вин. Кроме того, введение кислотопонижателей приводит к повышению содержания в вине ионов калия и кальция. Обработка холодом приводит к незначительному снижению кислотности (Марковский, 2006).

В практике виноделия активно используются адсорбционные методы в целях профилактики кристаллических и коллоидных помутнений (Обожин и др., 2003; Вагнер и др., 2019; Horvat et al., 2019; Агеева и др., 2020), удаления из виноматериалов ионов тяжелых металлов, антибиотиков, (Никифорова и др., 2007; Антоненко и др., 2020), улучшения органолептических показателей (Виноградов и др., 2011). Разнообразие сорбентов органической и неорганической природы позволяет использовать их в том числе и для обработки соков и виноматериалов с целью корректировки их состава. В ряде источников имеются сведения о том, что традиционные сорбенты, используемые в виноделии, проявляют активность и в отношении кислот (Виноградов и др., 2010a; Maslov-Bandić et al., 2022; Cheng et al., 2022; Horvat et al., 2019).

В настоящее время возрос интерес к использованию в качестве сорбентов целлюлозосодержащих материалов: ореховой скорлупы (Шайхиев и др., 2020), стеблей топинамбура, льняного волокна, древесных опилок (Никифорова и др., 2007), коры, шишек, древесной биомассы (Карабаева и др., 2023). Одним из перспективных материалов этого ряда является скорлупа кедрового ореха (СКО), представляющая собой многотоннажный отход производства кедрового масла. Преобладающими компонентами в составе СКО являются целлюлоза и лигнин (Воронина и др., 2022). В ряде работ показана возможность использования ореховой скорлупы в качестве сорбента. Например, скорлупа использовалась для очистки сточных вод от ионов меди (Агеева и др., 2009) и никеля (Воронина и др., 2022a). Сорбент, полученный из скорлупы, можно также применять для извлечения нефтепродуктов (Агеева и др., 2007), метиленового голубого (Дороганова и др., 2018) из воды и водных растворов. Из скорлупы кедрового ореха получали активный уголь, который проявлял высокую сорбционную способность при извлечении ионов металлов из водных растворов (Лабузова и др., 2015). СКО является низкодольным сырьем, что позволяет использовать ее в пищевой отрасли (Егорова и др., 2007). В работе (Супрун, 2023) отмечается, что сорбент, полученный путем низкотемпературной обработки СКО, можно использовать в качестве насадки для иммобилизации дрожжей при производстве плодового вина.

Целью настоящего исследования является изучение сорбционных свойств скорлупы кедрового ореха применительно к обработке плодово-ягодных сусел для корректировки их кислотности.

Материалы и методы

Объектом исследования послужило сусло, полученное из плодов груши уссурийской (*Pyrus ussuriensis* Maxim.) урожая 2022–2023 гг., собранных в Иркутской области. Консервацию сусла обеспечивали внесением 100 мг/дм³ метабисульфита калия. В качестве сорбента использована скорлупа кедрового ореха, полученная с помощью калибровочно-дробильного аппарата при производстве кедрового масла. Перед использованием СКО очищали от пленок и остатков ядер кедрового ореха и обрабатывали по методике, изложенной в патенте (Способ производства..., 2022), аналогично обработке древесной щепы. Обработка проводилась с целью делигнификации и увеличения сорбционной способности СКО и включала двукратную пропитку водой и замораживание, а также кипячение в растворе карбоната натрия и отмывку до нейтральной реакции. Указанная методика применялась автором работы (Супрун, 2023) для обработки СКО, используемой в качестве насадки для иммобилизации дрожжей при производстве вина из мелкоплодных яблок, имеющих высокую кислотность, причем было отмечено снижение в виноматериале концентрации ряда органических кислот, в частности яблочной. В работе (Егорова и др., 2007) отмечено, что полученный из СКО по подобной низкотемпературной методике сорбент обладает сорбционной способностью, близкой к уровню активных углей.

Сорбционную способность СКО в отношении технологически значимых компонентов суслу оценивали в сравнении с активным углем, бентонитом, цеолитом, кизельгуром, поскольку, по мнению ряда исследователей (Виноградов и др., 2010б; Maslov-Bandić et al., 2022; Cheng et al., 2022; Horvat et al., 2019; Rakonczás et al., 2023), эти сорбенты, используемые традиционно с целью стабилизации и осветления виноматериалов, могут влиять на концентрацию компонентов суслу, в том числе и кислот.

В работе использовали активированный уголь (АУ) марки БАУ-А (ГОСТ 6217-74¹, производитель ООО "Волгоград-Реахим"), бентонит (Б) (производитель ООО "Твекс", Московская область, с. Новопетровское), цеолит (Ц) (клиноптилолит, Сокирницкое месторождение в Закарпатской области, Украина), кизельгур (К) (природная двуокись кремния).

Обработку суслу сорбентами проводили в двух режимах: 1) в статических условиях в течение 4, 7 и 10 дней при температуре 5 °С; 2) при перемешивании в шейкере Certomat BS-1 в течение 2, 4 и 6 ч при температуре 20 °С и скорости 150 об/мин. Дозировка сорбентов составляла 4 г/л; по окончании обработки сорбент отфильтровывали; эксперименты проводили в трехкратной повторности. Стандартные отклонения определяемых показателей приведены в соответствующих таблицах.

В процессе обработки в грушевом сусле отслеживали изменение плотности, титруемой кислотности, массовой концентрации сахаров, суммарной концентрации фенольных соединений. Содержание сахаров, суммарного количества фенольных соединений и кислот определяли стандартными методами, принятыми в винодельческом производстве (Методы..., 2009). Определение влажности, степени измельчения и адсорбционной активности сорбентов проводили по ГОСТ 4453-74².

Результаты и обсуждение

Выход и характеристики образцов суслу представлены в табл. 1. Основные характеристики сорбентов, определенные в соответствии с ГОСТ 4453-74, приведены в табл. 2.

Таблица 1. Характеристика грушевого суслу. Данные выражены как среднее значение трех повторностей ± стандартное отклонение
Table 1. Characteristic of pear must. Data are expressed as the average value of three replicates ± the standard deviation

Характеристика	Образец суслу (год сбора урожая)		
	С1 (2022)	С2 (2022)	С3 (2023)
Выход, %	69	69	60
Плотность, кг/м ³	1 056,0 ± 0,5	1 041,0 ± 0,5	1 065,0 ± 0,5
Титруемая кислотность, г/дм ³	16,0 ± 0,1	15,5 ± 0,1	18,7 ± 0,1
Сахар, г/дм ³	118,0 ± 0,9	80,0 ± 0,9	163,0 ± 0,9
Сумма фенольных соединений, мг/дм ³	1 260,0 ± 0,9	1 370,0 ± 0,9	1 936,0 ± 0,9
Сахарокислотный индекс	7,4	5,2	8,7

Таблица 2. Характеристика использованных сорбентов. Данные выражены как среднее значение трех повторностей ± стандартное отклонение
Table 2. Characteristic of sorbents. Data are expressed as the average value of three replicates ± the standard deviation

Сорбент	Показатель по ГОСТ 4453-74		
	Влажность, %	Проход через сито (диаметр ячеек 1 мм), %	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г
СКО-1*	5,3 ± 0,05	1,3 ± 0,05	162,0 ± 0,1
Активный уголь	4,7 ± 0,05	4,2 ± 0,05	248,0 ± 0,1
Бентонит	9,5 ± 0,05	99,9 ± 0,5	205,0 ± 0,1
Цеолит	4,0 ± 0,05	7,6 ± 0,05	219,0 ± 0,1
Кизельгур	3,0 ± 0,05	99,9 ± 0,5	220,0 ± 0,1

Примечание. *СКО без дополнительного измельчения.

