

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 26, № 4 (октябрь – декабрь), 2023 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ТРАНСПОРТ

ТЕХНОЛОГИЯ
ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ
ПРОДУКТОВ



ELECTRICAL ENGINEERING

TRANSPORT

FOOD TECHNOLOGY

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 26, N 4 (October – December), 2023

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 26, № 4 (октябрь – декабрь), 2023 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 26, N 4 (October – December), 2023**

**Мурманск
2023**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 26, № 4 (октябрь – декабрь), 2023 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель
ФГАОУ ВО "Мурманский государственный
технический университет"

Главный редактор
Власов А. Б., д-р техн. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

**Редакционная коллегия
по направлению "Электротехника. Транспорт"**

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 С., 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 Р., 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@mstu.edu.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 26, N 4 (October – December), 2023
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder
FSAEI HE "Murmansk State
Technical University"

Editor-in-Chief
Vlasov A. B., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Murmansk, Russia)

**The Editorial Board
(Electrical Engineering. Transport)**

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 S., Professor
(Lisabon, Portugal)
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 R., 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@mstu.edu.ru

ISSN 1560-9278 (Print)
ISSN 1997-4736 (Online)

© ФГАОУ ВО "Мурманский государственный
технический университет", 2023
© FSAEI HE "Murmansk State Technical University", 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехника

Светотехника

- Ашрятов А. А., Кузнецов Е. А., Смолин К. А.** Исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов Uniel..... 349

Электротехнические комплексы и системы

- Иванов М. Д., Хазиева Р. Т.** DC/DC-преобразователь в тяговой системе электромобиля..... 361
- Кацай А. В.** Дополнительный расход и экономия оплачиваемой энергии тяговых подстанций при использовании бортовых и стационарных накопителей..... 374
- Петров А. Р., Грачева Е. И., Valtchev S.** Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях..... 384
- Петрова Р. М., Грачева Е. И., Valtchev S., Мифтахова Н. К.** Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения..... 395
- Сафин А. Р., Цветков А. Н., Лямзина Д. Ю., Петров Т. И., Басенко В. Р.** Моделирование работы устройства индукционного зарядного для мобильной установки заряда электротранспорта..... 410

Электроэнергетика

- Измайлов Ю. А., Кошарная Ю. В.** Анализ результатов апробирования проекта по управлению нагрузкой для обеспечения системной надежности с точки зрения потребителей электроэнергии..... 422
- Кажекин И. Е., Харитонов М. С.** Результаты статистического исследования видов однофазных замыканий в низковольтных судовых электросетях..... 431
- Конюшенко Е. В., Рахманов И., Молоканов О. Н.** Сравнение конструкций синхронных машин со встроенным трансформатором момента для возобновляемой энергетики..... 441
- Муртазин Т. Э., Шевченко А. А., Титов В. Г.** Система векторного управления автономным электроприводом..... 449
- Федотов А. И., Вагапов Г. В., Абдуллизанов Р. Э., Федотов Е. А.** Метод расчета места однофазного замыкания на землю на фидере древовидной структуры по ограниченной информации о распределении напряжений нулевой последовательности..... 457

Транспорт

- Пашенцев С. В.** Нейронные сети как инструмент совершенствования математической модели движения судна..... 472

Технология продовольственных продуктов

- Аллоярова Ю. В.** Применение "электронного носа" для оценки легколетучих соединений полуфабрикатов мелкой рыбы..... 489
- Кандрокров Р. Х., Ерина Ю. С., Бурматов В. В.** Влияние содержания пшенично-амарантовых отрубей на качество формового хлеба..... 503
- Каночкина М. С., Коновалова А. Д., Левин О. Н.** Особенности подбора заквасочных культур в производстве функциональных кисломолочных продуктов..... 511

CONTENTS

Electrical Engineering

Lighting Technology

- Ashryatov A. A., Kuznetsov E. A., Smolin K. A.** Study of the lighting characteristics of Uniel retrofit LED lamps..... 349

Electrical Complexes and Systems

- Ivanov M. D., Khazieva R. T.** DC/DC converter in the electric vehicle traction system..... 361
- Katsay A. V.** The additional consumption and savings of paid energy of traction substations when using on-board and stationary storage devices..... 374
- Petrov A. R., Gracheva E. I., Valtchev S.** Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks..... 384
- Petrova R. M., Gracheva E. I., Valtchev S., Miftakhova N. K.** Methods for assessing the reliability of in-shop power supply..... 395
- Safin A. R., Tsvetkov A. N., Lyamzina D. Yu., Petrov T. I., Basenko V. R.** Modeling the operation of an induction charger for mobile charging of electric vehicles..... 410

Power Industry

- Izmailov Yu. A., Kosharnaya Yu. V.** Results of the demand management project to ensure system reliability from the point of view of electricity consumers..... 422
- Kazhekin I. E., Kharitonov M. S.** Results of statistical study of types of single-phase faults in low-voltage ship electrical networks..... 431
- Koniushenko E. V., Rahmanov I., Molokanov O. N.** Comparison of designs of synchronous machines with integrated torque transformer for renewable energy..... 441
- Murtazin T. E., Shevchenko A. A., Titov V. G.** Vector control system for autonomous electric drive..... 449
- Fedotov A. I., Vagapov G. V., Abdullazyanov R. E., Fedotov E. A.** The single phase-to-ground fault location calculation method based on limited information on the distribution of zero-sequence voltages on the tree-structured feeder..... 457

Transport

- Pashentsev S. V.** Neural networks as a tool for improving the mathematical model of ship motion..... 472

Food Technology

- Alloyarova Yu. V.** Application of the "electronic nose" for evaluating volatile compounds of semi-finished small fish..... 489
- Kandrokov R. H., Erina Ju. S., Burmatnov V. V.** The influence of the wheat-amaranth bran content on the pan bread quality..... 503
- Kanochkina M. S., Konovalova A. D., Levin O. N.** Features of the selection of starter cultures in the production of functional fermented milk products..... 511

Исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов Uniel

А. А. Ашрятов, Е. А. Кузнецов*, К. А. Смолин

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

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

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию 06.09.2023;

получена
после доработки
11.10.2023;

принята к публикации
17.10.2023

Ключевые слова:

светодиодная лампа,
мощность,
световой поток,
коэффициент
пульсации, спектр
излучения,
кривая силы света,
температура

В статье рассматриваются светотехнические характеристики светодиодных ламп ретрофитов производства компании Uniel: Uniel LED-G45-6W/4000K, Uniel LED-A60-8W/6500K и Uniel LED-A60-9W/4000K, предназначенных для замены традиционных ламп накаливания. В ходе исследования проведены комплексные измерения светотехнических параметров (световой поток, мощность, цветовая температура, индекс цветопередачи, коэффициент пульсации, коэффициент мощности) и рассчитаны световые отдачи испытуемых ламп. Представлены результаты измерения характеристик в зависимости от напряжения питающей сети. На основе полученных данных осуществляется анализ соответствия начальных измеренных характеристик ламп значениям, заявленным изготовителем. Анализ спектров излучения исследуемых ламп позволяет сделать вывод, что лампы Uniel LED-A60-8W/6500K комплектуются светодиодами белого свечения, спектр которых состоит из синей полосы излучения полупроводникового кристалла с максимумом ~450 нм и полосы люминофора с максимумом ~560 нм, который преобразует часть синего излучения кристалла в излучение, расположенное в длинноволновой области спектра. Спектры излучения ламп Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K кроме излучения синей полосы полупроводникового кристалла с максимумом ~450 нм содержат излучение двух люминофоров, полосы которых имеют максимумы ~560 нм (зеленый цвет) и ~630 нм (красный цвет), благодаря которому снижается цветовая температура светодиодов. В статье анализируются кривые силы света излучения, тепловой режим работы, а также конструктивные особенности ламп. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что лампы Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K целесообразно рекомендовать для использования в качестве источников света на замену традиционным лампам накаливания, поскольку их светотехнические характеристики соответствуют заявленным параметрам и допустимым отклонениям, указанным в нормативных стандартах.

Для цитирования

Ашрятов А. А. и др. Исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов Uniel. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 349–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-349-360>.

Study of the lighting characteristics of Uniel retrofit LED lamps

Albert A. Ashryatov, Eugene A. Kuznetsov*, Konstantin A. Smolin

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

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

Article info

Received 06.09.2023;

received
in revised form
11.10.2023;

accepted 17.10.2023

Key words:

led lamp,
power,
luminous flux,
ripple factor,
emission spectrum,
luminous intensity
curve, temperature

Abstract

The paper considers the photometric characteristics of LED retrofit lamps produced by the Russian-Chinese company Uniel: Uniel LED-G45-6W/4000K, Uniel LED-A60-8W/6500K, and Uniel LED-A60-9W/4000K, designed to replace traditional incandescent bulbs. During the research, comprehensive measurements of photometric parameters (luminous flux, power consumption, color temperature, color rendering index, ripple factor, power factor) have been carried out and the luminous efficacy has been calculated. The results of the measurements have been presented in relation to the supply voltage. Based on the data obtained, an analysis is carried out of the compliance of the initial measured characteristics of the lamps with the values declared by the manufacturer. The analysis of the emission spectra leads to the conclusion that the Uniel LED-A60-8W/6500K lamps are equipped with white light-emitting diodes, the spectrum of which consists of a blue emission band from the semiconductor crystal with a maximum at ~450 nm and a phosphor band with a maximum at ~560 nm, which converts some of the blue emission from the crystal into long-wavelength spectrum. The emission spectra of the Uniel LED-G45-6W/4000K and Uniel LED-A60-9W/4000K lamps, in addition to the blue emission band from the semiconductor crystal with a maximum at ~450 nm, contain emissions from two phosphors, the bands of which have maxima at ~560 nm (green) and ~630 nm (red), which results in a lower color temperature of the LEDs. The paper also provides a detailed analysis of the light power distribution curves, thermal operating conditions, and structural features of the lamps. The research results lead to the conclusion that it is advisable to recommend Uniel LED-G45-6W/4000K and Uniel LED-A60-9W/4000K lamps for use as light sources to replace traditional incandescent lamps because their photometric characteristics comply with the declared parameters and permissible deviations specified in the regulatory standards.

For citation

Ashryatov, A. A. et al. 2023. Study of the lighting characteristics of Uniel retrofit LED lamps. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 349–360. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-349-360>.

Введение

В современном мире искусственное освещение играет ключевую роль в обеспечении комфорта и функциональности. Одним из наиболее важных этапов в эволюции осветительных технологий стало появление светодиодных ламп (СДЛ). Эти источники света сразу привлекли внимание эффективностью, долговечностью и энергосберегающими характеристиками, заметно превосходя традиционные лампы накаливания и энергосберегающие люминесцентные лампы (Байнева и др., 2018; Лишик и др., 2017; Баринаева и др., 2020б).

Одной из разновидностей СДЛ являются лампы ретрофиты, разработанные с целью замены традиционных ламп накаливания, галогенных и люминесцентных ламп в существующих светильниках и осветительных системах. Термин "ретрофит" в данном контексте указывает на то, что эти СДЛ предназначены для обновления или модернизации старых светильников без необходимости полной замены инфраструктуры освещения (Байнева и др., 2020; Макарова и др., 2019).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью анализа светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов в результате широкого распространения на рынке световой продукции различного качества, а также оценкой изменения качества СДЛ ретрофитов при расширении их номенклатуры у отдельно взятого производителя.

Научная новизна статьи заключается в тщательном и всестороннем исследовании светотехнических характеристик СДЛ ретрофитов. В условиях быстрого развития светотехнических технологий, которые позволяют создавать более эффективные СДЛ ретрофиты, и множества предложений на рынке освещения данное исследование предоставляет информацию о том, какие из СДЛ ретрофитов действительно достойны внимания, а какие могут вызвать сомнения у потребителей. Полученные результаты могут послужить основой для принятия обоснованных решений при выборе СДЛ.

Цель работы – исследование и сравнение светотехнических характеристик СДЛ ретрофитов форм-фактора А60 и G45 производства российско-китайской компании Uniel в процессе расширения номенклатуры выпускаемых СДЛ ретрофитов.

Материалы и методы

Для исследования светотехнических характеристик были выбраны СДЛ ретрофиты российско-китайской компании Uniel: Uniel LED-G45-6W/4000K, Uniel LED-A60-8W/6500K и Uniel LED-A60-9W/4000K по три образца для каждой лампы. Тип цоколя у каждой из ламп – стандартный резьбовой E27, а корпус – форм-фактора G45 для лампы Uniel LED-G45-6W/4000K и А60 для ламп Uniel LED-A60-8W/6500K и Uniel LED-A60-9W/4000K (рис. 1).



Рис. 1. Светодиодные лампы ретрофиты:
а – Uniel LED-G45-6W/4000K, б – Uniel LED-A60-8W/6500K, в – Uniel LED-A60-9W/4000K

Fig. 1. Retrofit LED lamps:
а – Uniel LED-G45-6W/4000K, б – Uniel LED-A60-8W/6500K, в – Uniel LED-A60-9W/4000K

В табл. 1 представлены светотехнические параметры, заявленные производителем СДЛ ретрофитов.

Таблица 1. Светотехнические параметры, заявленные производителем СДЛ ретрофитов
Table 1. Lighting parameters provided by the manufacturer of LED retrofit lamps

Параметр	Наименование лампы		
	Uniel LED-G45-6W/4000K	Uniel LED-A60-8W/6500K	Uniel LED-A60-9W/4000K
Напряжение питающей сети, В	175–250	175–250	175–250
Световой поток, лм	480	700	800
Потребляемая мощность, Вт	6	8	9
Световая отдача, лм/Вт	80	≥ 85	85
Индекс цветопередачи (R_a)	95	≥ 80	95
Цветовая температура, К	4 000	6 500	4 000
Коэффициент пульсации, %	< 5	< 5	< 5
Коэффициент мощности ($\cos \varphi$)	> 0,7	0,7	> 0,7
Ток лампы, мА	38	–	56
Угол свечения, град	240	270	270
Срок службы, ч	30 000	30 000	30 000

Лампы Uniel LED-A60-8W/6500K произведены согласно информации, указанной на упаковке, в апреле 2017 г., лампы Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K согласно информации, нанесенной на корпусе ламп (рис. 1), изготовлены в сентябре 2020 г.

СДЛ ретрофит Uniel LED-A60-8W/6500K согласно информации, приведенной на упаковке, является "яркой светодиодной лампой", имеющей комфортное свечение для глаз, индекс цветопередачи (R_a) более 80 и световую отдачу более 85 лм/Вт (табл. 1).

СДЛ ретрофиты Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K, которые можно отнести к более современным лампам, заявляются производителем как СДЛ, свет которых максимально близок к солнечному, поэтому они подходят для освещения детских, классных и игровых комнат, а также подойдут всем, кто заботится о своем здоровье в любом возрасте. Лампы обладают высочайшим индексом цветопередачи (R_a) – 95, у них практически отсутствует пульсация светового потока. При этом СДЛ ретрофиты Uniel LED-G45-6W/4000K имеет световую отдачу 80 лм/Вт, а Uniel LED-A60-9W/4000K – 85 лм/Вт (табл. 1).

Исследование характеристик СДЛ было проведено в лаборатории Центра коллективного пользования "Светотехническая метрология" (Институт электроники и светотехники МГУ им. Н. П. Огарёва)¹.

Для измерения светотехнических характеристик ламп согласно ГОСТ IEC 62612-2019² была использована фотоколориметрическая измерительная установка от фирмы Gooch & Housego. Данная установка включает фотометрический шар OL IS7600, многоканальный спектрорадиометр OL 770 UV/VIS, оптоволоконный кабель 770–7G–3.0, прецизионный источник постоянного тока OL410–200 PRECISION LAMP SOURCE (используемый для питания вспомогательной лампы AUX LAMP A180), арматуру для крепления ламп, регулируемый автотрансформатор (для изменения напряжения питающей сети), блок мультиметров UNI-T UTD890D и компьютер (Микаева и др., 2012).

Коэффициент пульсации освещенности и освещенность измерялись с использованием прибора пульсметр-люксметр ТКА-ПКМ 08. Кривые силы света (КСС) исследуемых ламп измерялись с помощью гониофотометра GO 2000A.

Ранее проведенные исследования распределения температуры по поверхности СДЛ показали, что в ряде случаев результаты измерений температуры СДЛ с помощью тепловизора типа Testo 881 отличаются от результатов измерения температуры с помощью контактной термодпары. Это связано с тем, что показания тепловизора зависят от коэффициента излучения материалов исследуемого объекта. Поэтому распределение температуры по поверхности СДЛ проводили с помощью термодпары контактного термометра типа Testo 925 (Аириятон и др., 2011).