Суслу, полученное из плодов груши уссурийской разных годов сбора, имело повышенное содержание кислот – 15,5–18,7 г/дм³ (табл. 1). Для нормального развития дрожжей и сбраживания сахаров необходимо иметь кислотность не выше 8–10 г/дм³ (Вечер и др., 1976). При контакте со всеми исследуемыми сорбентами

¹ ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия. Введен 01.01.1976. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/17175/>.

² ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия. Введен 01.01.1976 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017212>.

плотность сусла изменялась незначительно, в связи с чем от дальнейшего мониторинга плотности было решено отказаться.

Изменение концентрации титруемых кислот при обработке сусла С1 и С2 в статических условиях и в условиях перемешивания отражено в табл. 3.

Таблица 3. Кислотность грушевого сусла при обработке сорбентами, г/дм³.
Данные выражены как среднее значение трех повторностей ± стандартное отклонение
Table 3. Acidity of pear must when treated with sorbents, g/dm³.
Data are expressed as the average value of three replicates ± the standard deviation

Образец сусла	Без обработки	Продолжительность обработки	СКО-1	АУ	Ц	Б	К
С1	16,0	4 дня	15,4 ± 0,1	12,7 ± 0,1	15,0 ± 0,1	15,0 ± 0,1	14,4 ± 0,1
		7 дней	14,7 ± 0,1	12,5 ± 0,1	14,7 ± 0,1	14,0 ± 0,1	14,0 ± 0,1
		10 дней	12,7 ± 0,1	11,3 ± 0,1	11,0 ± 0,1	13,5 ± 0,1	12,7 ± 0,1
С2	15,5	2 ч	8,3 ± 0,1	9,1 ± 0,1	8,6 ± 0,1	11,2 ± 0,1	9,9 ± 0,1
		4 ч	7,3 ± 0,1	6,7 ± 0,1	5,3 ± 0,1	10,1 ± 0,1	9,0 ± 0,1
		6 ч	6,5 ± 0,1	6,3 ± 0,1	5,0 ± 0,1	9,3 ± 0,1	8,7 ± 0,1

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что обработка грушевого сусла всеми исследованными сорбентами привела к снижению содержания в нем титруемых кислот. Наибольшей адсорбционной активностью по метиленовому голубому обладали активный уголь и цеолит (табл. 2). При обработке сусла этими сорбентами было отмечено наиболее выраженное снижение кислотности (на 4,7 и 5 г/дм³ за 10 дней соответственно). Скорлупа кедрового ореха в статических условиях проявила более низкую сорбционную активность в отношении титруемых кислот. Их содержание через 10 дней контакта СКО-1 с суслом уменьшилось на 3,3 г/дм³ от исходного. В исследованиях, описывающих влияние различных сорбентов на эннологические показатели вин, были отмечены менее выраженные изменения кислотности. Так, авторы работы (*Rakonczás et al., 2023*) не выявили существенного влияния бентонита на титруемую кислотность вин. В то же время другие авторы (*Cheng et al., 2022; Maslov-Bandić et al., 2022*) зафиксировали снижение титруемой кислотности после обработки сусла и вина бентонитом на 4,2 и 0,6 г/дм³ соответственно (на 29 и 9 % от исходного). Причем в первом случае это снижение произошло в значительной степени за счет яблочной кислоты, концентрация которой в сусле уменьшилась на 1,9 г/дм³, в то время как содержание винной кислоты практически не изменилось. В случае грушевого сусла кислотность обеспечивается в основном яблочной кислотой (*Гусакова и др., 2011; Бурлака и др., 2018*), чем предположительно объясняется более выраженное ее снижение при обработке бентонитом. Авторами работы (*Виноградов и др., 2010а*) также зафиксировано снижение кислотности виноматериала на 6 % от исходной при обработке активным углем, полученным из семян винограда. Дозировка сорбента и время его контакта с виноматериалом были ниже использованных в данном исследовании, а компонентный состав кислот не изучался. Основной вклад в кислотность виноградных виноматериалов вносит винная кислота, которая, по данным (*Rakonczás et al., 2023; Cheng et al., 2022*), незначительно изменяется при обработке виноматериала бентонитовыми продуктами.

В условиях перемешивания в шейкере в течение 2–6 ч интенсивность элиминирования кислот в среднем увеличилась. Скорлупа кедрового ореха позволила удалить из сусла от 47 до 57 % кислот от первоначального количества. Остальные исследованные сорбенты продемонстрировали сходную тенденцию.

Известно, что сорбционная активность связана с величиной частиц сорбента (*Чесноков и др., 2014; Воронина и др., 2022б*). Поэтому было изучено влияние степени измельчения ореховой скорлупы на ее сорбционные свойства. Исходную скорлупу (СКО-1) измельчали в ступке и на лабораторной мельнице МЛ-1, в результате чего получили дополнительно два образца, характеристика которых представлена в табл. 4. В результате измельчения СКО до размера частиц менее 1 мм ее адсорбционная активность по метиленовому голубому увеличилась на 8 %.

Обработку грушевого сусла С3 измельченной скорлупой проводили в условиях перемешивания. При этом дополнительно в сусле было определено содержание сахаров с целью расчета сахарокислотного индекса и полифенольных соединений, оказывающих влияние на цветные характеристики сусла и виноматериала. Интенсивность элиминирования кислот возрастает с увеличением степени измельчения СКО (табл. 5). Необходимый уровень содержания кислот в сусле был достигнут при его обработке СКО-3 в течение 4–6 ч контакта, для СКО-2 – в течение 6 ч. При такой длительности процесса эффективность сорбции кислот достигает 60–70 %.

Таблица 4. Характеристика скорлупы кедрового ореха разной степени измельчения.
Данные выражены как среднее значение трех повторностей \pm стандартное отклонение
Table 4. Characteristics of pine nut shells of varying degree of grinding.
Data are expressed as the average value of three replicates \pm the standard deviation

Сорбент	Показатель по ГОСТ 4453-74		
	Влажность, %	Проход через сито (диаметр ячеек 1 мм), %	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г
СКО-1	5,3 \pm 0,2	1,3 \pm 0,2	162,0 \pm 0,1
СКО-2	4,7 \pm 0,2	32,0 \pm 0,3	170,0 \pm 0,1
СКО-3	4,2 \pm 0,2	100,0 \pm 0,06	176,0 \pm 0,1

Таблица 5. Кислотность грушевого сусла при обработке СКО разной степени измельчения, г/дм³.
Данные выражены как среднее значение трех повторностей \pm стандартное отклонение
Table 5. Acidity of pear must treated with pine nut shell of varying degree of grinding, g/dm³.
Data are expressed as the average value of three replicates \pm the standard deviation

Образец сусла	Без обработки	Продолжительность обработки	СКО-1	СКО-2	СКО-3
С3	18,7	2 ч	13,6 \pm 0,1	13,3 \pm 0,1	11,3 \pm 0,1
		4 ч	12,7 \pm 0,1	8,8 \pm 0,1	6,4 \pm 0,1
		6 ч	9,7 \pm 0,1	7,4 \pm 0,1	5,3 \pm 0,1

Сахарокислотный индекс сусла С3 находился в пределах минимально рекомендуемого значения (8,7 единиц). Уменьшение титруемой кислотности сусла сопровождается снижением его сахаристости, в связи с чем изменяется и сахарокислотный индекс сусла (рис. 1).

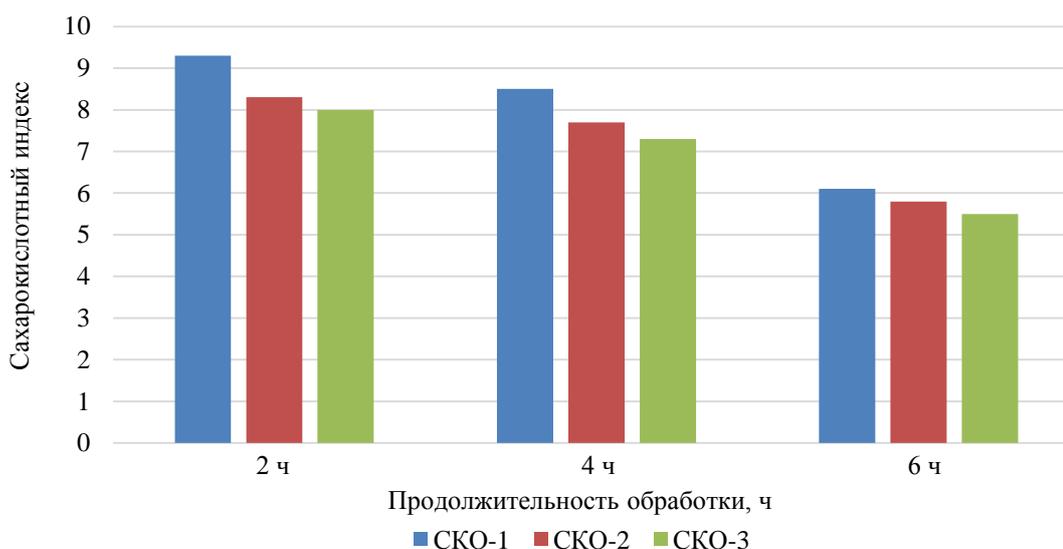


Рис. 1. Изменение сахарокислотного индекса в сусле С3 в процессе обработки СКО разной степени измельчения
Fig. 1. Change in sugar acid index of C3 pear must after pine nut shell treatment with different degree of grinding

При кратковременной обработке (в течение 2 ч) сусла С3 его сахарокислотный индекс увеличился с 8,7 до 9,3 при использовании СКО-1. Следует отметить, что сусло С3 изначально содержало 18,7 г/дм³ сахаров (табл. 1), и при двухчасовом контакте с сорбентом было удалено около 27 % от их начального количества. Таким образом, содержание сахаров после обработки было на уровне 13,6 г/см³, что заметно выше рекомендуемого нижнего предела для плодово-ягодного сусла (*Шелковская и др., 2013; Вечер и др., 1976*). Исследователи, изучавшие процесс сбраживания плодово-ягодного сусла на насадках из древесины и СКО, отмечают, что на поверхностях насадок способны осаждаться различные компоненты сусла, вследствие чего закрепляемые на насадке дрожжи находятся в зоне повышенных концентраций ферментов, аминокислот, сахаров, витаминов, что способствует ускорению процесса брожения (*Оганесянц, 1984; Супрун, 2023*).

Содержание полифенольных соединений в обработанном сусле возрастает с увеличением продолжительности обработки и уменьшением крупности частиц СКО (рис. 2). Вероятно, при перемешивании происходит не только сорбция полифенольных соединений суслу на скорлупе, но и экстракция полифенолов из скорлупы в сусле. Возможность экстракции полифенолов виноматериалами из твердых элементов мезги винограда является общеизвестным фактом, также экстракция полифенолов из дубовой щепы является важной составляющей технологии производства специальных типов вин (*Кишковский и др., 1984; Христюк и др., 2011*). Значительная экстракция полифенолов в грушевое сусле может привести к нежелательному увеличению его цветности.

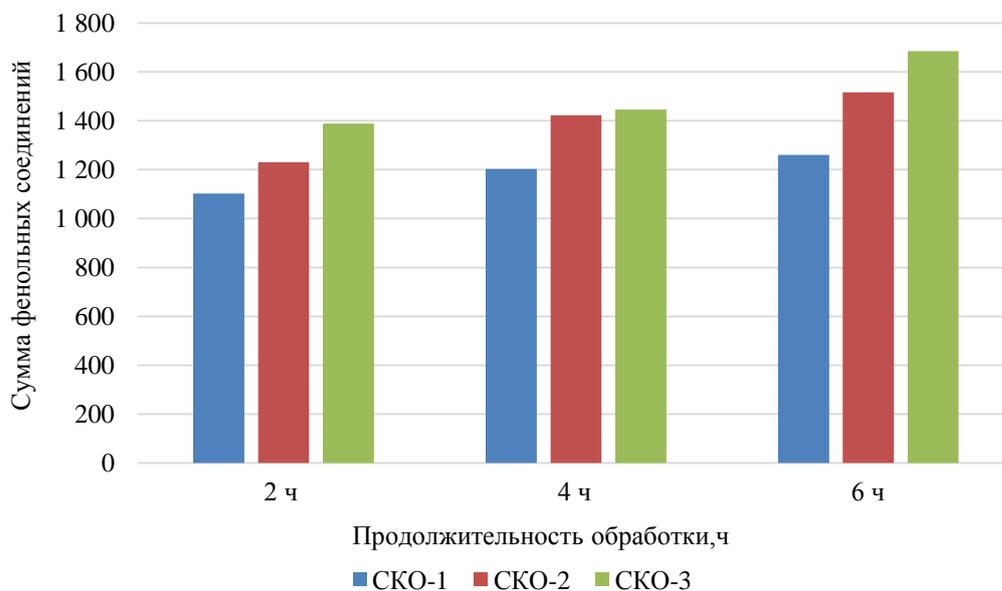


Рис. 2. Изменение содержания фенольных соединений в сусле С3 в процессе обработки СКО разной степени измельчения

Fig. 2. Change in polyphenol compounds of C3 pear must after pine nut shell treatment

Заключение

Подготовленная низкотемпературным способом скорлупа кедрового ореха может рассматриваться как потенциальный сорбент для обработки плодово-ягодного суслу с целью корректировки его состава по содержанию сбраживаемых сахаров и титруемых кислот.