Светотехнические параметры ламп были измерены после 15 минут их непрерывной работы.

Результаты и обсуждение

Светотехнические характеристики СДЛ, полученные в результате исследования (усредненные по трем образцам), представлены в табл. 2. Световая отдача рассчитана как отношение излучаемого светового потока к потребляемой мощности СДЛ.

¹ Центр коллективного пользования научным оборудованием "Светотехническая метрология". URL: http://www.mrsu.ru/ru/sci/labs.php?ELEMENT_ID=57865&sphrase_id=1149162.

² ГОСТ IEC 62612-2019. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования. М., 2019. 32 с. ; ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М., 2014. 43 с.

Таблица 2. Светотехнические параметры светодиодных ламп ретрофитов
Table 2. Lighting parameters of LED retrofit lamps

Параметр	Наименование лампы		
	Uniel LED-G45-6W/4000K	Uniel LED-A60-8W/6500K	Uniel LED-A60-9W/4000K
Световой поток, лм	456	584	737
Потребляемая мощность, Вт	5,6	6,7	9
Световая отдача, лм/Вт	81,43	86,59	80,99
Индекс цветопередачи (R _a)	97	83	97
Цветовая температура, К	4 041	6 670	4 050
Коэффициент пульсации, %	0,7	0,3	1,7
Коэффициент мощности (cos φ)	0,569	0,557	0,548

Анализ заявленных и измеренных светотехнических характеристик СДЛ показал следующее:

– значение измеренного светового потока для всех ламп ниже заявленного производителем на 5 % для лампы Uniel LED-G45-6W/4000K, 7,9 % – для Uniel LED-A60-9W/4000K, что согласно ГОСТ ИЕС 62612-2019³ находится в пределах допуска. Световой поток лампы Uniel LED-A60-8W/6500K ниже номинального на 16,6 % и не соответствует допустимому;

– величина измеренной потребляемой мощности для ламп Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-8W/6500K ниже заявленной на 6,7 и 16,3 % соответственно. Мощность, потребляемая лампой Uniel LED-A60-9W/4000K, соответствует заявленной. Таким образом, измеренные мощности ламп не превышают номинальные значения более чем на 15 %, что отвечает требованиям ГОСТ ИЕС 62612-2019;

– световая отдача для всех ламп, кроме Uniel LED-A60-9W/4000K, выше заявленной. Значение световой отдачи у лампы Uniel LED-A60-9W/4000K ниже заявленного значения на 4,7 %;

– измеренные значения индекса цветопередачи (R_a) выше значений, заявленных производителем;

– измеренные значения цветовой температуры для всех ламп лежат в пределах диапазонов допустимых отклонений для заявленного значения⁴;

– измеренные значения коэффициента пульсации соответствуют заявленным для всех ламп.

В табл. 3 представлены результаты измерения характеристик СДЛ в зависимости от напряжения питающей сети после 15 минут непрерывной работы ламп. Параметры ламп, измеренные в начальный момент времени, отмечены пометкой "0 мин".

Таблица 3. Изменение светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов
в зависимости от напряжения питающей сети

Table 3. Changes in the lighting characteristics of retrofit LED lamps depending on the mains voltage

Наименование лампы	U _c , В	P, Вт	cos φ	I, mA	K _п , %	E, клк
Uniel LED-G45-6W/4000K	175	5,29	0,621	48,7	0,4	2,27
Uniel LED-A60-8W/6500K		6,81	0,614	63,1	0,2	2,70
Uniel LED-A60-9W/4000K		8,97	0,612	50,6	1,5	3,41
Uniel LED-G45-6W/4000K	220 (0 мин)	5,89	0,582	46,0	0,4	2,55
Uniel LED-A60-8W/6500K		6,91	0,567	55,1	0,2	3,28
Uniel LED-A60-9W/4000K		9,50	0,572	41,6	1,0	3,83
Uniel LED-G45-6W/4000K	220	5,56	0,569	44,4	0,7	2,28
Uniel LED-A60-8W/6500K		6,74	0,557	55,5	0,3	2,72
Uniel LED-A60-9W/4000K		9,04	0,548	38,5	1,7	3,42
Uniel LED-G45-6W/4000K	250	5,75	0,533	43,2	0,7	2,30
Uniel LED-A60-8W/6500K		6,77	0,514	52,7	0,3	2,72
Uniel LED-A60-9W/4000K		9,11	0,525	34,8	1,5	3,41

Анализ результатов, представленных в табл. 3, показал, что вне зависимости от величины питающего напряжения (в пределах диапазона, указанного производителем) величина светового потока ламп, связанного напрямую с освещенностью, практически не изменяется. В то же время у ламп накаливания, на смену которым и разрабатываются СДЛ ретрофиты, величина светового потока зависит от напряжения питающей сети (Козловская и др., 2009). Стабилизация светового потока в СДЛ (в отличие от обычных ламп

³ ГОСТ ИЕС 62612-2019. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования. М., 2019. 32 с. ; ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М., 2014. 43 с.

⁴ СТО.69159079-01-2018. Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам. М. : Ассоциация производителей светодиодов и систем на их основе, 2018. 52 с.

накаливания, у которых вольфрамовая спираль напрямую подключается к сети) осуществляется за счет специализированного драйвера, позволяющего стабилизировать силу тока, протекающего через светодиоды вне зависимости от напряжения питающей сети (Мальшев, 2021). Также стоит отметить, что все лампы имеют достаточно низкое значение коэффициента мощности, не соответствующее значениям, указанным производителем (табл. 1). Таким образом, электроэнергия, потребляемая лампами, расходуется нерационально в результате присутствия в потребляемом токе большей реактивной составляющей (Вильданов и др., 2015; Баранова и др., 2020а).

Спектры излучения исследуемых ламп представлены на рис. 2–4.

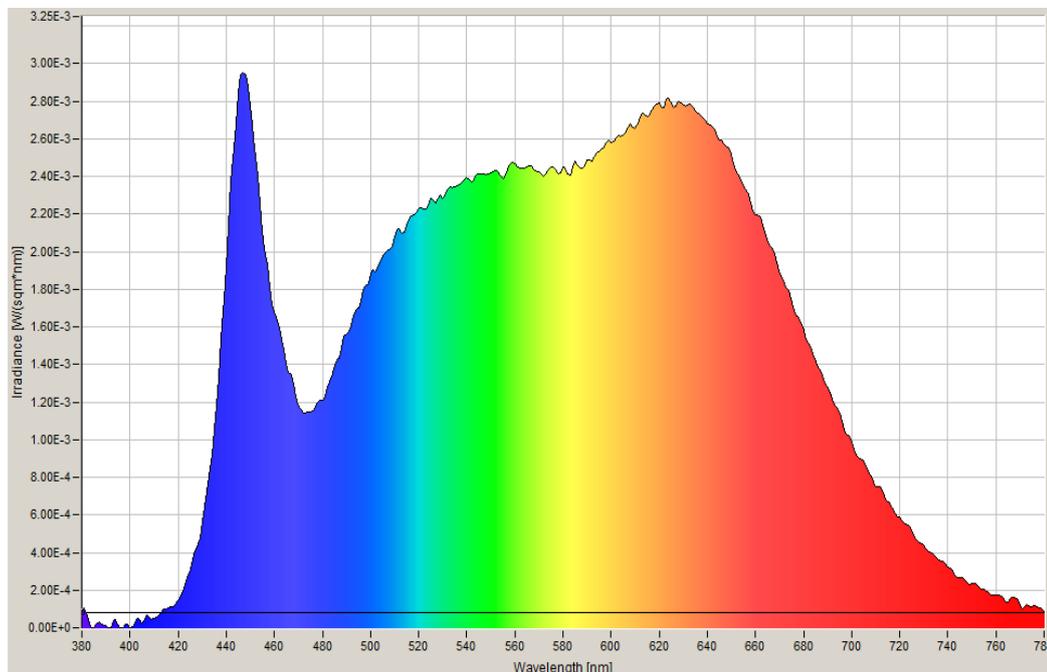


Рис. 2. Спектр излучения лампы Uniel LED-G45-6W/4000K
Fig. 2. Emission spectrum of the Uniel LED-G45-6W/4000K lamp

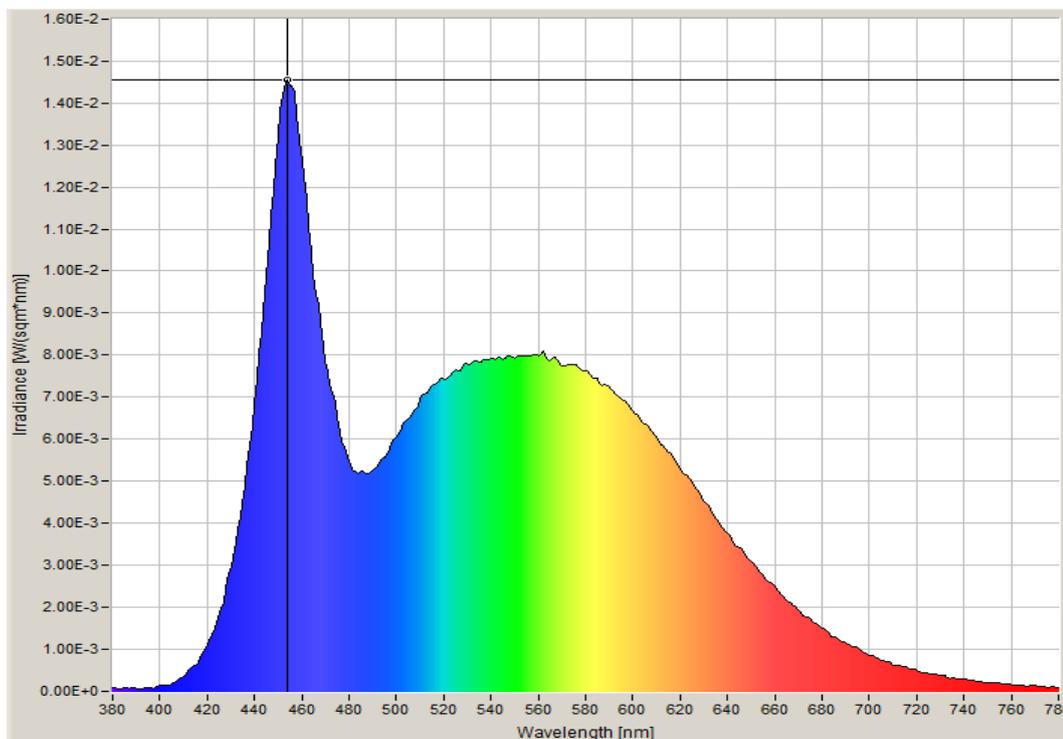


Рис. 3. Спектр излучения лампы Uniel LED-A60-8W/6500K
Fig. 3. Emission spectrum of the Uniel LED-A60-8W/6500K lamp

Анализ спектра излучения позволяет сделать вывод, что лампы Uniel LED-A60-8W/6500K комплектуются светодиодами белого свечения, спектр которых, как известно (*Шуберт, 2008*), состоит из синей полосы излучения полупроводникового кристалла с максимумом ~450 нм и полосы люминофора с максимумом ~560 нм, который преобразует часть синего излучения кристалла в излучение, расположенное в длинноволновой области спектра (*Нестеркина и др., 2020*). Согласно данным⁵, эти лампы нецелесообразно использовать для освещения помещений, где находятся дети дошкольного и школьного возраста. Спектры излучения ламп Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K кроме излучения синей полосы полупроводникового кристалла с максимумом ~450 нм содержат излучение двух люминофоров, полосы которых имеют максимумы ~560 нм (зеленый цвет) и ~630 нм (красный цвет), благодаря которому снижается цветовая температура светодиодов. При этом интенсивность синего излучения (~450 нм) лампы Uniel LED-A60-9W/4000K (рис. 4) примерно в полтора раза ниже того же излучения у лампы Uniel LED-A60-8W/6500K (рис. 3), чем объясняется заявление производителя о целесообразности использования ламп Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K для освещения детских, классных и игровых комнат.

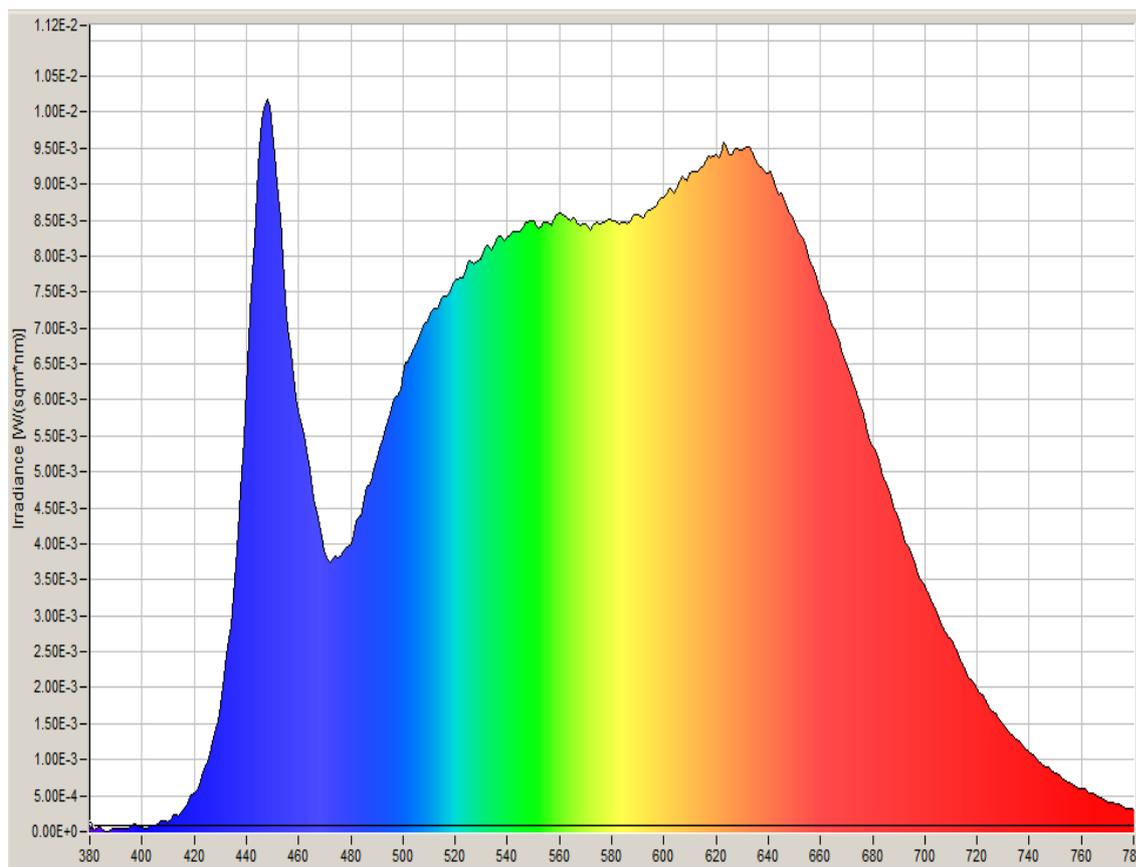


Рис. 4. Спектр излучения лампы Uniel LED-A60-9W/4000K
Fig. 4. Emission spectrum of the Uniel LED-A60-9W/4000K lamp

Кривые силы света (КСС) в системе фотометрирования C, γ для СДЛ представлены на рис. 5–7.

Пространственное распределение излучения СДЛ характеризуется шириной диаграммы направленности (*Справочная..., 2019*), т. е. двойным углом половинной яркости ($2\Theta_{0,5}$), при котором интенсивность излучения уменьшается в два раза по сравнению с максимальным значением и вычисляется на основании результатов измерения распределения светового потока в пространстве (*Бугров и др., 2013*).

Исследование светораспределения ламп в пространстве показало, что двойной угол половинной яркости у ламп Uniel LED-G45-6W/4000K составил 173 град, у ламп Uniel LED-A60-8W/6500K – 195 град и у ламп Uniel LED-A60-9W/4000K – 181 град. В то же время на упаковке ламп Uniel LED-G45-6W/4000K указан "угол свечения" 240 град, а у ламп Uniel LED-A60-8W/6500K и Uniel LED-A60-9W/4000K – 270 град (табл. 1). Такая большая разница в величине распределения излучения у исследованных ламп показывает,

⁵ СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. М. : НИИСФ РААСН и ООО "ЦЕРЕРА-ЭКСПЕРТ", 2016. 135 с.

что либо термин "угол свечения" не соответствует термину "двойной угол половинной яркости", либо он значительно завышен. Исследование источников информации не дало описание термина "угол свечения".