Обработка суслу скорлупой в режиме перемешивания позволяет повысить его сахарокислотный индекс до приемлемых значений, обеспечивающих нормальное сбраживание. При этом повышение степени измельчения скорлупы способствует интенсификации сорбции как сахаров, так и титруемых кислот, а из СКО более мелких фракций дополнительно экстрагируются полифенольные соединения, что может быть нежелательным эффектом в производстве вина в связи с увеличением цветности суслу. Изменение режима обработки суслу позволяет подобрать условия, при которых возможно добиться рекомендуемых значений сахарокислотного индекса.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Агеева Н. М., Марковский М. Г. Сравнительный анализ способов кислотопонижения в виноградных винах // Виноделие и виноградарство. 2006. № 3. С. 16–17. EDN: PDVJNX.
- Агеева Н. М., Марковский М. Г., Антоненко М. В. Термоксид-3А для стабилизации вин к кристаллическим помутнениям // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2020. Т. 63, № 3. С. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2020-3-63-206-216>. EDN: KRGRPP.
- Адеева Л. Н., Одинцова М. В. Сорбент для очистки сточных вод из скорлупы кедровых орехов // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52, № 7. С. 86–89. EDN: KEZRWB.
- Адеева Л. Н., Одинцова М. В., Синицын Д. А. Сорбент из скорлупы кедровых орехов для очистки сточных вод от нефтепродуктов // Омский научный вестник. 2007. № 1(52). С. 26–28.

- Антоненко О. П., Антоненко М. В., Резниченко К. В., Абакумова А. А. [и др.]. Исследование эффективности применения сорбентов различной природы для удаления антибиотиков // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2020. Т. 29. С. 247–250. DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-247-250>. EDN: CNDQMT.
- Бурлака С. Д., Музыченко Г. Ф., Алексеева А. А. Анализ влияния кислотности вина на его качество и стабильность // Научные труды КубГТУ. 2018. № 4. С. 221–226. EDN: OVICQN.
- Бурьян Н. И. Практическая микробиология виноделия. Симферополь : Таврида, 2003. 559 с.
- Вагнер В. А., Кажобекова А. Е., Камаева С. И. Улучшение качества белых виноградных виноматериалов при обработке активированным углем // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф., г. Барнаул, 14–15 марта 2019 г. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2019. С. 92–95. EDN: YQLHZQ.
- Вечер А. С., Юрченко Л. А. Сидры и яблочные игристые вина. М. : Пищевая промышленность, 1976. 135 с.
- Виноградов В. А., Загоруйко В. А., Макаров А. С., Ермолин Д. В. Влияние обработки активированным углем на показатели качества виноматериалов // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2011. № 4. С. 23–24. EDN: TVYLPT.
- Виноградов В. А., Кречетов И. В., Загоруйко В. А., Садлаев О. О. [и др.]. Исследование активированного угля из семян винограда // Виноградарство и виноделие. 2010а. Т. 40. С. 102–105. EDN: VDHAGR.
- Виноградов В. А., Кречетов И. В., Загоруйко В. А., Садлаев О. О. [и др.]. Влияние обработки виноматериалов активированным углем из семян винограда на изменение катионного состава металлов // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2010б. № 1. С. 31–32. EDN: TVYSDJ.
- Воронина Ю. С., Свергузова С. В., Шайхиев И. Г. Исследование адсорбционных свойств скорлупы кедровых орехов // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология : сб. докл. междунар. науч. конф., Алушта – Белгород, 30 мая – 3 июня, 2022 г. Белгород : БГТУ, 2022б. С. 115–121. EDN: ZRAYZQ.
- Воронина Ю. С., Свергузова С. В., Шайхиев И. Г. Физико-химические свойства скорлупы кедровых орехов // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология : сб. докл. междунар. науч. конф., Алушта – Белгород, 30 мая – 3 июня, 2022 г. Белгород : БГТУ, 2022а. С. 108–115. EDN: XXXGCZ.
- Гусакова Г. С., Евстафьев С. Н. Перспективы использования плодов уссурийской груши в виноделии // Химия растительного сырья. 2011. № 3. С. 173–178. EDN: OHSUTB.
- Дороганова О. В., Мирошниченко Н. А., Свергузова С. В., Дороганова Е. В. [и др.]. Использование скорлупы кедровых орехов для извлечения метиленового голубого из водных растворов // Актуальные вопросы охраны окружающей среды : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., г. Белгород, 17–19 сентября 2018 г. Белгород : БГТУ, 2018. С. 104–108. EDN: LBOAQZ.
- Егорова Е. Ю., Митрофанов Р. Ю., Лебедева А. А. Получение сорбента из скорлупы кедрового ореха методом низкотемпературной обработки // Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 35–39. EDN: KZCLDN.
- Карабаева М. И., Мирсалимова С. Р., Салиханова Д. С., Убайдуллаева Н. Н. Адсорбционная очистка воды адсорбентами на основе растительного сырья // Химия растительного сырья. 2023. № 3. С. 47–62. EDN: ВКАКТР.
- Кишковский З. Н., Мерджаниан А. А. Технология вина. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. 504 с.
- Кушнерева Е. В., Агеева Н. М. Сравнительный анализ современных способов кислотопонижения // Альманах современной науки и образования. 2010. № 8. С. 80–84. EDN: OPNDFT.
- Лабузова О. М., Носкова Т. В., Ильина Е. Г. Получение активированного угля из скорлупы кедрового ореха с целью удаления из воды ионов алюминия // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования : сб. науч. ст. междунар. конф., г. Барнаул, 20–24 октября 2015 г. Барнаул, 2015. С. 1515–1518. EDN: UVPJHR.
- Литовченко А. М., Тюрин С. Т. Технология плодово-ягодных вин. Симферополь : Таврида, 2004. 368 с.
- Марковский М. Г. Совершенствование технологии и методов оценки качества виноградных вин на основе анализа и регулирования их кислотного состава : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01. Краснодар, 2006. 24 с.
- Методы технохимического контроля в виноделии / под ред. В. Г. Гержиковой. Симферополь : Таврида, 2009. 304 с.
- Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Багровская Н. А., Родионова М. В. Сорбционная очистка вин // Химия растительного сырья. 2007. № 1. С. 69–73. EDN: HETVFO.
- Обожин А. Н., Агеева Н. М., Марковский М. Г. Применение комплексных минеральных сорбентов для обработки вин // Известия вузов. Пищевая технология. 2003. № 4(275). С. 114–115. EDN: QCPISP.