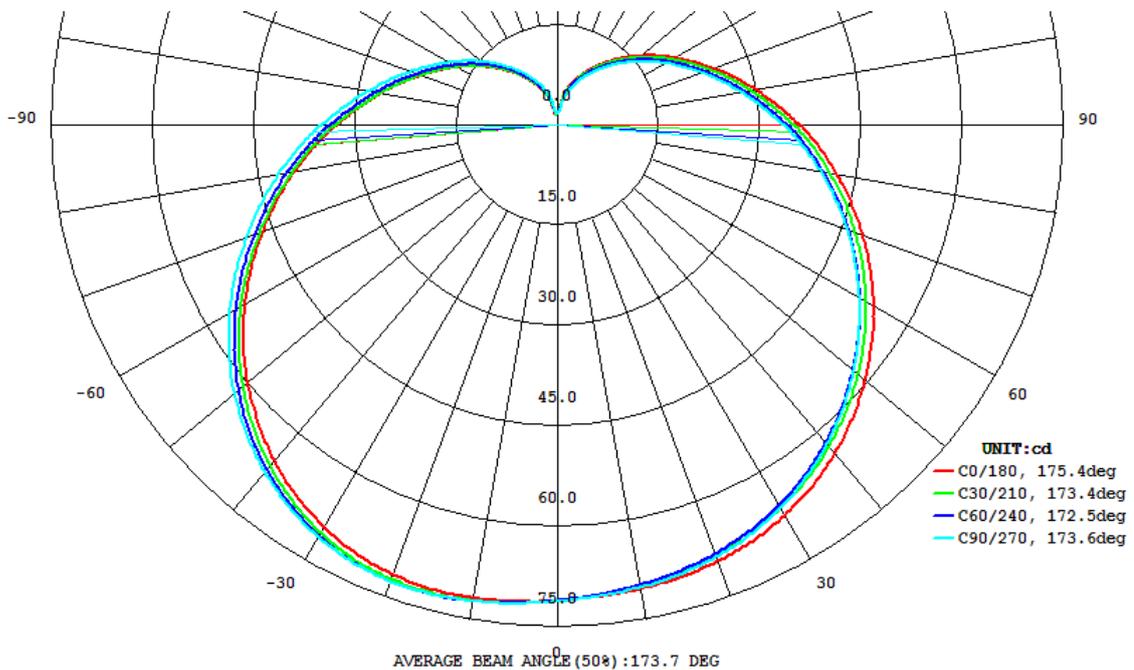


Рис. 5. КСС лампы Uniel LED-G45-6W/4000K
Fig. 5. Light intensity curves (LIC) of the lamp Uniel LED-G45-6W/4000K

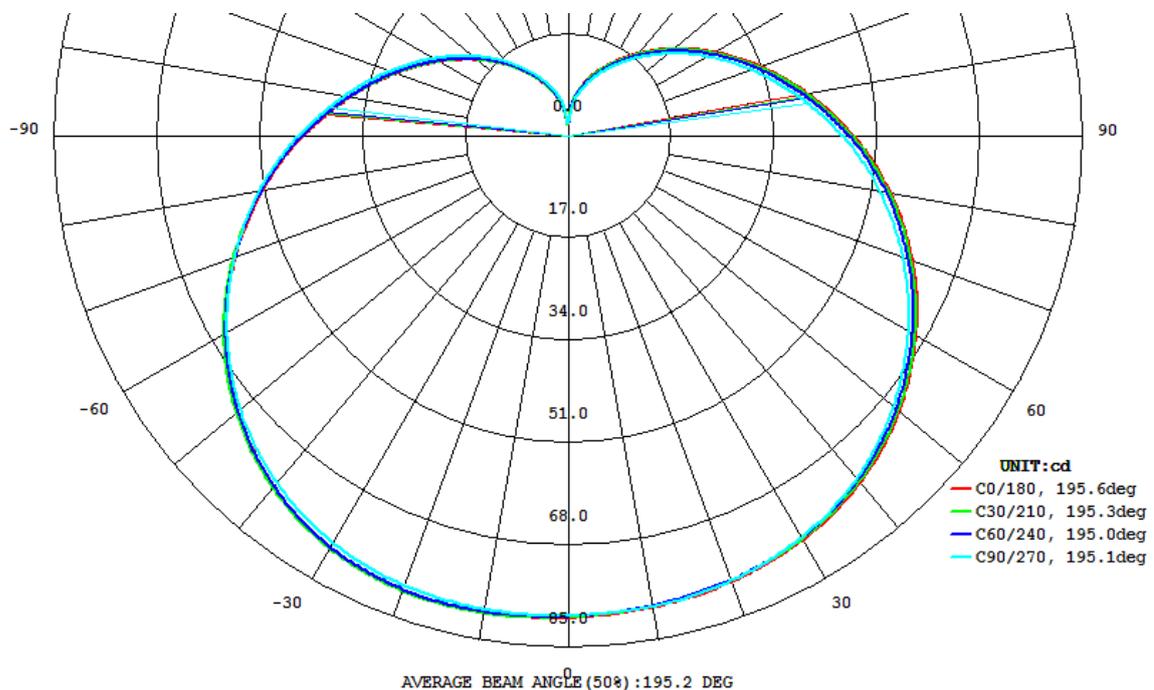


Рис. 6. КСС лампы Uniel LED-A60-8W/6500K
Fig. 6. LIC of the lamp Uniel LED-A60-8W/6500K

Вместе с тем исследование светораспределения СДЛ с отсутствующим рассеивателем показало, что двойной угол половинной яркости СДЛ в этом случае равен двойному углу половинной яркости SMD светодиодов, которые используются в лампе, и составляет 120 град, что соответствует косинусному типу КСС. Практически весь световой поток СДЛ в этом случае направляется в одну полусферу (Агаева и др., 2015). Таким образом, увеличение $2\Theta_{0,5}$ связано с тем, что опаловый рассеиватель выполнен в виде шарового

сегмента с углом 240 град. При этом светодиоды в лампе располагаются на печатной плате, имеющей покрытие с высоким коэффициентом отражения, и благодаря многократным отражениям, происходящим внутри лампы, часть излучения направляется в противоположную полусферу, т. е. в сторону цоколя. Таким образом, величина двойного угла половинной яркости увеличивается.

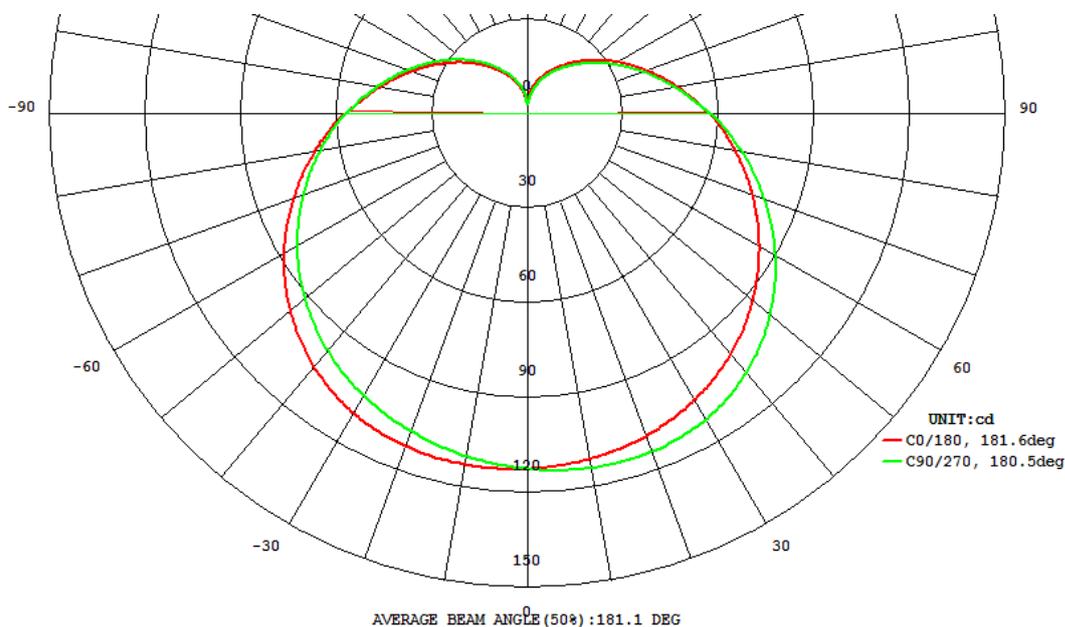


Рис. 7. КСС лампы Uniel LED-A60-9W/4000K
 Fig. 7. LIC of the lamp Uniel LED-A60-9W/4000K

Результаты измерения температуры СДЛ приведены на рис. 8–10.



Рис. 8. Распределение температуры по корпусу лампы Uniel LED-G45-6W/4000K
 Fig. 8. Temperature distribution over the lamp body Uniel LED-G45-6W/4000K

Как показано на рис. 8–10, распределение температуры по поверхности лампы зависит от ее ориентации в пространстве. Чаще всего лампа эксплуатируется либо цоколем вниз, либо цоколем вверх, реже – в горизонтальном положении (Егоров и др., 2017). Распределение температуры по поверхности корпуса лампы, приведенное на рис. 8–10, объясняется тем, что корпус лампы представляет собой композитную конструкцию, внешняя поверхность которой выполнена из пластмассы, внутри которой расположен алюминиевый вкладыш, рассеивающий тепло. Максимальная температура для всех ламп (вне зависимости от положения цоколя вниз или вверх) приходится на точку 3, где алюминиевый вкладыш контактирует с алюминиевой печатной платой, на которой расположены светодиоды. Минимальная температура у всех ламп при расположении цоколем вниз находится в точке 2, т. е. в центральной части рассеивателя. Однако в результате преобладающего процесса конвекции над теплопроводностью верхняя точка 1 рассеивателя

имеет большую температуру по сравнению с точкой 2. При расположении лампы цоколем вверх максимальная температура также находится в точке 3, поскольку именно в данной области располагается источник тепла – печатная плата со светодиодами. Однако наблюдается повышение температуры в точке 4 и уменьшение в точках 1 и 2, что связано с воздействием конвекционных потоков нагретого воздуха на верхние участки корпуса лампы.

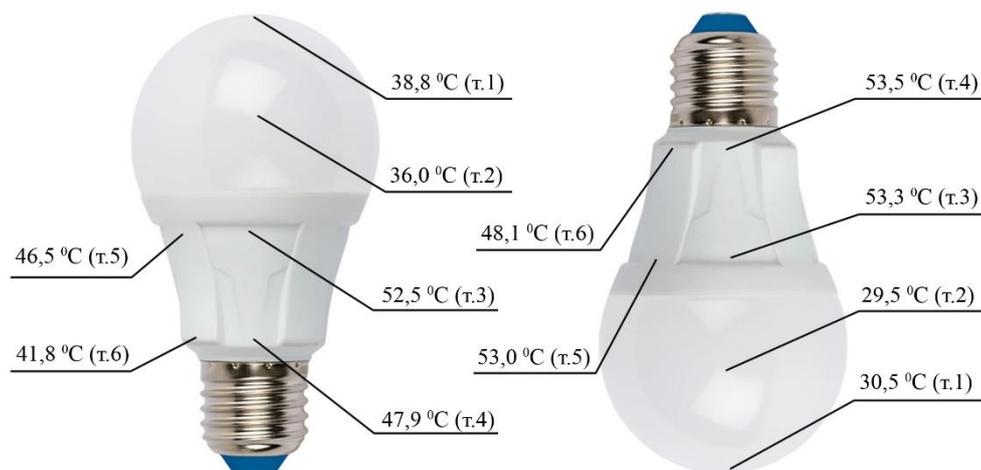


Рис. 9. Распределение температуры по корпусу лампы Uniel LED-A60-8W/6500K
Fig. 9. Temperature distribution over the lamp body Uniel LED-A60-8W/6500K



Рис. 10. Распределение температуры по корпусу лампы Uniel LED-A60-9W/4000K
Fig. 10. Temperature distribution over the lamp body Uniel LED-A60-9W/4000K

Стоит отметить, что внешняя поверхность пластмассового корпуса лампы Uniel LED-A60-8W/6500K выполнена в виде ребер. Таким образом, в тех местах, где расположены ребра (точки 5 и 6), толщина слоя пластмассы по сравнению с толщиной слоя пластмассы в точках 3 и 4 больше. Как известно, пластмасса обладает существенно меньшей теплопроводностью, чем алюминий⁶. Такая конструкция корпуса лампы позволяет иметь малую толщину слоя пластмассы в районе точек 3 и 4 и тем самым обеспечивать хорошее охлаждение светодиодов. Наличие ребер на корпусе лампы в точках 5 и 6, с одной стороны, обеспечивает более удобную и качественную установку лампы в светильник, а с другой – конструкционную прочность крепления композитного корпуса к цоколю лампы.

Заключение

Измеренное значение начального светового потока всех ламп, кроме Uniel LED-A60-8W/6500K, соответствует значениям, указанным производителем. У лампы Uniel LED-A60-8W/6500K измеренный начальный световой поток менее 90 % от номинального светового потока. Также наблюдается небольшое снижение световой отдачи у лампы Uniel LED-A60-9W/4000K. Все исследуемые лампы имеют низкие

⁶ Какой нужен радиатор для охлаждения светодиода? // ЛампаГид: Все об осветительных приборах для дома и бизнеса. URL: <https://lampagid.ru/vidy/svetodiody/radiator>.

показатели коэффициента мощности, не соответствующие номинальным значениям, что свидетельствует о наличии значительной реактивной составляющей в потребляемом токе. При этом измеренные мощности ламп Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-8W/6500K ниже заявленных на 6,7 и 16,3 %, а мощность, потребляемая лампой Uniel LED-A60-9W/4000K, соответствует заявленной, что отвечает требованиям ГОСТ ИЕС 62612-2019.

Исследование светораспределения ламп в пространстве показало, что "угол свечения", указанный на упаковках испытуемых ламп, не идентичен измеренному двойному углу половинной яркости. Такая большая разница в величине распределения излучения у исследованных ламп показывает, что либо термин "угол свечения" не соответствует термину "двойной угол половинной яркости", либо он значительно завышен.

Остальные светотехнические характеристики ламп адекватны значениям, указанным изготовителем, а также нормативным документам, регламентирующим допустимые отклонения параметров.

Сравнительный анализ СДЛ ретрофитов производителя Uniel показывает, что лампы Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K, выпущенные в 2020 г., имеют лучшие светотехнические характеристики по сравнению с лампами Uniel LED-A60-8W/6500K, выпущенными в 2017 г. Это свидетельствует о повышении качества светотехнических параметров СДЛ ретрофитов данного производителя. Повышение качества светотехнических характеристик Uniel СДЛ ретрофитов в новых моделях свидетельствует о стремлении производителя к улучшению своих продуктов и предоставлению более эффективных и качественных решений для освещения.

Таким образом, лампы Uniel LED-G45-6W/4000K и Uniel LED-A60-9W/4000K целесообразно рекомендовать для использования в качестве источников света на замену традиционным лампам накаливания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Агаева М. В., Чуракова Д. К., Ашрятов А. А. Изучение характеристик светодиодных модулей на примере модуля Asgich2 и модуля Оптоган // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : материалы XII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Саранск, 28–29 мая 2015 г. Саранск : Афанасьев В. С., 2015. С. 145–150. EDN: UJCMUV.
- Ашрятов А. А., Носов Д. А., Голов Д. Ю. Исследование работы светодиодных ламп, предназначенных для замены ламп накаливания // I Всеросс. светотехнический форум "Инновационные продукты, материалы и технологии : сб. науч. трудов, Саранск, 14–15 декабря 2011 г. Саранск : Средневолжское математическое о-во, 2011. С. 95–100. EDN: LKHRFY.
- Байнева И. И., Байнев В. В. Оптимизация и энергосбережение в освещении // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 7(256). С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.07.pp.043-047>. EDN: UTZYOM.
- Байнева И. И., Лычагин И. А. Проблемы и перспективы светодиодных ламп-ретрофитов // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 7(280). С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.048-052>. EDN: CYDWTS.
- Барина И. А., Ворожейкин А. Э. Энергетическая эффективность светодиодных ламп-ретрофитов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы VI Национальной науч.-практ. конф., Казань, 10–11 декабря 2020 г. В 2 т. Т. 2. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2020а. С. 183–185. EDN: NTGUYA.
- Барина И. А., Грек А. М. Фотометрические характеристики светодиодных ламп-ретрофитов // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники : II Всеросс. науч.-практ. конф., Казань, 18–19 марта 2020 г. : материалы конференции. В 2 т. Т. 2. Казань : КГЭУ, 2020б. С. 174–180. EDN: FSDZZI.
- Бугров В. Е., Виноградова К. А. Оптоэлектроника светодиодов. СПб. : НИУ ИТМО, 2013. 174 с.
- Вильданов Р. Г., Ионцева О. А., Исхаков Р. Р., Бикметов А. Г. Снижение потерь электроэнергии с помощью компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. EDN: VIDWXR.
- Егоров А. Ю., Байнева И. И. Исследование теплового режима светодиодной лампы-ретрофита // Материалы XXI науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва. В 3 ч. Ч. 1. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 62–66.
- Козловская В. Б., Радкевич В. Н., Колосова И. В. Влияние напряжения на основные характеристики ламп электрического освещения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. № 1. С. 5–13. EDN: QLWXKE.
- Лишик С. И., Поседейко В. С., Трофимов Ю. В., Цвирко В. И. Современное состояние, тенденции и перспективы развития светодиодов для освещения // Светотехника. 2017. № 1. С. 9–17. EDN: YFTGYL.