- Оганесянц Л. А. Разработка нового способа производства плодово-ягодных вин специального типа : дис. ... канд. тех. наук : 005.18.08. М., 1984. 226 с.
- Способ производства белого яблочного вина : пат. 2783427 Рос. Федерация / Н. П. Супрун, В. В. Пулди, Г. С. Гусакова, С. Н. Евстафьев ; № 2021124193 ; заявл. 16.08.2021 ; опубл. 14.11.2022, Бюл. № 32.
- Супрун Н. П. Влияние сорбента из скорлупы кедрового ореха на состав органических кислот и летучих компонентов яблочных вин // Вестник КрасГАУ. 2023. № 8. С. 266–272. EDN: NBRMNF.
- Христюк В. Т., Якуба Ю. Ф., Бабенкова М. А. Усовершенствованная технологическая схема производства портвейна из перспективных красных и белых сортов винограда // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 71. С. 161–170. EDN: OIGYEN.
- Чесноков Н. В., Микова Н. М., Иванов И. П., Кузнецов Б. Н. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Химия. 2014. Т. 7, № 1. С. 42–53. EDN: RZDEPP.
- Шайхиев И. Г., Свергузова С.В., Шайхиева К. И., Сапронова Ж. А. Использование скорлупы грецкого ореха (*UGLANS REGIA*) в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из природных сточных вод // Химия растительного сырья. 2020. № 2. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprfm.2020025622>. EDN: RZNSXY.
- Шелковская Н. К., Пучкин И. А. Особенности яблочного и грушевого сырья алтайской селекции для производства столовых вин // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 7. С. 22–24. EDN: QUUVXT.
- Cheng Y., Watrelot A. A. Effects of Saignée and bentonite treatment on phenolic compounds of Marquette red wines // *Molecules*. 2022. Vol. 27, Iss. 11. Article number: 3482. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27113482>.
- Horvat I., Radeka S., Plavša T., Lukić I. Bentonite fining during fermentation reduces the dosage required and exhibits significant side-effects on phenols, free and bound aromas, and sensory quality of white wine // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 285. P. 305–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.172>.
- Maslov Bandić L., Puhelek I., Jeromel A., Jagatić Korenika A.-M. [et al.]. The effect of bentonite agents on the aroma composition of Sauvignon Blanc wines // *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2022. Vol. 87, Iss. 1. P. 51–60.
- Rakonczás N., Kállai Z., Kovács B., Antal G. [et al.]. Comparison and intercorrelation of various bentonite products for oenological properties, elemental compositions, volatile compounds and organoleptic attributes of white wine // *Foods*. 2023. Vol. 12, Iss. 2. Article number: 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12020355>.

References

- Ageeva, N. M., Markovskij, M. G. 2006. Comparative analysis of ways of acidity reduction in grape wines. *Winemaking and Viticulture*, 3, pp. 16–17. EDN: PDVNXJ. (In Russ.)
- Ageeva, N. M., Markovskij, M. G., Antonenko, M. V. 2020. Termoxid-3A for stabilization of wines to crystal turbid. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*, 63(3), pp. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2020-3-63-206-216>. EDN: KRGRPP. (In Russ.)
- Adeeva, L. N., Odintzova, M. V. 2009. Sorbent for waste water purification from shell of cedar nuts. *ChemChemTech*, 52(7), pp. 86–89. EDN: KEZRWB. (In Russ.)
- Adeeva, L. N., Odintsova, M. V., Sinitsin, D. A. 2007. A sorbent from a shell of cedar nuts for oil waste water treatment. *Omsk Scientific Bulletin*, 1(52), pp. 26–28. (In Russ.)
- Antonenko, O. P., Antonenko, M. V., Reznichenko, K. V., Abakumova, A. A. et al. 2020. Research of the effectiveness of the use of sorbents of various nature for the removal antibiotics. *Scientific Works of North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Winemaking*, 29, pp. 247–250. DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-247-250>. EDN: CNDQMT. (In Russ.)
- Burlaka, S. D., Muzychenko, G. F., Alekseeva, A. A. 2018. Analysis of the effect of wine acidity on its quality and stability. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*, 4, pp. 221–226. EDN: OVICQN. (In Russ.)
- Bur'yan, N. I. 2003. Practical microbiology of winemaking. Simferopol. (In Russ.)
- Wagner, V. A., Kazhibekova, A. E., Kamaeva, S. I. 2019. Improving the quality of white grape wine materials during activated carbon treatment. Proceedings of the XX Intern. conf. *Modern problems of technology and technology of food production*, Barnaul, 14–15 March, 2019. Barnaul, pp. 92–95. EDN: YQLHZQ. (In Russ.)
- Vecher, A. S., Yurchenko, L. A. 1976. Ciders and sparkling apple wines. Moscow. (In Russ.)
- Vinogradov, V. A., Zagorouiko, V. A., Makarov, A. S., Yermolin, D. V. 2011. The effect of treating wine materials with activated charcoal on their quality characteristics. *Magarach. Viticulture and Vinemaking*, 4, pp. 23–24. EDN: TVYLPT. (In Russ.)
- Vinogradov, V. A., Krechetov, I. V., Zagorouiko, V. A., Sadlaiev, O. O. et al. 2010a. A study of activated carbon from grape seeds. *Viticulture and Vinemaking*, 40, pp. 102–105. EDN: VDHAGR. (In Russ.)
- Vinogradov, V. A., Krechetov, I. V., Zagorouiko, V. A., Sadlaiev, O. O. et al. 2010b. The effect of treating wine materials with activated charcoal from the grape seeds on the metal cation composition. *Magarach. Viticulture and Vinemaking*, 1, pp. 31–32. EDN: TVYSDJ. (In Russ.)

- Voronina, Yu. S., Svergzuzova, S. V., Shaikhiev, I. G. 2022. Physico-chemical properties of pine nut shells. Proceedings of the Intern. conf. *Rational use of natural resources and technogenic materials processing: Fundamental problems of science, materials technology, chemistry and biotechnology*, Alushta – Belgorod, 30 May – 3 June, 2022. Belgorod, pp. 115–121. EDN: ZRAYZQ. (In Russ.)
- Voronina, Yu. S., Svergzuzova, S. V., Shaikhiev, I. G. 2022. Investigation of sorption properties of pine nut shells. Proceedings of the Intern. conf. *Rational use of natural resources and technogenic materials processing: Fundamental problems of science, materials technology, chemistry and biotechnology*, Alushta – Belgorod, 30 May – 3 June, 2022. Belgorod, pp. 108–115. EDN: XXXGCZ. (In Russ.)
- Gusakova, G. S., Evstaf'ev, S. N. 2011. Prospects for using Ussuri pear fruits in winemaking. *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, pp. 173–178. EDN: OHSUTB. (In Russ.)
- Doroganova, O. V., Miroshnichenko, N. A., Svergzuzova, S. V., Doroganova, E. V. et al. 2018. Use of cedar nuts shell to eliminate methylene blue from water solutions. Proceedings of the conf. *Topical issues in environmental protection*, Belgorod, 17–19 September, 2018. Belgorod, pp. 104–108. EDN: LBOAQZ. (In Russ.)
- Egorova, E. Yu., Mitrofanov, R. Yu., Lebedeva, A. A. 2007. Low temperature preparation of sorbent from cedar nut shell. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, pp. 35–39. EDN: KZCLDN. (In Russ.)
- Karabaeva, M. I., Mirsalimova, S. R., Salikhanova, D. S., Ubaidullayeva, N. N. 2023. Adsorption water purification with adsorbents based on vegetable raw materials. *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, pp. 47–62. EDN: BKAКTP. (In Russ.)
- Kishkovskii, Z. N., Merzhanian, A. A. 1986. Technology of wine making. Moscow. (In Russ.)
- Kushnerova, E. V., Ageeva, N. M. 2010. Comparative analysis of modern ways to reduce the must acidity. *Almanac of Modern Science and Education*, 8, pp. 80–84. EDN: OPNDFT. (In Russ.)
- Labuzova, O. M., Noskova, T. V., Il'ina, E. G. 2015. Obtaining active charcoal from cedar nuts shell to aluminium elimination from water. Proceedings of the Intern. conf. *Lomonosov Readings in Altai*, Barnaul, 20–24 October, 2015. Barnaul, pp. 1515–1518. EDN: UVPJHR. (In Russ.)
- Litovchenko, A. M., Tyurin, S. T. 2004. Technology of fruit wines. Simferopol. (In Russ.)
- Markovskiy, M. G. 2006. Improvement of technology and quality assessment methods of grape wines on the base of analysis and adjustment of their acid composition. Abstract of Ph.D. dissertation. Krasnodar. (In Russ.)
- Methods of technochemical control in winemaking. 2009. Ed. Gerzhikova V. G. Simferopol. (In Russ.)
- Nikiforova, T. E., Kozlov, V. A., Bagrovskaya, N. A., Rodionova, M. V. 2007. Sorption purification of wines. *Chemistry of Plant Raw Material*, 1, pp. 69–73. EDN: HETVFO. (In Russ.)
- Obozhin, A. N., Ageeva, N. M., Markovskij, M. G. 2003. Application of complex mineral sorbents for wine treatment. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(275), pp. 114–115. EDN: QCPISP. (In Russ.)
- Oganesyants, L. A. 1984. Development of a new method for producing special type fruit and berry wines. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Suprun, N. P., Puldi, V. V., Gusakova, G. S., Evstaf'ev, S. N. 2022. Method for production white apple wine, Russian Federation, Pat. RU2783427. (In Russ.)
- Suprun, N. P. 2023. Pine nuts shell sorbent influence on the organic acids composition and apple wines volatile components. *Bulletin of KSAU*, 8, pp. 266–272. EDN: NBRMNF. (In Russ.)
- Hristjuk, V. T., Yakuba, Yu. F., Babenkova, V. A. 2011. The improved technological scheme of port manufacture from perspective red and white wine sorts. *Scientific Journal of KubSAU*, 71, pp. 161–170. EDN: OIGYEN. (In Russ.)
- Chesnokov, N. V., Mikova, N. M., Ivanov, I. P., Kuznetsov, B. N. 2014. Obtaining carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 7(1), pp. 42–53. EDN: RZDEPP. (In Russ.)
- Shaikhiev, I. G., Svergzuzova, S. V., Shaikhieva, K. I., Saponova, Zh. A. 2020. Use of the walnut shell (*JUGLANS REGIA*) as a sorption material to remove pollutants from natural and waste water. *Chemistry of Plant Raw Material*, 2, pp. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020025622>. EDN: RZNSXY. (In Russ.)
- Shelkovskaya, N. K., Puchkin, I. A. 2013. Peculiarities of apple and pear raw material of Altai breeding for production of table wines. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 7, pp. 22–24. EDN: QUUVXT. (In Russ.)
- Cheng, Y., Watrelot, A. A. 2022. Effects of Saignée and bentonite treatment on phenolic compounds of Marquette red wines. *Molecules*, 27(11). Article number: 3482. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27113482>.
- Horvat, I., Radeka, S., Plavša, T., Lukić, I. 2019. Bentonite fining during fermentation reduces the dosage required and exhibits significant side-effects on phenols, free and bound aromas, and sensory quality of white wine. *Food Chemistry*, 285, pp. 305–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.172>.

- Maslov, Bandić L., Puhelek, I., Jeromel, A., Jagatić Korenika, A.-M. et al. 2022. The effect of bentonite agents on the aroma composition of Sauvignon Blanc wines. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 87(1), pp. 51–60.
- Rakonczás, N., Kállai, Z., Kovács, B., Antal, G. et al. 2023. Comparison and intercorrelation of various bentonite products for oenological properties, elemental compositions, volatile compounds and organoleptic attributes of white wine. *Foods*, 12(2). Article number: 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12020355>.

Сведения об авторах

Иванова Кристина Радиковна – ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия, 664074;
Иркутский национальный исследовательский технический университет, аспирант;
e-mail: kristinotchka_iskakova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9353-1075>

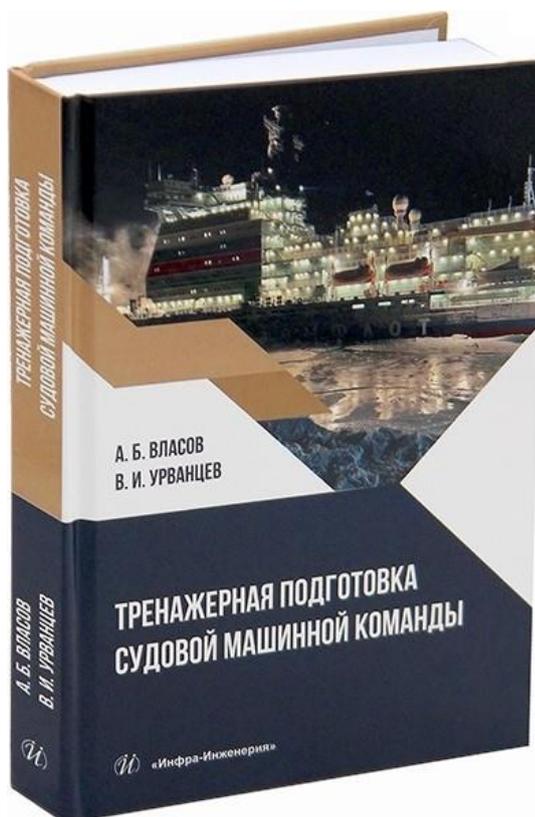
Kristina R. Ivanova – 83 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664074;
Irkutsk National Research Technical University, PhD Student;
e-mail: kristinotchka_iskakova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9353-1075>

Привалова Елена Андреевна – ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия, 664074;
Иркутский национальный исследовательский технический университет, канд. хим. наук, доцент;
e-mail: epriv@istu.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7307-3117>

Elena A. Privalova – 83 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664074;
Irkutsk National Research Technical University, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor;
e-mail: epriv@istu.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7307-3117>

КНИЖНАЯ ПОЛКА

Тренажерная подготовка судовой машинной команды (электроэнергетические системы)



Доктор технических наук, профессор Власов А. Б.