- Макарова Н. В., Ашрятов А. А. Исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп-ретрофитов для бытового освещения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-3-28-32>. EDN: QEZRPO.
- Мальшев А. Выбор схемотехники светодиодного драйвера для различных областей применения // Полупроводниковая светотехника. 2021. № 4(72). С. 33–39. EDN: HVXTKJ.
- Микаева С. А., Железникова О. Е., Сеницына Л. В. Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33–36. EDN: PUWORLD.
- Нестеркина Н. П., Кузнецов Е. А. Исследование характеристик светодиодных ламп с изменяемым спектром излучения // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники : II Всеросс. науч.-практ. конф., Казань, 18–19 марта 2020 г. : материалы конференции. В 2 т. Т. 2. Казань : КГЭУ, 2020. С. 246–252. EDN: YGFAOD.
- Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга, Г. В. Бооса. М. : Энергоатомиздат, 2019. 892 с.
- Шуберт Ф. Светодиоды. М. : Физматлит, 2008. 496 с.

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-Russian conf. *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.)
- Ashryatov, A. A., Nosov, D. A., Golov, D. Yu. 2011. Study of the operation of LED lamps designed to replace incandescent lamps. Collection of scientific papers of the IX International scientific and technical conference *Problems and prospects for the development of domestic lighting engineering, electrical engineering and energy*, Saransk, 14–15 December, 2011. Saransk, pp. 95–100. EDN: LKHRFY. (In Russ.)
- Baineva, I. I., Bainev, V. V. 2018. Optimization and energy saving in lighting. *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*, 7(256), pp. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2018.07.pp.043-047>. EDN: UTZYOM. (In Russ.)
- Bayneva, I. I., Lychagin, I. A. 2020. Problems and prospects of retrofit LED lamps. *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*, 7(280), pp. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.048-052>. EDN: CYDWTS. (In Russ.)
- Barinova, I. A., Vorozheikin, A. E. 2020a. Energy efficiency of LED retrofit lamps. Proceedings of the VI National scientific and technical conference *Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services*, Kazan, 10–11 December, 2020. In 2 vol. Vol. 2. Kazan, pp. 183–185. EDN: NTGUYA. (In Russ.)
- Barinova, I. A., Grek, A. M. 2020b. Photometric characteristics of LED retrofit lamps. Proceedings of the II All-Russian scientific and technical conference *Problems and prospects for the development of electric power and electrical engineering*, Kazan, 18–19 March, 2020. In 2 vol. Vol. 2. Kazan, pp. 174–180. EDN: FSDZZI. (In Russ.)
- Bugrov, V. E., Vinogradova, K. A. 2013. Optoelectronics of LEDs. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Vildanov, R. G., Iontseva, O. A., Iskhakov, R. R., Bikmetov, A. G. 2015. Reducing electricity losses using reactive power compensation. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 1–1. EDN: VIDWXR. (In Russ.)
- Egorov, A. Yu., Bayneva, I. I. 2017. Study of the thermal regime of a retrofit LED lamp. *Materials of the XXI scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students of the National Research Mordovian State University*. In 3 parts. P. 1. Saransk, pp. 62–66. (In Russ.)
- Kozlovskaya, V. B., Radkevich, V. N., Kolosova, I. V. 2009. The influence of voltage on the main characteristics of electric lighting lamps. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 1, pp. 5–13. EDN: QLWXKE. (In Russ.)
- Lishik, S. I., Posedko, V. S., Trofimov, Yu. V., Tsvirko, V. I. 2017. Current state, trends and prospects for the development of LEDs for lighting. *Svetotekhnika*, 1, pp. 9–17. EDN: YFTGYL. (In Russ.)
- Makarova, N. V., Ashryatov, A. A. 2019. Study of the lighting characteristics of retrofit LED lamps for household lighting. *Energy Safety and Energy Economy*, 3, pp. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-3-28-32>. EDN: QEZRPO. (In Russ.)
- Malyshev, A. A. 2021. Choice of LED driver circuitry for various applications. *Poluprovodnikovaya Svetotekhnika*, 4(72), pp. 33–39. EDN: HVXTKJ. (In Russ.)
- Mikaeva, S. A., Zheleznikova, O. E., Sinitsyna, L. V. 2012. Complex of modern research equipment for light measurements. *Avtomatizatsiya i Sovremennye Tekhnologii*, 12, pp. 33–36. EDN: PUWORLD. (In Russ.)
- Nesterkina, N. P., Kuznetsov, E. A. 2020. Investigation of the characteristics of LED lamps with a variable emission spectrum. Proceedings of the II All-Russian scientific and technical conference *Problems and prospects for the development of electric power and electrical engineering*, Kazan, 18–19 March, 2020. In 2 vol. Vol. 2. Kazan, pp. 246–252. EDN: YGFAOD. (In Russ.)
- Reference book on lighting engineering. 2019. Ed. Yu. B. Eisenberg, G. V. Boos. Moscow. (In Russ.)
- Shubert, F. 2008. LEDs. Moscow. (In Russ.)

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>

Смолин Константин Александрович – ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Россия, 430005;
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва, аспирант; e-mail: smolin94@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9065-016X>

Konstantin A. Smolin – 68 Bolshevistskaya Str., Saransk, Russia, 430005;
National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev, PhD Student;
e-mail: smolin94@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9065-016X>

УДК 621.314.1

DC/DC-преобразователь в тяговой системе электромобиля

М. Д. Иванов, Р. Т. Хазиева*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.09.2023;

получена
после доработки
02.10.2023;

принята к публикации
17.10.2023

Ключевые слова:

DC/DC-преобразователь,
электрическое
транспортное средство,
многоканальный
преобразователь
постоянного напряжения,
LC-фильтр,
многофункциональный
интегрированный
электромагнитный
компонент

Преобразователи постоянного напряжения в постоянное напряжение (DC/DC-преобразователи) применяются в различных электротехнических устройствах, в том числе в тяговой системе электрических транспортных средств. В качестве привода в электромобилях используют синхронные двигатели с постоянными магнитами. Их отличительная черта – нелинейная зависимость электромагнитного момента двигателя от его входного напряжения. Одним из способов улучшения энергетических характеристик электромобиля является включение преобразователя постоянного напряжения в схему питания двигателя. В ходе исследования рассмотрены основные типы преобразователей постоянного напряжения, изучены их преимущества и недостатки; определен способ увеличения энергоэффективности электромобиля за счет использования в составе его силовой схемы многоканального преобразователя постоянного напряжения. Подобная структура позволяет снизить требования к отдельным силовым ключам и элементам преобразователя, а также является оптимальной с точки зрения массогабаритных показателей, так как в преобразователях данного типа отсутствует трансформатор. На основе произведенного обзора была выбрана схема многоканального преобразователя постоянного напряжения для интеграции в систему тягового электропривода. В качестве базового транспортного средства выбрана модель Tesla Model S. На основе рассчитанных динамических характеристик электромобиля определены основные параметры преобразователя постоянного напряжения; произведено компьютерное моделирование силовой установки электрического транспортного средства с преобразователем постоянного напряжения в программной среде Matlab Simulink. Применение преобразователя позволяет улучшить энергоэффективность транспортных средств, а также является лучшим решением по сравнению с установкой батареи с повышенным напряжением.

Для цитирования

Иванов М. Д. и др. DC/DC-преобразователь в тяговой системе электромобиля. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 361–373. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-361-373>.

DC/DC converter in the electric vehicle traction system

Maksim D. Ivanov, Regina T. Khazieva*

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Article info

Received
04.09.2023;

received
in revised
02.10.2023;

accepted
17.10.2023

Key words:

DC/DC converter,
electric vehicle,
multi-channel DC/DC
converter, LC filter,
multifunctional
integrated
electromagnetic
component

Abstract

DC-DC converters are used in various electrical devices including the traction system of electric vehicles. Electric vehicles use synchronous motors with permanent magnets as drives. Their distinctive feature is the nonlinear dependence of the electromagnetic torque of the motor on its input voltage. One of the ways to improve the energy characteristics of an electric vehicle is to include a DC-DC converter in the engine power supply circuit. The study has examined the main types of DC-DC converters, studied their advantages and disadvantages; a method has been determined to increase the energy efficiency of an electric vehicle by using a multi-channel DC-DC converter as part of its power circuit. This structure makes it possible to reduce the requirements for individual power switches and converter elements, and is also optimal from the point of view of weight and size indicators, since converters of this type do not have a transformer. Based on the review, a multichannel DC-DC converter circuit has been selected for integration into the traction electric drive system. The Tesla Model S has been chosen as the base vehicle. Based on the calculated dynamic characteristics of the electric vehicle, main parameters of the DC-DC converter have been determined, computer simulation of the power plant of an electric vehicle with a DC-DC converter has been carried out in the Matlab Simulink software environment. The use of the converter improves the energy efficiency of vehicles, and is also a better solution compared to installing a battery with a higher voltage.

For citation

Ivanov, M. D. et al. 2023. DC/DC converter in the electric vehicle traction system. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 361–373. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-361-373>.

Введение

Преобразователи постоянного напряжения в постоянное напряжение (DC/DC-преобразователи) используются в электронных приборах, устройствах телекоммуникации, автоматизированных системах управления (АСУ), транспортных системах. DC/DC-преобразователи классифицируются по назначению (понижающие, повышающие, инвертирующие), наличию гальванической развязки (изолированные, неизолированные), направлению потока мощности (однонаправленные, двунаправленные), источнику питания (питаемые от источника тока, питаемые от источника напряжения), типу переключений (на жестких или мягких переключениях) (Forouzesht et al., 2017; Вершинин и др., 2022). Общая черта всех DC/DC-преобразователей – наличие в их схеме LC-фильтра – узла, предназначенного для сглаживания пиков токов, напряжений и корректной работы нагрузки (Sattarov et al, 2023). В качестве LC-фильтра применяются гибридные электромагнитные элементы.

Основным преимуществом гибридных электромагнитных элементов являются их улучшенные массогабаритные показатели (Конесев, 1992; Конесев и др., 2005). В области микроэлектроники современные технологии позволяют создавать дискретные электромагнитные элементы (катушки индуктивности и конденсаторы), площадь которых не превышает нескольких десятков квадратных миллиметров (Тюменцев и др., 2011). Конструкция многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) не позволяет конкурировать с дискретными катушками индуктивности и конденсаторами в слаботочных системах по массогабаритным показателям. Поэтому целесообразно использовать МИЭК в электротехнических системах и устройствах, мощность которых измеряется десятками и сотнями киловатт. На данный момент достаточно актуальной сферой использования преобразователей постоянного напряжения являются тяговые системы электрических транспортных средств (ЭТС) (Нго и др., 2017). В качестве двигателя в ЭТС наиболее часто применяют синхронные двигатели с постоянными магнитами. Например, в современных моделях электромобилей компании Tesla (США) устанавливаются именно такие электродвигатели (Sieklicki, 2018).

Отличительная особенность указанных двигателей – нелинейная зависимость электромагнитного момента двигателя от входного постоянного напряжения U_d (Евстратов, 2016). На рис. 1 в качестве примера приведена такая зависимость для синхронного двигателя с постоянными магнитами HVH250-115S.

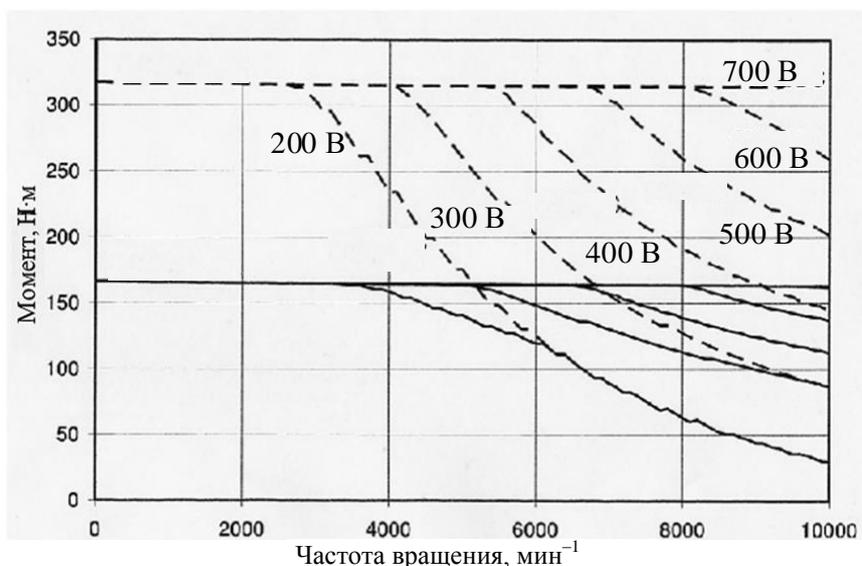


Рис. 1. Механические характеристики двигателя HVH250-115S в зависимости от входного напряжения (Источник: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/remy-pds---hvh250-115-sheet-euro-pr-3-16.pdf>)

Fig. 1. HVH250-115S motor mechanical characteristics depending on the input voltage.

Source: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/remy-pds---hvh250-115-sheet-euro-pr-3-16.pdf>

Рассмотрим эффект от увеличения входного напряжения на частоте вращения двигателя 8 000 мин⁻¹. Максимальный электромагнитный момент при входном напряжении $U_d = 200$ В составляет 60 Н·м, а при напряжении $U_d = 400$ В момент равен 180 Н·м. Таким образом, увеличение входного напряжения в два раза позволяет увеличить максимальный электромагнитный момент в три раза.

Повысить рабочее напряжение двигателя можно двумя основными способами:

- 1) увеличение количества последовательно включенных аккумуляторов в батарее;
- 2) установка DC/DC-преобразователя в состав тяговой системы ЭТС.

Увеличение количества аккумуляторов в батарее является не самым лучшим решением с точки зрения массогабаритных показателей. Например, аккумуляторная батарея автомобиля Tesla Model S имеет массу, превышающую 500 кг (Thomas et al., 2020). В данной статье рассматривается улучшение

энергетических характеристик электромобиля за счет включения преобразователя постоянного напряжения в схему питания двигателя ЭТС. На рис. 2 изображена функциональная схема силовой установки ЭТС.

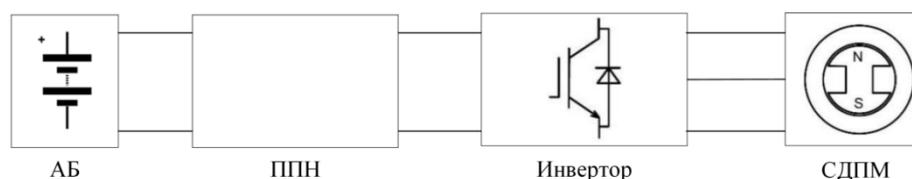


Рис. 2. Функциональная схема силовой установки электрического транспортного средства
 Fig. 2. Electric vehicle power plant functional diagram

На первом этапе проектирования преобразователя постоянного напряжения необходимо определить его структуру на основе данных, полученных в результате аналитического обзора, представленного в настоящей статье.

Теоретические основы

Как было показано во введении, существуют различные подходы к классификации преобразователей постоянного напряжения (ППН) (Лукин, 1998). В основе приведенной нами классификации лежит наличие гальванической развязки.

В изолированных преобразователях в схеме устройства устанавливается трансформатор (Gerstner et al., 2021; Kanaparthi et al., 2022). За счет изменения коэффициента трансформации появляется возможность изменять уровень выходного напряжения, не изменяя топологию схемы, поэтому изолированные ППН не подразделяются на повышающие и понижающие.

В неизолированных преобразователях гальваническая развязка отсутствует, поэтому уровень выходного напряжения зависит не только от длительности управляющих импульсов, подаваемых на ключи преобразователя, но и от топологии его схемы (Al-Obaidi et al., 2022).

Результаты классификации преобразователей по данной методике (Alhurayyis et al., 2021) приведены на рис. 3. Необходимо отметить, что регулярно появляются новые типы преобразователей, поэтому данная классификация не включает в себя все варианты исполнения преобразователей постоянного напряжения, а рассматривает только наиболее распространенные.