Тренажерная подготовка судовой машинной команды / А. Б. Власов, В. И. Урванцев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 320 с. – ил., табл. – ISBN 978-5-9729-2058-7. – URL: <https://infra-e.ru/products/978-5-9729-2058-7>.

Тренажерная подготовка применяется в процессе обучения, профессиональной переподготовки морских специалистов машинных команд ввиду постоянного роста мощности и развития систем автоматизации электроэнергетических систем современных судов.

Конвенция ПДНВ и Кодекс ПДНВ определяют стандарты компетентности судовых электромехаников и механиков, отводя значительную роль тренажерной подготовке. Для обеспечения качественной подготовки и профессиональной переподготовки специалистов судовой машинной команды необходимо использование комплекса современных тренажеров судовых энергетических установок и электроэнергетических систем, соответствующих стандартам Конвенции ПДНВ и Кодекса ПДНВ.

В Мурманском арктическом университете (МАУ) тренажеры машинного отделения применяются в процессе обучения, тренингов, проверки знаний и навыков обучающихся в Морской академии по специальностям 26.05.07 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики", 26.05.06 "Эксплуатация судовых энергетических установок".

В первой главе пособия описаны особенности тренажерной подготовки на оборудовании ERS 5000 TechSim, в котором моделируются машинные отделения различных типов современных судов с системами и механизмами, системами дистанционного автоматизированного управления, постами локального управления, системами защиты и АПС, в том числе с высоковольтным оборудованием напряжением более 1 000 В.

Особое внимание уделено анализу процедур эксплуатации высоковольтного оборудования напряжением свыше 1 000 В как с использованием виртуальных моделей, так и при обслуживании реальной высоковольтной установки типа КРУ-10, сопряженной с оборудованием ERS 5000 TechSim. Детально представлены строение и принципы вакуумного высоковольтного выключателя VF-12, особенности блокировок ячейки КРУ-10, детали технического обслуживания и др.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с комплексом оборудования на основе автоматизированного главного и распределительного щитов, которое полностью имитирует процесс несения вахты на судовом оборудовании ГРЩ и позволяет обучающемуся контролировать и управлять всем оборудованием в режиме реального времени, при различных условиях и с использованием ручного,

автоматического, автоматизированного способов управления. Тренажерный комплекс состоит из главного и аварийного распределительных щитов и четырех генераторных агрегатов. Каждый генераторный агрегат включает в себя трехфазный синхронный генератор (3×400 В, 50 Гц), приводимый во вращение трехфазным асинхронным электродвигателем переменного тока. Тренажер ГРЩ предназначен для моделирования судовой электроэнергетической системы (ЭЭС) и отработки навыков по управлению данной системой.

В пособии подробно рассмотрены процедуры, которые должны знать специалисты машинной команды в процессе эксплуатации судового оборудования, такие как работа с береговым электроснабжением; работа с ГЭУ; управление турбогенератором; применение валогенератора, подруливающего устройства; особенности работы с винторулевыми колонками типа Azipod и др.

Занятия на тренажерах, представленных в издании, создают условия:

- для приобретения с достаточной степенью реальности обучающимися навыков, соответствующих целям подготовки;
- обеспечения контролируемой эксплуатационной среды, воспроизводящей условия, включающие аварии, предаварийные ситуации;
- взаимодействия члена машинной команды с другими судовыми специалистами; ознакомления с текущей обстановкой;
- объективной регистрации и оценки действий обучающегося для персонификации процесса обучения в ходе тренажерной подготовки;
- отработки профессиональных действий при возникновении разнообразных производственных ситуаций т. д.

В пособии отражены теоретические и практические сведения, необходимые для отработки навыков:

- 1) работы с первичными двигателями (в том числе главной двигательной установкой), основными и вспомогательными механизмами машинного отделения;
- 2) подготовки систем управления двигательной установкой и вспомогательными механизмами к работе;
- 3) включения генераторов, соединения, распределения нагрузки и переключения генераторов;
- 4) соединения и отсоединения распределительных щитов и распределительных пультов;
- 5) использования компьютеров на мостике, в машинном отделении для решения производственных задач;
- 6) контроля электрических распределительных щитов и электрооборудования, приборов сигнализации и следящих систем.

Занятия на тренажерах и обслуживание высоковольтной ячейки КРУ-10 направлены на развитие компетенций и закрепление навыков обучающихся при отработке конкретных профессиональных целей и задач, что обеспечивается способностью современных тренажеров воспроизводить эксплуатационные возможности судового оборудования с высокой степенью реальности, включая особенности, ограничения и вероятные неисправности используемого оборудования.

Курсанты, студенты, а также специалисты, заинтересованные в получении материалов пособия, могут обращаться по вопросам его приобретения в издательство "Инфра-Инженерия", сделать заказы в интернет-магазинах, магазинах технической литературы Москвы, Санкт-Петербурга и др.

Адрес издательства:

<https://infra-e.ru/>

160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63

Тел.: 8 (800) 250-66-01, 8 (8172) 23-91-60 (доб. 204)

E-mail: booking@infra-e.ru

КНИЖНАЯ ПОЛКА

Модели и методы количественной термографии в электроэнергетике



Доктор технических наук, профессор Власов А. Б.

Модели и методы количественной термографии в электроэнергетике / А. Б. Власов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 296 с. – ил., табл. – ISBN 978-5-9729-1862-1. – URL: <https://infra-e.ru/products/978-5-9729-1862-1>.

Термография является методом анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающимся построением тепловых изображений (теплогрaмм). Инфракрасная термография осуществляется посредством анализа теплового излучения объектов с использованием приборов (тепловизоров) в инфракрасном диапазоне длин волн.

Термографическая диагностика объектов генерирующих электростанций, распределительных подстанций электроэнергетических предприятий, электрического оборудования морских судов, предприятий судостроительной, судоремонтной промышленности, электротранспортных предприятий остается одним из наиболее эффективных методов контроля технического состояния электрооборудования в процессе его эксплуатации под напряжением, в особенности высоковольтного оборудования при напряжениях свыше 1 000 В.

Современные тепловизионные системы (тепловизоры) позволяют проводить не только качественный анализ тепловых полей работающего оборудования, но и реализовать количественную оценку температурных полей объектов в ходе экспертной оценки технического состояния, прогнозирования срока службы и ремонта оборудования.

Количественная инфракрасная термография, в отличие от качественной, включает анализ структуры, системы, процесса или объекта посредством присвоения численных значений наблюдаемым особенностям инфракрасного изображения.

Методы количественной термографии предполагают проведение комплексных мероприятий тепловизионной диагностики электроэнергетического оборудования в процессе его работы под напряжением, позволяют оценить эксплуатационную надежность оборудования, перспективы его дальнейшей эксплуатации и собрать базу данных для количественной обработки.

Проблемы количественной термографической диагностики охватывают круг вопросов, связанных с подготовкой и организацией тепловизионных испытаний, обработкой и содержательной интерпретацией полученной информации.

Объектами тепловизионной диагностики в энергетике являются разнообразное оборудование, электротехнические комплексы и системы, эксплуатируемые на энергетических объектах непосредственно в процессе работы под напряжением.

При развитии моделей тепловизионной диагностики с учетом конструктивных особенностей электротехнического оборудования возможна детализация стационарных и аномальных тепловых режимов для предупреждения аномальных состояний и предупреждения аварий.

В отличие от предыдущих исследований по данной тематике¹, в издании представлены новые результаты исследований, расширяющие возможности тепловизионных испытаний в электроэнергетике при анализе равновесных и неравновесных тепловых процессов.

Издание включает описание моделей тепловизионной диагностики для оценки теплового состояния электрических машин. На основе оценки теплового поля поверхности работающего электрического двигателя разработан алгоритм расчета температуры внутренних слоев конструкции и электрической обмотки машины.

Дальнейшее распространение методы тепловизионной диагностики получили в области судовой энергетики для оценки технического состояния оборудования судовых главных распределительных щитов, кабельных сетей, систем жизнеобеспечения, технологического оборудования. Отличительной особенностью ответственного судового электрооборудования большой мощности на морских судах является работа при высоком напряжении (до 15 кВ) в закрытых комплектных распределительных устройствах, что ограничивает возможности тепловизионной диагностики, традиционно используемой на открытых подстанциях при прямой видимости объекта наблюдения. В связи с этим разрабатываются методы тепловизионного контроля оборудования в замкнутых конструкциях с возможностью дистанционной передачи информации для анализа, обработки и накопления данных. Подобная система контроля предполагает создание датчиков для непрерывного тепловизионного контроля ответственного оборудования с автоматическим анализом текущего теплового режима, предотвращения аварийных ситуаций, выработки предупреждений (алармов) для оповещения оператора и т. п.

В материалах издания представлен обширный список литературы, позволяющий оценить вклад отечественных специалистов в развитие термографического метода контроля объектов электроэнергетики в Российской Федерации.

Материалы издания предназначены для специалистов генерирующих электростанций, распределительных подстанций, электроэнергетических, судоремонтных и судостроительных предприятий, железнодорожного транспорта, электротранспортных предприятий, заводских диагностических центров, которые обеспечивают эффективную эксплуатацию систем и комплексов, в том числе высоковольтного электрооборудования напряжением свыше 1 000 В, а также для обучающихся по техническим специальностям в вузах и колледжах.

Специалисты, заинтересованные в получении материалов издания, могут обращаться по вопросам приобретения в издательство "Инфра-Инженерия", сделать заказы в интернет-магазинах, магазинах технической литературы Москвы, Санкт-Петербурга и др.

Адрес издательства:

<https://infra-e.ru/>

160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63

Тел.: 8 (800) 250-66-01, 8 (8172) 23-91-60 (доб. 204)

E-mail: booking@infra-e.ru

¹ См.: Власов А. Б. Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели) Мурманск, 2005. 265 с. ; Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики теплового состояния электрооборудования. Берлин : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 216 с. ISBN-13: 978-3-8465-2111-3, ISBN-10: 3846521116. EAN: 9783846521113. URL: <http://www.lap-publishing.com>. ; Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики : учебник. М., 2006. 280 с.

Требования к рукописи статьи

Общие требования

Оригинальность текста	В статьях допускается не более 20 % заимствованного текста из открытых источников.
Объем статьи	Максимальный объем статьи – 10 страниц (включая библиографический список).
Формат файла	Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением *.doc, *.docx. В имени файла указывается фамилия и инициалы автора.
Параметры страницы	Формат А4. Поля: левое – 2,5 см, правое – 2,5 см, верхнее – 2,5 см, нижнее – 2,5 см.
Форматирование текста	Шрифт: Times New Roman. Размер шрифта – 10, абзацный отступ – 1,0, выравнивание по ширине. Межстрочный интервал – одинарный. Переносы слов не допускаются. Заголовки разделов помещают отдельной строкой через один межстрочный интервал после текста, печатают с прописной буквы. Шрифт полужирный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Требования к содержанию и оформлению структурных элементов рукописи

Индекс УДК	Индекс УДК помещают перед инициалами и фамилией автора отдельной строкой. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по левому краю.
Автор (авторы)	Инициалы и фамилию автора(ов) на русском языке помещают после индекса УДК. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Заглавие	Заглавие помещают через один межстрочный интервал после инициалов и фамилии автора(ов), печатают с прописной буквы без точки в конце. Перевод инициалов, фамилии автора(ов) и заглавия на английский язык помещают соответственно после инициалов, фамилии авторов и заглавия на русском языке. Шрифт полужирный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Реферат	Рекомендуемый объем текста реферата 200–250 слов. Реферат на русском языке помещают через один межстрочный интервал после заглавия на английском языке. Перевод реферата на английский язык помещают через один межстрочный интервал после реферата на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по ширине.
Ключевые слова	Ключевые слова на русском языке помещают через один межстрочный интервал после аннотации на английском языке и разделяются запятой. Перевод ключевых слов на английский язык помещают на следующей строке после ключевых на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 8, выравнивание по левому краю.
Основной текст	Рекомендуемая структура основного текста статьи: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, благодарности. Иллюстрации и таблицы помещаются в тексте статьи по месту их первого упоминания. Иллюстрации, таблицы и формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией.
Библиографический список, библиографические ссылки	Библиографический список помещают через один межстрочный интервал после текста статьи. Перевод библиографического списка на английский язык помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, без абзацного отступа, выравнивание по ширине.
Сведения об авторе(ах)	Сведения об авторе(ах) помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка. Фамилия Имя Отчество – шрифт полужирный, размер шрифта – 10. Почтовый адрес, наименование организации, ученая степень, звание, академический статус, должность, e-mail. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

Оформить подписку на журнал «Вестник МГТУ» можно:

– по Объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Подписной индекс – 41212

URL: <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/i41212/>

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования.

Журнал включен в базы данных: Zoological Record на платформе Web of Science (WoS),
Food Science and Technology Abstracts (FSTA), GeoRef.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
95 2000 ОК 005-93

ВЕСТНИК МГТУ

Том 27, № 4 (октябрь – декабрь) 2024 г.



9 771560 927007

Подписано в печать 16.12.2024

Дата выхода в свет 24.12.2024

Формат 60×84/8. Бумага типографская

Печать ризографическая

Усл. печ. л. 19.3. Тираж 500 экз. Заказ № 184.

Цена 2 000 р. 00 коп.

Адрес издателя:

183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в редакционно-издательском отделе МАУ :

183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13