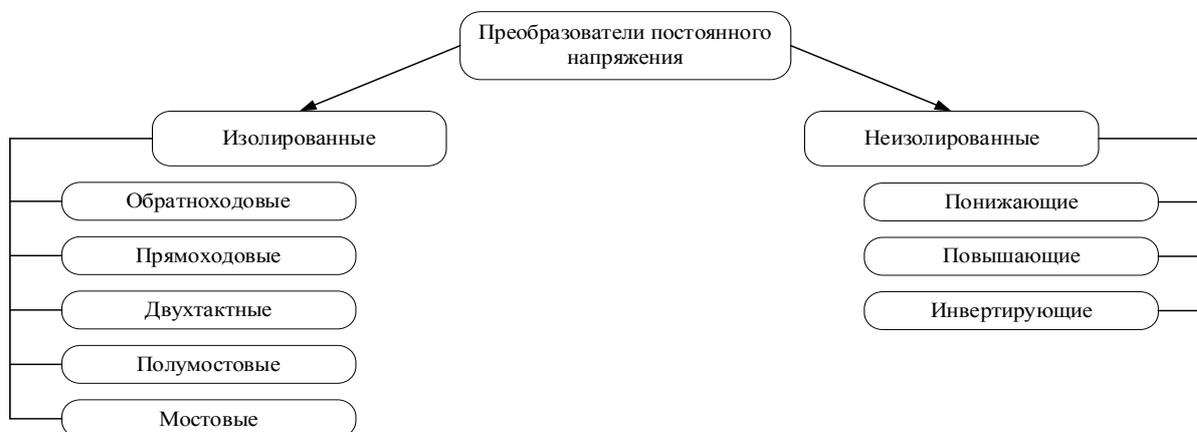


Рис. 3. Классификация преобразователей постоянного напряжения
 Fig. 3. DC/DC converters classification

Рекомендуемые диапазоны мощностей для изолированных преобразователей не превышают 2 кВт (табл. 1). За пределами данных диапазонов эффективность применения преобразователей снижается (Сукер, 2019; Хасиев и др., 2008).

Таблица 1. Рекомендуемые диапазоны мощностей изолированных ППН
 Table 1. Isolated DC/DC converters recommended power ranges

Схема	Диапазон мощностей, Вт
обратноходовая	1–100
прямоходовая	1–200
двухтактная	200–500
полумостовая	200–500
мостовая	500–2 000

К основным преимуществам неизолированных ППН по сравнению с изолированными относят улучшенные массогабаритные показатели, которые объясняются отсутствием в их схеме трансформатора (Тительмаер и др., 2018). Такие преобразователи будут более легкими и компактными при передаче той же мощности. Основная область их использования – высокотехнологическое оборудование, электрические транспортные средства, летательные и космические аппараты, т. е. те области электротехники и электроэнергетики, где масса и габариты ограничены.

Отсутствие трансформатора в схеме преобразователя приводит к тому, что величина выходного напряжения полностью определяется схемой преобразователя, величиной входного напряжения, а также скважностью импульсов, подаваемых на ключевые элементы. Поэтому основной классификацией для неизолированных преобразователей является их разделение по уровню выходного напряжения: понижающие, повышающие, а также инвертирующие (такие, в которых величина выходного напряжения может быть как выше, так и ниже входного напряжения).

В настоящее время в электроприводах различных электроустановок применяются многоканальные преобразователи постоянного напряжения (МППН) с высокой удельной мощностью (Гулямов, 2020; Ютт и др., 2015). Многоканальные преобразователи постоянного напряжения имеют преимущество по сравнению с одноканальными, так как состоят из нескольких ППН, параллельно работающих на общую нагрузку. Такая схема преобразования позволяет распределить мощность нагрузки на несколько отдельных, параллельно работающих преобразователей, что в конечном счете увеличивает плотность мощности преобразователя. При этом пульсация тока на общей шине станет относительно низкой, и небольшой емкости конденсатора фильтра будет достаточно для сглаживания пульсации напряжения (Aggeler et al., 2007).

Электрическая принципиальная схема преобразователя постоянного напряжения с трехканальной структурой приведена на рис. 4. Такой преобразователь представляет собой каскад из нескольких преобразователей (соединенных между собой параллельно), образующий один преобразователь большей мощности с общим входом и выходом (Ютт и др., 2016). Преобразователь с трехканальной структурой можно использовать в устройствах и приводах, где мощность нагрузки достигает от десятков до сотен киловатт.

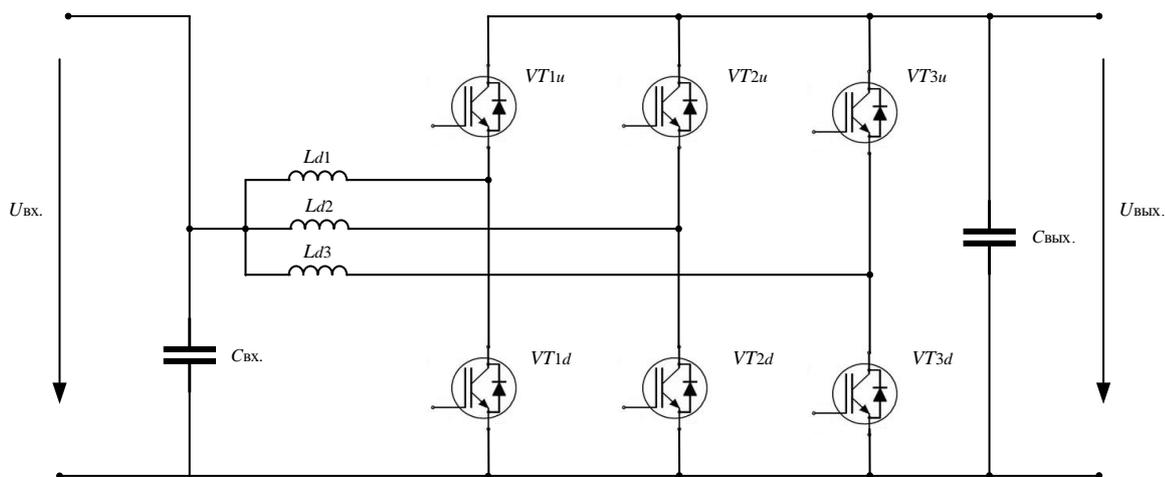


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема силовой части преобразователя постоянного напряжения с трехканальной структурой
Fig. 4. Three-channel structure DC/DC converter electrical circuit power diagram

Преобразователь состоит из трех параллельно включенных составных преобразователей с одинаковыми входными и выходными параметрами. Режимы работы этих преобразователей, работающих на одинаковых частотах, отличаются сдвигом по фазе управляющих импульсов.

Таким образом, обратимый преобразователь постоянного напряжения (ОППН) трехканальной структуры работает по принципу чередования каналов, т. е. переключение катушек индуктивностей L_{d1} – L_{d3} происходит поочередно.

Фазовый сдвиг импульсов управления многоканальным преобразователем находится как

$$\varphi = \frac{2\pi}{n}, \quad (1)$$

где n – число параллельно работающих преобразователей.

Для трехканального преобразователя в соответствии с формулой (1) количество параллельно включенных преобразователей равно трем и, соответственно, фазовый сдвиг импульсов управления составляет 120° .

Несмотря на сложность управления многоканальным преобразователем, совместная работа нескольких составных преобразователей обеспечивает значительное снижение токовых нагрузок на силовые ключи, так как общая нагрузка равномерно распределяется на количество совместно работающих преобразователей. Соответственно, для отдельного преобразователя в трехканальной схеме требуются ключевые элементы меньшей мощности по сравнению с преобразователем с одноканальной схемой (Зиновьев, 1999). Таким образом, оптимальным вариантом DC/DC-преобразователя для установки в электрическое транспортное средство является трехканальный преобразователь постоянного напряжения.

Результаты и обсуждение

Перед проектированием преобразователя постоянного напряжения необходимо оценить параметры системы, в которой он будет установлен. Для этого производится тяговый расчет параметров электромобиля, результаты которого позволят оценить мощность преобразователя, его входное и выходное напряжение, а также другие электротехнические параметры.

Для расчетных исследований в качестве базового транспортного средства (ТС) использованы параметры легкового электромобиля Tesla Model S полной массой 2 069 кг (табл. 2).

Таблица 2. Исходные данные ТС
 Table 2. EV initial data

Параметр	Значение
Масса ТС m , кг	2 069,0
Площадь поперечного сечения ТС S , м ²	2,82
Коэффициент аэродинамического сопротивления C , о. е.	0,208
Радиус колеса автомобиля r , м	0,267
КПД механической трансмиссии η , о. е.	0,99
Передаточное число i , о. е.	7,56
Заявленное ускорение a , м/с ²	8,65

На рис. 5 изображены силы, действующие на электромобиль при движении по ровной поверхности: сила тяжести G , сила реакции опоры N , сила сопротивления воздуха F_c , сила трения качения F_T , а также приведенный к ведущим колесам электромагнитный момент M .

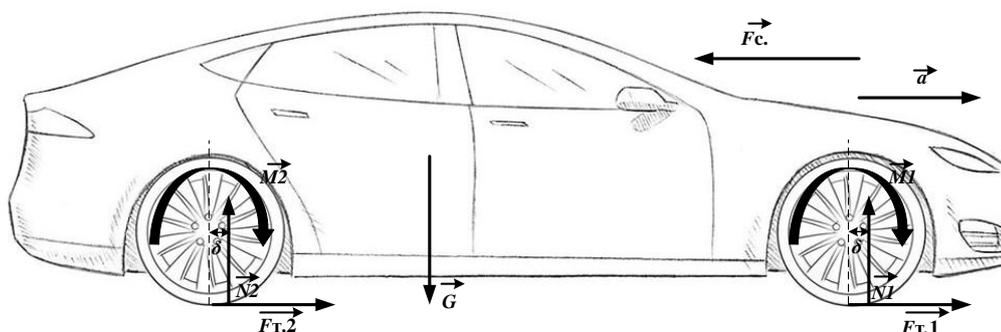


Рис. 5. Силы, действующие на электромобиль
 Fig. 5. Forces acting on an electric vehicle

Для расчета параметров электромобиля можно записать следующие уравнения:

$$ma = \sum_{i=1}^4 F_T - F_c, \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{G}{4}.$$

Для расчета параметров колеса верна следующая запись:

$$J\varepsilon = M_1 - F_T r - N_1 \delta, \quad (3)$$

где J – приведенный к колесу момент инерции системы "двигатель – трансмиссия – колесо", примерно равный 15,4 кг·м²; δ – коэффициент трения качения, приблизительно равный 0,01; ε – угловое ускорение колеса, связанное с ускорением автомобиля, определяемого по формуле

$$\varepsilon = \frac{a}{r}.$$

Силу сопротивления воздуха можно определить так:

$$F_c = \frac{C_p}{2} \rho v^2 S, \quad (4)$$

где $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; v – скорость электромобиля.

Поскольку разгон электромобиля осуществляется от 0 до 97 км/ч за 3,1 с согласно технической спецификации, то ускорение выбрано средним за данный промежуток и определено по формуле

$$a = \frac{v_{\max}}{t}.$$

Скорость, при которой достигается данное ускорение, равна 68 км/ч. Тогда сила сопротивления воздуха согласно формуле (4) будет равна

$$F_c = \frac{0,208 \cdot 1,225}{2} \cdot 18,67^2 \cdot 2,82 = 125,18 \text{ Н}.$$

На каждое колесо для обеспечения заданного ускорения должна быть приложена сила трения, согласно формуле (2), равная

$$F_T = \frac{2 \cdot 069 \cdot 8,65 + 125,18}{4} = 4 \cdot 505,51 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Используя значения сил трения и сопротивления воздуха, а также выражение (3), определим крутящий момент на валу колеса

$$M_1 = 15,4 \cdot 32,55 + 4 \cdot 505,5 \cdot 0,267 + 5 \cdot 074,2 \cdot 0,01 = 1 \cdot 751,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда на валу электродвигателя должен обеспечиваться момент, который можно определить по формуле

$$M = \frac{4M_1}{i\eta}, \quad M \approx 720 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5)$$

Значение, полученное согласно выражению (5), совпадает с данными технической спецификации автомобиля.

Угловую скорость ротора электродвигателя определим как

$$\omega = \frac{vi}{r}.$$

При скорости 68 км/ч угловая скорость электродвигателя составит

$$\omega = \frac{18,67 \cdot 9,73}{0,267} = 680,37 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Мощность на валу электродвигателя найдем следующим образом:

$$P_{\text{Эд}} = M_{\max} \omega, \quad P_{\text{Эд}} \approx 490 \text{ кВт}.$$

Это значение совпадает с данными технической спецификации автомобиля, что свидетельствует о правильности выполненных расчетов.

Мощность преобразователя постоянного напряжения можно оценить исходя из мощности электродвигателя с учетом потерь энергии на нем и инверторе (Новаковски и др., 2012):

$$P_{\text{ППН}} = \frac{P_{\text{ин}}}{\eta_{\text{ин}}},$$

$$P_{\text{ин}} = \frac{P_{\text{Эд}}}{\eta_{\text{Эд}}},$$

где $P_{\text{ППН}}$ – мощность преобразователя постоянного напряжения; $P_{\text{ин}}$ – мощность инвертора; $P_{\text{Эд}}$ – мощность электродвигателя; $\eta_{\text{ин}}$ – КПД инвертора; $\eta_{\text{Эд}}$ – КПД электродвигателя.

Входное напряжение преобразователя постоянного напряжения равно напряжению аккумуляторной батареи и составляет $U_{\text{вх}} = 400 \text{ В}$. Выходное напряжение в первую очередь определяется параметрами двигателя и максимально возможным значением напряжения, приложенного к его обмоткам. В рамках данной статьи значение выходного напряжения преобразователя принимается равным $U_{\text{вых}} = 650 \text{ В}$.

Параметры ППН можно определить согласно следующей методике (Капустин и др., 2013).

Номинальный входной ток обратимого преобразователя постоянного напряжения найдем по формуле

$$I_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}},$$

где $P_{\text{вх}}$ – входная мощность преобразователя при номинальной нагрузке; $U_{\text{вх}} = 400 \text{ В}$ – напряжение аккумуляторной батареи.

Номинальный ток одного канала ОППН меньше входного тока в n раз, где $n = 3$ – количество каналов. Минимальное и максимальное входное напряжение преобразователя варьируется в диапазоне от 80 до 115 % его номинального напряжения. Максимально допустимая величина пульсации выходного напряжения равна 3 % от выходного напряжения (*Pany et al., 2011*).

Номинальный ток нагрузки можно определить как

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{вых. ном}}}$$

Для расчета индуктивности катушек ОППН трехканальной структуры необходимо определить величину пульсации тока катушки индуктивности. Для корректной работы преобразователя пульсация тока катушки индуктивности не должна превышать 0,1 от номинального входного тока, тогда

$$\Delta I_L = 0,1 I_{\text{вых. max}} \frac{U_{\text{вых. ном}}}{U_{\text{вх. ном}}}$$

Сквозность импульсов определяется следующим образом:

$$D = 1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}$$

Суммарная индуктивность катушек преобразователя может быть найдена согласно (*Гулямов, 2018*):

$$L_{\Sigma} = \frac{U_{\text{вых}}}{4\Delta I_L f_S}$$

где f_S – частота переключений транзисторов.

Тогда индуктивность первой катушки трехканального преобразователя будет равна

$$L = \frac{L_{\Sigma}}{3}$$

Минимальное значение емкости выходного конденсатора определяется как

$$C = \frac{I_{\text{вых. max}} (1 - D)}{f_S \Delta U_{\text{вых}}}$$

Результаты расчета параметров преобразователя постоянного напряжения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры преобразователя постоянного напряжения
Table 3. DC/DC converter parameters

Параметр	Значение
Номинальная мощность преобразователя $P_{\text{ном}}$, кВт	505,0
Номинальный входной ток $I_{\text{вх}}$, А	1 263,0
Приблизительная пульсация тока катушки ΔI_L , А	126,3
Номинальный ток одного канала $I_{\text{ном}}$, А	421,0
Минимальное входное напряжение U_{min} , В	320,0
Максимальное входное напряжение U_{max} , В	470,0
Номинальное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В	650,0
Максимальная величина пульсации выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых. max}}$, В	19,5
Частота переключений транзисторов f_S , кГц	5,0
Минимальная индуктивность одной катушки L , мкГн	85,8
Минимальная емкость конденсатора C , мФ	2,95

Выше было приведено обоснование повышения напряжения, подаваемого на трехфазный инвертор, питающий синхронный двигатель с постоянными магнитами, который приводит электрическое транспортное средство в движение. Теоретически это обоснование заключается в следующем: при повышении напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, при тех же параметрах движения и той же потребляемой мощности снижается ток в обмотках статора. В результате снижаются потери, а двигатель становится более энергоэффективным.

Наилучшим подтверждением эффективности установки трехканального DC/DC-преобразователя является компьютерное моделирование тяговой системы электрического транспортного средства.

На данный момент существует множество программ, позволяющих эффективно моделировать сложные технические системы. Самой распространенной и наиболее удобной в использовании является MatLab Simulink. Особенность указанной программы – наличие готовых блоков для двигателя, инвертора и системы управления инвертором, основанной на векторном управлении скоростью двигателя.

Для оценки эффективности работы преобразователя напряжения были проведены три эксперимента:

1) работа без ППН, выходное напряжение АБ составляет 400 В;

- 2) работа без ППН, выходное напряжение АБ составляет 650 В;
 - 3) работа с ППН, напряжение АБ составляет 400 В, входное напряжение инвертора равно 650 В.
- В каждом эксперименте автомобиль проезжает один и тот же цикл движения.

После моделирования сравнивается степень заряженности АБ, которая и определяет энергоэффективность повышения напряжения. Во всех случаях используется аккумуляторная батарея одной и той же емкости; блоки задания скорости автомобиля, а также момента сопротивления на валу двигателя не изменяются.

Имитационная модель тяговой системы ЭТС, построенная в Simulink (рис. 6), состоит из следующих элементов:

- аккумуляторной батареи;
- DC/DC-преобразователя;
- инвертора;
- тягового электродвигателя;
- системы управления инвертором, основанной на векторном управлении;
- блоков для вывода основных параметров двигателя и батареи по ходу экспериментов.

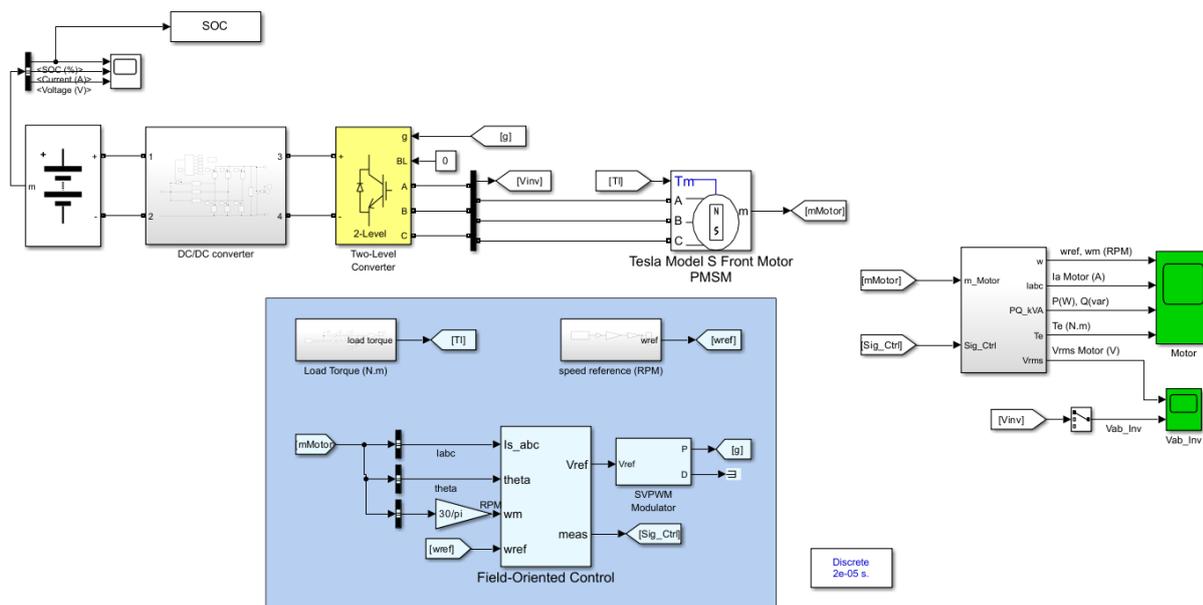


Рис. 6. Общий вид имитационной модели тяговой системы ЭТС
 Fig. 6. General view of the EV traction system simulation model

В качестве аккумуляторной батареи взят стандартный блок из библиотеки Specialized Power Systems. Расчет характеристик режима разряда батареи производится автоматически. Блок измерения параметров на выходе АБ показывает текущее значение тока, напряжение и степень заряженности (SOC), на основе которых производится оценка эффективности работы преобразователя.

Имитационная модель трехканального DC/DC-преобразователя, разработанная в программной среде Matlab Simulink, приведена на рис. 7. В данной схеме в качестве входного LC-фильтра использован многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент. Включение этого компонента в состав DC/DC-преобразователя позволяет значительно улучшить его массогабаритные показатели (МГП). Авторами статьи запланированы исследования, включающие разработку алгоритма расчета компонента и сравнение его МГП с параметрами классического фильтра.

Для приближения результатов моделирования к реальным параметрам движения электромобиля испытания проведены в стандартизированном ездовом цикле движения ECE-15, характеризующем движение в городских условиях (Lintern et al., 2013). На рис. 8 приведена зависимость скорости движения от времени в данном цикле. График изменения остаточного заряда АБ при движении (это изменение установлено в ходе трех различных экспериментов) демонстрирует, что наиболее энергоэффективным способом является применение высоковольтной батареи с выходным напряжением 650 В (рис. 9). Данный способ существенно увеличивает массу электромобиля, а значит, увеличивается и расход энергии, что в компьютерной модели не учитывалось. Сравнение результатов экспериментов 1 (при питании электромобиля от батареи напряжением 400 В) и 2 (при питании от АБ напряжением 650 В) показывает, что гипотеза подтвердилась, и повышение входного напряжения инвертора действительно улучшает энергетические показатели движения электромобиля.

Данное явление можно объяснить следующими соображениями: при эксплуатации электропривода в одинаковых городских условиях полезная мощность практически не изменяется, а при увеличении напряжения до 650 В значительно падает ток, потребляемый двигателем. Потери электрической энергии в обмотках статора СДПМ пропорциональны квадрату тока. Повышение напряжения ведет к снижению потерь электрической энергии и, как следствие, большей степени заряженности аккумуляторной батареи в конце эксперимента. Особенно это проявляется в переходных режимах работы электропривода, т. е. при движении в городском цикле, что и демонстрируется на рис. 9.

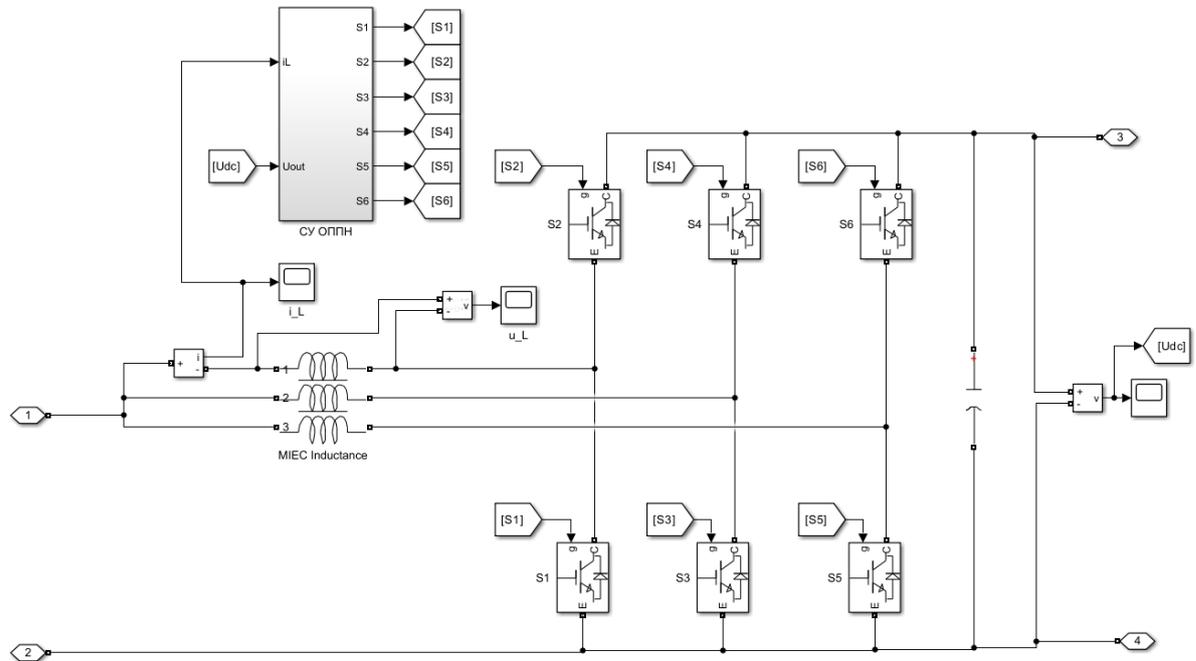


Рис. 7. Реализация модели повышающего DC/DC-преобразователя в программной среде Matlab Simulink
Fig. 7. Matlab Simulink software boost DC/DC converter model implementation

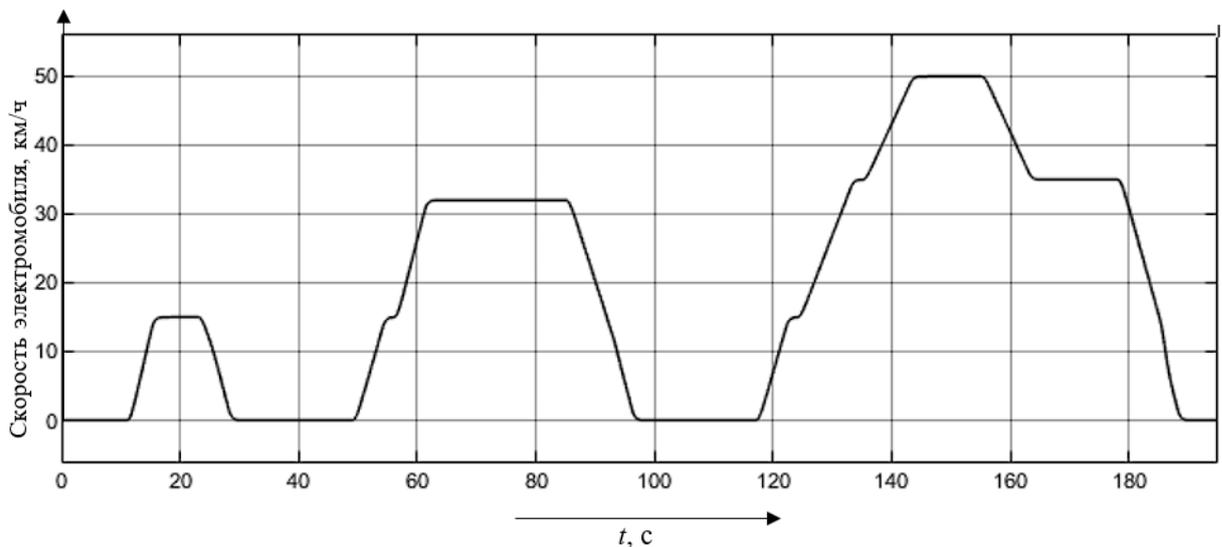


Рис. 8. Стандартизированный ездовой цикл движения в городских условиях
Fig. 8. Standardized urban driving cycle

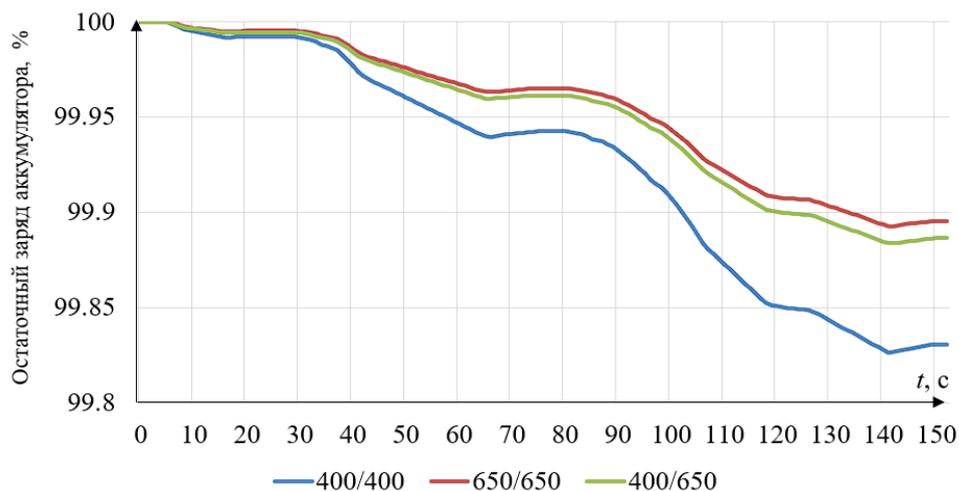


Рис. 9. Сравнение остаточного заряда при разных способах питания двигателя
 Fig. 9. Comparison of residual charge with different types of motor power supply

Заключение

Оптимальным вариантом для использования в качестве источника питания для мощных силовых электроприводов являются многоканальные преобразователи постоянного напряжения. Подобная структура позволяет снизить требования к отдельным силовым ключам и элементам преобразователя и является оптимальной с точки зрения массогабаритных показателей, так как в преобразователях данного типа отсутствует трансформатор. Кроме того, снижение массогабаритных показателей DC/DC-преобразователя возможно за счет применения функциональной интеграции элементов. Коллективом авторов запланированы исследования, включающие разработку алгоритма расчета многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, а также сравнение его массогабаритных показателей с параметрами классического фильтра.

В качестве электромобиля, для которого проектируется преобразователь постоянного напряжения, выбран Tesla Model S. В результате проведенного исследования:

- рассчитаны динамические характеристики электромобиля; определены силы трения и моменты сопротивлений; эти параметры учтены при создании компьютерной модели разработанной системы;
- определены основные параметры преобразователя постоянного напряжения, используемого в тяговой системе выбранного электрического транспортного средства;
- произведено компьютерное моделирование силовой установки электрического транспортного средства с преобразователем постоянного напряжения.

Применение преобразователя постоянного напряжения является лучшим решением проблемы повышения энергоэффективности автомобиля по сравнению с установкой батареи с увеличенным напряжением.

Благодарности

Исследования выполнены на средства, предусмотренные постановлением Правительства РФ "О назначении и выплате стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2022–2024 гг."; грантополучатель Хазиева Регина Тагировна; приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента РФ) "Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива"; тема исследований "Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Вершинин Н. Ф., Карпов А. М., Кузнецов С. В. DC/DC-преобразователь с гальванической развязкой на SiC-MOSFET для гибридного автотранспортного средства // Электричество. 2022. № 9. С. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-9-53-65>. EDN: UVCBUI.
- Гулямов К. Х. Моделирование режимов работы импульсных многоканальных преобразователей постоянного напряжения // Политехнический вестник. Сер. Инженерные исследования. 2020. № 1(49). С. 29–33. EDN: LIGCSA.

- Гулямов К. Х. Энергетическая установка электромобиля с системой многоканального преобразования постоянного напряжения : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. М., 2018. 156 с.
- Евстратов А. Э. Управление электромагнитным моментом электропривода горных машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. Томск, 2016. 127 с.
- Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники : в 2 т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. Ч. 1. 199 с.
- Капустин И. В., Лукашенко А. В. Математическое моделирование и анализ импульсного повышающего преобразователя напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 126–135. EDN: QBWGQX.
- Конесев С. Г. Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Уфа, 1992. 19 с.
- Конесев С. Г. Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты в системах преобразования электрической энергии. Обзор // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий : межвуз. сб. науч. ст. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2005. С. 25–44.
- Лукин А. Высокочастотные преобразователи постоянного напряжения и их классификация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1998. № 1(13). С. 33–36. EDN: WTKABR.
- Новаковски Р., Кинг Б. Вопросы проектирования высокочастотных DC/DC-преобразователей с высоким входным напряжением // Компоненты и Технологии. 2012. № 5(130). С. 137–140. EDN: NKZSKB.
- Нго Ф., Гульков Г. И. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>.
- Сукер К. Силовая электроника. Руководство разработчика. М. : ДМК Пресс, 2019. 252 с. (Сер. Силовая электроника).
- Тительмаер К. А., Гусев А. А., Велигорский А. А. Обзор неизолированных двунаправленных топологий преобразователей для портативных применений на базе возобновляемых источников электроэнергии // Технічні науки та технології. 2018. № 2(12). С. 176–188. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-176-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-176-188). EDN: YLMPNZ.
- Тюменцев А. И., Ясинский И. М., Яковлев А. Н. Электрические фильтры для современной радиоэлектронной аппаратуры // Радиотехника, электроника и связь : РЭС-2011 : междунар. науч.-техн. конф., 5–8 июля 2011 г. Омск : Радиотехника, 2011. С. 515–521.
- Хасиев В., Кулаков А. Расчет и схемотехника повышающих DC/DC-преобразователей высокой мощности // Силовая электроника. 2008. № 4. С. 36–40.
- Ютт В. Е., Голубчик Т. В., Гулямов К. Х. Экспериментальное исследование режимов работы импульсных преобразователей постоянного напряжения трехфазной структуры при активной и активно-индуктивной нагрузках // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 11–14. EDN: XBHYQN.
- Ютт В. Е., Лохнин В. В., Сидоров К. М., Гулямов К. Х. Применение преобразователей постоянного напряжения в составе энергетической установки электрического транспортного средства // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 4(43). С. 34–40. EDN: UYSEBH.
- Aggeler D., Biela J., Inoue S., Akagi H. [et al.]. Bi-Directional isolated DC-DC converter for next-generation power distribution – comparison of converters using Si and SiC devices // Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, 2007. P. 510–517. DOI: <https://doi.org/10.1109/pccon.2007.373015>.
- Alhurayyis I., Elkhateb A., Morrow J. Isolated and nonisolated DC-to-DC converters for medium-voltage DC networks: A review // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2021. Vol. 9, Iss. 6. P. 7486–7500. DOI: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.3028057>.
- Al-Obaidi N. A., Abbas R. A., Khazaal H. F. A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for hybrid energy storage system // 5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA), Al-Najaf, Iraq, 2022. P. 248–253. DOI: <https://doi.org/10.1109/iiceta54559.2022.9888704>.
- Forouzes M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A., Blaabjerg F. [et al.]. Step-up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, Iss. 12. P. 9143–9178. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2652318>.
- Gerstner M., Maerz M., Dietz A. Review-based selection recommendation for galvanically isolated DC/DC converters designed for a wide input voltage range // IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Gliwice, Poland, 2021. P. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/pemc48073.2021.9432537>.
- Kanaparthy R. K., Singh J. P., Ballal M. S. A review on multi-port bidirectional isolated and non-isolated DC-DC converters for renewable applications // IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedes56012.2022.10080049>.

- Lintern M. A., Walsh C., Carroll S., Chen R. Simulation study on the measured difference in fuel consumption between real-world driving and ECE-15 of a hybrid electric vehicle // IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013), London, 2013. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1918>.
- Pany P., Singh R., Tripathi R. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2011. Vol. 3, Iss. 3. P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68426>.
- Sattarov R. R., Khazieva R. T., Ivanov M. D. Research of a multifunctional integrated electromagnetic component as an LC filter in DC/DC converters // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe57272.2023.10086824>.
- Sieklucki G. An investigation into the induction motor of Tesla Model S vehicle // International Symposium on Electrical Machines (SME), Andrychow, Poland, 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/isem.2018.8442648>.
- Thomas R., Garbuio L., Gerbaud L., Chazal H. Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor // International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020. P. 495–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270646>.

References

- Vershinin, N. F., Karpov, A. M., Kuznetsov, S. V. 2022. A SiC MOSFET isolated DC/DC converter for a hybrid vehicle. *Elektrichestvo*, 9, pp. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-9-53-65>. EDN: UVCBUI. (In Russ.)
- Gulyamov, K. H. 2020. Simulation of operating modes of pulsed multichannel DC voltage converters. *Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies*, 1(49), pp. 29–33. EDN: LIGCSA. (In Russ.)
- Gulyamov, K. H. 2018. Power plant of an electric vehicle with a multi-channel DC/DC conversion system. Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Evstratov, A. E. 2016. Control of electromagnetic torque of electric drive of mining machines. Ph.D. dissertation. Tomsk. (In Russ.)
- Zinov'ev, G. S. 1999. Power electronics fundamentals. In 2 vol. Novosibirsk, Vol. 1. (In Russ.)
- Kapustin, I. V., Lukashenov, A. V. 2013. Mathematical modeling and analysis of a pulsed boost voltage converter. *Izvestiya Tula State University*, 2, pp. 126–135. EDN: QBWGQX. (In Russ.)
- Konesev, S. G. 1992. Multifunctional integrated elements for controlled power supply systems for special purpose devices. Ph.D. dissertation. Ufa. (In Russ.)
- Konesev, S. G. 2005. Multifunctional integrated electromagnetic components in electrical energy conversion systems. Review. In coll. articles *Electrical technologies, electric drive and electrical equipment of enterprises*, Ufa, pp. 25–44. (In Russ.)
- Lukin, A. 1998. High frequency DC/DC converters and their classification. *Electronics: Science, Technology, Business*, 1(13), pp. 33–36. EDN: WTKABR. (In Russ.)
- Novakovski, R., King, B. 2012. Design issues for high-frequency DC/DC converters with high input voltage. *Komponenty i Tekhnologii*, 5(130), pp. 137–140. EDN: NKZSKB. (In Russ.)
- Ngo, F., Gul'kov, G. I. 2017. Calculation of the mechanical characteristics of the traction motor of an electric vehicle. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, 60(1), pp. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>. (In Russ.)
- Suker, K. 2022. Power electronics. Developer Guide. Moscow. (In Russ.)
- Titel'maer, K. A., Gusev, A. A., Veligorskij, A. A. 2018. An overview of non-isolated bidirectional converter topologies for portable renewable power applications. *Technical Sciences and Technologies*, 2(12), pp. 176–188. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-176-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-176-188). EDN: YLMPNZ. (In Russ.)
- Tyumencev, A. I., Yasinskij, I. M., Yakovlev, A. N. 2011. Electric filters for modern radio-electronic equipment. Proceedings of Intern. conf. *Radio Engineering, Electronics and Communication*, 5–8 July, 2011. Omsk, pp. 515–521. (In Russ.)
- Hasiev, V., Kulakov, A. 2008. Calculation and circuitry of high-power DC/DC boost converters. *Silovaya Elektrika*, 4, pp. 36–40. (In Russ.)
- Yutt, V. E., Golubchik, T. V., Gulyamov, K. H. 2016. Experimental study of the operating modes of pulsed DC/DC converters of a three-phase structure with active and active-inductive loads. *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, 5, pp. 11–14. EDN: XBHYQN. (In Russ.)
- Yutt, V. E., Lohnin, V. V., Sidorov, K. M., Gulyamov, K. H. 2015. The use of DC/DC converters as part of the power plant of an electric vehicle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta)*, 4(43), pp. 34–40. EDN: UYSEBH. (In Russ.)
- Aggeler, D., Biela, J., Inoue, S., Akagi, H. et al. 2007. Bi-Directional isolated DC-DC converter for next-generation power distribution – comparison of converters using Si and SiC devices. Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, pp. 510–517. DOI: <https://doi.org/10.1109/pccn.2007.373015>.

- Alhurayyis, I., Elkhateb, A., Morrow, J. 2021. Isolated and nonisolated DC-to-DC converters for medium-voltage DC networks: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(6), pp. 7486–7500. DOI: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.3028057>.
- Al-Obaidi, N. A., Abbas, R. A., Khazaaal, H. F. 2022. A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for hybrid energy storage system. *5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA)*, Al-Najaf, Iraq, pp. 248–253. DOI: <https://doi.org/10.1109/iiceta54559.2022.9888704>.
- Forouzes, M., Siwakoti, Y. P., Gorji, S. A., Blaabjerg, F. et al. 2017. Step-up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(12), pp. 9143–9178. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2652318>.
- Gerstner, M., Maerz, M., Dietz, A. 2021. Review-based selection recommendation for galvanically isolated DC/DC converters designed for a wide input voltage range. *IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Gliwice, Poland, pp. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/pemc48073.2021.9432537>.
- Kanaparthi, R. K., Singh, J. P., Ballal, M. S. 2022. A review on multi-port bidirectional isolated and non-isolated DC-DC converters for renewable applications. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedes56012.2022.10080049>.
- Lintern, M. A., Walsh, C., Carroll, S., Chen, R. 2013. Simulation study on the measured difference in fuel consumption between real-world driving and ECE-15 of a hybrid electric vehicle. *IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013)*, London, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1918>.
- Pany, P., Singh, R., Tripathi, R. 2011. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(3), pp. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68426>.
- Sattarov, R. R., Khazieva, R. T., Ivanov, M. D. 2023. Research of a multifunctional integrated electromagnetic component as an LC filter in DC/DC converters. *5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, Moscow, Russian Federation, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe57272.2023.10086824>.
- Sieklucki, G. 2018. An investigation into the induction motor of Tesla Model S vehicle. *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Andrychow, Poland, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/isem.2018.8442648>.
- Thomas, R., Garbuio, L., Gerbaud, L., Chazal, H. 2020. Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, pp. 495–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270646>.

Сведения об авторах

Иванов Максим Дмитриевич – ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Россия, 450064;
Уфимский государственный нефтяной технический университет, ассистент;
e-mail: maxivanovd@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3316-2140>

Maksim D. Ivanov – 1 Kosmonavtov Str., Ufa, Russia, 450064;
Ufa State Petroleum Technological University, Assistant;
e-mail: maxivanovd@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3316-2140>

Хазиева Регина Тагировна – ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Россия, 450064;
Уфимский государственный нефтяной технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Regina T. Khazieva – 1 Kosmonavtov Str., Ufa, Russia, 450064;
Ufa State Petroleum Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

УДК 620.97

Дополнительный расход и экономия оплачиваемой энергии тяговых подстанций при использовании бортовых и стационарных накопителей

А. В. Кацай

ООО "Кинемак", г. Москва, Россия;

e-mail: proton764@mail.ru

Информация о статье

Реферат

Поступила в редакцию 02.10.2023;

получена после доработки 31.10.2023;

принята к публикации 02.11.2023

Ключевые слова:

контактная сеть, энергодбаланс, тяговое и нетяговое энергопотребление, накопители энергии, затраты на энергоснабжение, полезная и избыточная рекуперация, транспортная работа

В системах тягового энергоснабжения горэлектротранспорта без накопителей значительная часть энергии рекуперации повторно полезно утилизируется на нагрузку в процессе межпоездных перетоков по контактной сети. Избыточная часть рекуперации рассеивается теплом на тормозных резисторах. Применение бортовых накопителей позволяет перенаправить на них с тягового привода вагона всю энергию рекуперации. Обратное на тяговый привод из накопителя выдается остаток в объеме не более двух третей поступившей энергии рекуперации, за исключением внутренних потерь, так как из-за омического сопротивления действительный КПД накопителя любого типа не превышает 64 %. Бортовой накопитель потребляет значительный объем оплачиваемой энергии от тяговой подстанции на перевозку его вагоном, компенсацию саморазряда и т. д. Суммарный баланс возврата на тягу энергии рекуперации и потерь от дополнительного энергопотребления у бортовых накопителей отрицательный. При работе стационарных накопителей в контактной сети полностью сохраняются полезные перетоки рекуперации. Избыточная часть рекуперации перенаправляется в контактную сеть, где одна ее часть питает маломощную нетяговую нагрузку в ходе зарядки накопителя, а другая поступает на накопитель, заряжая его. После непродолжительного хранения в накопителе остаток избыточной рекуперации выдается в сеть на появившуюся в ней нагрузку. У стационарного накопителя отсутствуют энергзатраты на перевозку, а потребление оплачиваемой энергии на собственные нужды и компенсацию саморазряда существенно меньше, чем у бортового, в силу большего коэффициента загрузки. Стационарный накопитель имеет положительный баланс энергии рекуперации, что позволяет дополнительно экономить оплачиваемую энергию от тяговой подстанции в объеме до 10 % относительно такого потребления при перетоках полезной рекуперации без использования накопителей.

Для цитирования

Кацай А. В. Дополнительный расход и экономия оплачиваемой энергии тяговых подстанций при использовании бортовых и стационарных накопителей. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 374–383. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-374-383>.

The additional consumption and savings of paid energy of traction substations when using on-board and stationary storage devices

Alexander V. Katsay

Kinemak LLC, Moscow, Russia;

e-mail: proton764@mail.ru

Article info

Abstract

Received 02.10.2023;

received in revised 31.10.2023;

accepted 02.11.2023

Key words:

contact network, energy balance, traction and non-traction energy consumption, energy storage, energy supply costs, useful and excessive recovery, transport work

In traction power supply systems for city electric transport without storage devices, a significant part of the recovery energy is usefully reused for the load in the process of inter-train flows along the contact network. The excess part of the recuperation is dissipated by heat in the braking resistors. The use of on-board storage devices makes it possible to redirect all recovery energy from the car's traction drive to them. The remaining amount of no more than two-thirds of the received recuperation energy is supplied back to the traction drive from the storage device, excluding internal losses, since due to ohmic resistance, the actual efficiency of any type of storage device does not exceed 64 %. The on-board storage device consumes a significant amount of paid energy from the traction substation for its transportation by car, compensation for self-discharge, etc. The total balance of recovery energy returned to traction and losses from additional energy consumption for on-board storage devices is negative. When stationary storage devices operate in the contact network, useful recuperation flows are completely preserved. The excess part of the recovery is redirected to the contact network, where one part of it powers a low-power non-traction load while charging the storage device, and the other goes to the storage device, charging it. After a short period of storage in the storage device, the remainder of the excess recovery is released into the network for the load that appears in it. A stationary storage device has no energy consumption for transportation, and the consumption of paid energy for its own needs and compensation for self-discharge is significantly less than that of an on-board storage device due to its higher load factor. The stationary storage device has a positive balance of recovery energy which allows additional savings of paid energy from the traction substation in the amount of up to 10 % relative to such consumption during useful recovery flows without the use of storage devices.

For citation

Katsay, A. V. 2023. The additional consumption and savings of paid energy of traction substations when using on-board and stationary storage devices. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 374–383. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-374-383>.

Введение

Затраты электротранспортного предприятия на оплату покупаемой у энергопоставщиков электроэнергии могут составлять до 30 % от всех расходов (Мукин, 2019). Уменьшение доли оплаты энергии является одним из важнейших направлений деятельности по улучшению экономического положения горэлектротранспорта (ГЭТ). Снижение удельного энергопотребления подвижного состава (ПС), а также наземных стационарных инженерных систем (электрооборудования тяговых подстанций, контактной сети, остановочных павильонов, депо, диспетчерских и т. д.) способствует достижению этой цели за счет повышения энергоэффективности штатного электрооборудования. Результативным способом снижения оплачиваемого энергопотребления при заданном объеме транспортной работы является более полное задействование на повторное использование энергии рекуперативного торможения поездов. Ключевым средством при решении данной проблемы выступают накопители энергии (НЭ).

В ходе исследования рассмотрен баланс энергопотребления в системе тягового энергоснабжения подвижного состава горэлектротранспорта с рекуперацией энергии линейного движения при работе бортовых и стационарных накопителей.

Теоретические и экспериментальные основы исследования

В настоящем исследовании в качестве эмпирической базы для изучения эффективности способов повторного использования рекуперативной энергии на выполнение полезной транспортной работы использовались данные мониторинга работы трамвайных систем в гг. Санкт-Петербурге, Коломне, Челябинске, а также троллейбусной системы в г. Сухуми. Кроме того, нами использовались открытые данные исследований систем тягового энергоснабжения коллег в троллейбусных системах гг. Новосибирска и Гдыня (Польша) и бортовых накопителей в трамваях г. Санкт-Петербурга.

В качестве теоретической базы исследования применены основы составления энергетического баланса в системах тягового энергоснабжения постоянного тока. Математический аппарат включал методы математической статистики. Экспериментальная часть исследования заключалась в проведении длительной эксплуатации стационарного буферного накопителя энергии для ГЭТ маховикового типа НКЭ-3Г в 2020–2022 гг. в трамвайных системах гг. Коломны и Санкт-Петербурга.

Результаты и обсуждение

Источники энергии и потребляющее оборудование в системе тягового энергоснабжения

Первичным источником энергии в ГЭТ является тяговая подстанция (ТП). В перечень потребителей энергии от контактной сети (КС) входят системы тяги подвижного состава (тяговые электродвигатели и частотные приводы), а также нетяговое оборудование вагонов (освещение; отопление; компрессоры; вспомогательные электродвигатели; система управления; информирования и т. д.) и стационарной инфраструктуры (системы обогрева стрелок; освещение путей и остановочных павильонов; сигнализация и информационные системы и т. п.). В вагонах с реостатно-контакторной системой тяги (РКСУ) предусмотрена возможность рекуперативного торможения, когда механическая энергия линейного замедления вагона превращается в электрическую в тяговых двигателях. Однако данные вагоны не имеют возможности выдавать эту энергию в контактную сеть для передачи ее другим вагонам, потребляющим в это время энергию из сети, а направляют ее на свои бортовые тормозные резисторы, где она рассеивается теплом в атмосферу.

Внедрение на подвижном составе частотных приводов, управляющих тяговыми двигателями, обеспечило снижение энергопотребления за счет более плавного регулирования хода, а также уменьшения пусковых токов при разгоне. Транзисторные частотные приводы обеспечивают требуемые контактной сетью параметры энергии рекуперации, которая образуется при электродинамическом торможении вагонов. Выдача энергии в КС возможна только при одновременном с торможением данного поезда наличии других вагонов, потребляющих энергию с суммарной мощностью потребляющего оборудования, равной или большей, чем мощность рекуперировавших двигателей. Рекуперировавшие приводы вагонов, выдающие полезную часть энергии рекуперации в КС, являются вторичными (производными от первичных) источниками энергии.

Благодаря тяговым частотным приводам современная КС располагает двумя источниками энергии: ТП и рекуперировавшими вагонами. В КС имеются два типа нагрузки – тяговая и нетяговая. Эти пары источников и нагрузки обеспечивают баланс энергии в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) как в каждое мгновение, так и за выделенный период (например, за сутки, месяц, год).

Энергия рекуперации при одновременном наличии в КС потребителя приблизительно равной мощности направляется в сеть с выхода частного преобразователя и поступает на потребляющее оборудование (тяговое и нетяговое). В процессе перетекания энергии рекуперации по контактной сети [т. н. межпоездной обмен полезной рекуперацией (МПО)] в этот контур перетока энергия от тяговой подстанции не попадает, так как напряжение в этой зоне выше, чем формируемое в ней напряжение от ТП. Таким образом, энергия полезной рекуперации замещает потребление энергии от первичного оплачиваемого энергоисточника, снижая объемы финансовых затрат транспортного предприятия на энергоресурсы для выполнения транспортной работы (в тяговой и нетяговой ее частях). Та часть энергии рекуперации, которая при отсутствии в КС энергопотребителя достаточной для ее потребления мощности рассеивается на бортовых тормозных

резисторах, называется избыточной рекуперацией и в замещении оплачиваемой энергии от тяговой подстанции не принимает участия.

Следует отметить, что энергия рекуперации является бесплатной по нескольким основаниям. Главное из них – эта электрическая энергия образовалась из механической энергии движения вагона, которая, в свою очередь, образовалась из превращения электроэнергии, поступившей от источников, в том числе от оплачиваемого источника – ТП, в механическую энергию линейного движения. Другими словами, электроэнергия от ТП уже оплачена энергопоставщику в момент поступления в КС, а ее повторное использование уже от вторичного энергоисточника – рекуперировавшего вагона – не требует оплаты, так как она уже принадлежит транспортному предприятию. Процесс превращения при рекуперации механической энергии движения вагона в электрическую не вызывает дополнительного износа элементов и узлов системы тяги вагона, так как при отсутствии возможности выдачи этой рекуперированной энергии у вагонов с РКСУ электродинамическое торможение является базовым способом торможения, в его системе тяги происходят те же процессы, что и у вагонов с транзисторной системой управления тягой (ТрСУ), только в первом случае рекуперированная энергия направляется не в КС, а на тормозные резисторы. Энергия полезной рекуперации не имеет никаких дополнительных амортизационных затрат, как и при электродинамическом торможении с выдачей энергии на тормозные резисторы. В силу этого полезная энергия рекуперации имеет изначально нулевую себестоимость как по эксплуатационной, так и по капитальной составляющим.

Соотношение энергопотоков в системе тягового электроснабжения

Рассмотрим отдельно стороны энергобаланса – источники и нагрузку. Исследователи (Спиридонов и др., 2018; Namacek et al., 2014) определили объемы составляющих баланса от обоих источников энергии в системе тягового электроснабжения и отметили снижение за счет бесплатной полезной рекуперативной энергии потребления оплачиваемой энергии от ТП до 18–40 %. Исходя из результатов годового мониторинга КС трамвая в Санкт-Петербурге (2021 г.), нами установлено, что по выпрямленной стороне от ТП в КС поступило энергии $E_{ТП}$ ~82,7 % от общего объема потребленной нагрузкой электроэнергии, а от рекуперировавших вагонов выдано $E_{рек. полезн}$ ~17,3 %. Полезная рекуперация, которая направляется на сетевую нагрузку по контактной сети, существенно уменьшила потребление оплачиваемой энергии от выпрямительного агрегата подстанции. Энергия от этих источников измерялась счетчиками, расположенными на фидерах ТП и на входе в тяговые частотные преобразователи всех вагонов.

Следует учитывать, что часть энергии от первичного и вторичных источников рассеивалась теплом в контактных проводах. Согласно отечественным отраслевым нормативным документам, КПД контактно-кабельной сети $\eta_{ккс}$ в среднем составляет 93 %¹. Это значение для КС подтверждается и зарубежными исследователями. Так, по данным длительных измерений в КС польских троллейбусных систем, омические потери в ней не превышают 10 % (Bartłomiejczyk et al., 2016), т. е. до потребляющего оборудования (вагонов и стационарной нагрузки, подключенной к КС) дошло 93 % от объема энергии, выданной обоими источниками. В ходе проведенного нами исследования с помощью бортовых счетчиков определено, что на тягу было израсходовано 49,34 % от энергии $E_{тяги}$, выданной в КС обоими источниками. Данный показатель позволяет точно определить объем потребления нетяговой (бортовой и стационарной) нагрузкой электроэнергии $E_{нетяги}$ из КС, которая составила 50,66 %. В это значение также включены потери энергии при передаче по контактно-кабельной сети. Таким образом, в рассматриваемой типовой для РФ трамвайной системе в целом за год тяговое и нетяговое потребление было примерно равным. Также был определен объем полезной рекуперации вагонов $E_{рек. полезн}$, который составил 27,7 % от тягового энергопотребления вагонов.

Исследование и измерения процессов в системе тягового электроснабжения трамвая в течение года позволили определить и объем избыточной энергии рекуперации, которая в отсутствие при рекуперативном торможении вагонов достаточной сетевой нагрузки была рассеяна на тормозных резисторах. В годовом выражении избыточная рекуперация $E_{рек. изб}$ составила около 23 % от энергии, потребленной на тягу, т. е. ненамного меньше полезно потребленной по межпоездным перетокам части рекуперации.

Избыточная энергия рекуперации в настоящее время (без использования накопителей) поступает на бортовые тормозные реостаты. Именно эта энергия $E_{реостат}$ является тем потенциалом, который позволит снизить оплачиваемое энергопотребление от тяговой подстанции.

Формула баланса энергии на сетевой нагрузке в КС ГЭТ, исходя из вышеописанных источников и нагрузки, описывается следующим уравнением:

$$(E_{ТП} + E_{рек. полезн})\eta_{ккс} + E_{рек. изб} = E_{тяги} + E_{нетяги} + E_{реостат} \quad (1)$$

Максимальное значение, до которого может быть дополнительно снижено оплачиваемое энергопотребление от ТП, может быть получено только за счет более полного задействования рекуперированной энергии вагонами, т. е. за счет $E_{рек. изб}$, которую необходимо с помощью имеющихся технических средств

¹ Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499017626>.

перевести в категорию полезной рекуперации $E_{\text{рек. полезн}}$. При этом потребление энергии тормозными резисторами $E_{\text{рестат}}$ снизится до минимального значения.

Способы полного задействования энергии рекуперации

Единственной для ГЭТ возможностью максимизировать использование всей электроэнергии ($E_{\text{рек. полезн}} + E_{\text{рек. изб}}$), получаемой при рекуперативном торможении, является применение буферных накопителей энергии; имеются только две схемы применения буферных накопителей в СТЭ ГЭТ: на борту вагонов и стационарно.

Бортовые накопители энергии. Наиболее распространенная схема размещения бортовых накопителей (БН) в электрической цепи описана в работе (Jandura et al., 2017). В настоящее время в качестве бортовых буферных накопителей рекуперативной энергии применяются главным образом суперконденсаторные системы. Указанная схема потребовала уточнений при учете дополнительных каналов потребления энергии бортовыми накопителями на собственные нужды (система управления, климат-контроль), а также на компенсацию саморазряда суперконденсаторных накопительных элементов (рис. 1). В эту схему вошло и указание на дополнительное потребление энергии на тягу вагона, масса тары которого увеличена за счет размещения на борту накопителя энергии массой 1 т и более.



Рис. 1. Схема тяговой цепи ПС с бортовым накопителем. Стрелками показаны направления энергопотоков
Fig. 1. Diagram of the traction chain of a rolling stock with an on-board drive.
The arrows show the directions of energy flows

Для полного использования энергии рекуперации в СТЭ требуется установка бортовых накопителей на каждую единицу подвижного состава. Цикл работы БН следующий. При рекуперативном торможении тяговый привод на звене постоянного тока (ЗПТ) повышает напряжение. При этом по срабатыванию верхней уставки напряжения на прием энергии рекуперации включается БН, который имеет мощность потребления, равную или большую мощности тягового привода вагона в режиме рекуперации. Это означает, что рекуперативные токи в КС не выходят и отсутствуют потери энергии в КС, равные, как выше было указано, 7 %. Причем в бортовой накопитель попадают не только избыточная рекуперация $E_{\text{рек. изб}}$, но и вся потенциально полезная рекуперация $E_{\text{рек. полезн}}$, которая без накопителя шла бы на сетевую нагрузку по КС. После приема рекуперированной энергии и процесса короткого хранения (в период стоянки вагона) производится выдача ее из накопителя на тяговый привод вагона для его разгона. Сигналом для выдачи служит падение напряжения на ЗПТ в ходе разгона ниже значения нижней уставки по напряжению накопителя. Практически вся энергия, выдаваемая БН, поступает на тяговый привод, а ЗПТ тягового инвертора становится точкой токораздела с потоками энергии от ТП в периоды перетоков рекуперированной энергии, так как нетяговая нагрузка вагона (включая собственные нужды самого БН) питается от КС (мощность тяги на разгоне забирает всю энергию из БН, поскольку мощность и объем энергии разгона поезда всегда превышают эти значения, которые может выдать БН). К нетяговой нагрузке ПС относятся также и собственные нужды преобразователя накопителя и самих накопительных элементов (вентиляция, управление). Поскольку вся энергия, выдаваемая БН, поступает в тяговый привод своего же вагона, то выдача рекуперативной энергии в КС в такой схеме отсутствует.

Избыточной рекуперации в данном случае также не остается, поскольку производители БН подбирают такую их энергоемкость, которая может забрать всю возможную для вагона ГЭТ энергию рекуперации. Так, значительная часть отечественных и зарубежных исследователей сходится во мнении, что полный

объем рекуперации составляет порядка 40–60 % от потребленной на тягу энергии (*Шаряков и др., 2018; Namacek et al., 2014*).

Например, при удельном энергопотреблении на тягу вагона в 2 кВт·ч на 1 км, если он за сутки проходит путь в 200 км, его полная энергия, затраченная на тягу, составит $E_{\text{тяги}} = 400$ кВт·ч, а нетяговые затраты системы будут равны $E_{\text{нетяги}} = 0,5968E_{\text{тяги}}$; при этом полный объем энергии рекуперации тягового привода составит $E_{\text{рек. полезн}} + E_{\text{рек. изб}} = 0,5E_{\text{тяги}} = 200$ кВт·ч. При этом действительный КПД силового контура БН ($\eta_{\text{бн}}$) за полный цикл работы равен в среднем 64 % (*Чернигов, 2021; Кацай и др., 2022a*), т. е. омические потери энергии рекуперации в силовом контуре БН превышают омические потери полезной рекуперации в КС более чем в пять раз. В текущем примере от накопителя на клеммы тягового привода вернется всего 128 кВт·ч от принятых в ходе рекуперативного торможения 200 кВт·ч.

С учетом действительного КПД накопительных агрегатов уравнение баланса (1) для случая применения БН приобретает вид

$$'E_{\text{ТП}}\eta_{\text{ккс}} + ('E_{\text{рек. полезн}} + 'E_{\text{рек. изб}})\eta_{\text{бн}} = 'E_{\text{тяги}} + 'E_{\text{нетяги}}, \quad (2)$$

где штрихи перед показателями означают, что изменились потоки энергии от источников и к нагрузке в сравнении с системами ГЭТ без накопителей энергии. Здесь необходимо учитывать следующие особенности, отличающие условия работы вагонов с БН от условий работы этих же вагонов, но без бортовых накопителей:

- 1) $\eta_{\text{ккс}} = 0,93$;
- 2) $\eta_{\text{бн}} = 0,64$;
- 3) $'E_{\text{тяги}} = 1,07 'E_{\text{тяги}}$ [расход на тягу в сравнении с таковым в системе без накопителей вырастет на 7 % за счет увеличения массы тары вагона на вес накопительного устройства и его оснастки (*Кацай и др., 2023a*)];
- 4) $'E_{\text{нетяги}} = 0,8587 E_{\text{тяги}}$ [в системах с бортовыми накопителями нетяговое энергопотребление увеличивается в сравнении с таковым у систем без накопителей энергии за счет собственных нужд бортового накопителя: вентиляция; система управления; компенсация просадок напряжения накопительных элементов (*Кацай и др., 2023a*)].

Помимо омических потерь бортовые накопители вызывают дополнительное потребление оплачиваемой энергии от тяговой подстанции:

– на тягу вагона, так как из-за размещения многотонного накопителя на борту масса тары вагона увеличивается и, соответственно, увеличиваются затраты энергии на тягу. Для вагона массой тары 20 т размещение БН массой 2 т означает дополнительное увеличение энергозатрат на тягу на 10 %. В день на указанные цели дополнительно затрачивается (при стандартном пути вагона в сутки, равном 200 км) до 40–50 кВт·ч. Поскольку данная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. еще на более чем 3 кВт·ч;

– нужды нетягового характера по удовлетворению собственных нужд БН (системы управления, вентиляции). Мощность потребления этих систем незначительна (порядка 3 кВт), однако она потребляется из сети в течение всего времени работы вагона на линии (порядка 18 ч в сутки). За сутки на данные цели может расходоваться около 50 кВт·ч. Поскольку указанная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. еще порядка 3 кВт·ч;

– новый для ПС вид энергопотребления – поддержание и восполнение заряда суперконденсаторов в периоды конечной фазы разгона и выбега вагона (т. е. после того как накопитель выдал весь рабочий запас энергии при разгоне, происходит потребление накопителем из КС, чтобы поддержать заряд суперконденсатора на технологически минимально допустимом уровне). За сутки работы (18 ч) у вагона может быть до 500–600 циклов, моментом которых является выбег. По предварительным оценкам разработчиков бортовых накопителей, мощность восполнения заряда БН из КС составляет до 35 кВт, а продолжительность каждого восполнения – десятки секунд. За сутки на эти цели вагоном из КС может потребляться до 50 кВт·ч электроэнергии. Поскольку данная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. дополнительно еще более 3 кВт·ч.

Суммарно дополнительное потребление оплачиваемой сетевой энергии на входе в токосъемник вагона при использовании бортовых накопителей составит за рассматриваемый день более 190 кВт·ч, тогда как возврат им рекуперированной энергии на тягу – только 128 кВт·ч. С учетом омических потерь энергии в самом накопителе суммарно потери энергии и дополнительное энергопотребление бортового накопителя практически равны полному объему энергии рекуперации, выданной тяговым приводом вагона на накопитель (200 кВт·ч). Отрицательный баланс энергии на токосъемнике вагона с бортовым накопителем составляет 62 кВт·ч в день. Если бы на вагон не установили бортовой накопитель, то он мог бы выдавать в КС полезную энергию рекуперации в объеме 110,8 кВт·ч. Таким образом, применение бортового накопителя снижает энергоэффективность вагона до того уровня, когда отсутствует повторное использование энергии рекуперации (т. е. при деградации технологии тяги с заменой частотного привода ТрСУ обратно на систему РКСУ). С работой БН оплачиваемое энергопотребление от тяговой подстанции $'E_{\text{ТП}}$ увеличивается на 23,36 % в сравнении с системой, где отсутствуют бортовые накопители (*Кацай и др., 2023a*). Применение БН приводит к росту затрат транспортного предприятия за счет увеличения оплачиваемого энергопотребления от ТП.

Стационарные накопители энергии. Стационарные накопители энергии (СН) устанавливаются по одной штуке на каждую тяговую подстанцию. Схема электрической цепи со стационарным накопителем энергии существенно отличается от схемы для БН. На рис. 2 приведена схема цепи с подключенным к КС стационарным накопителем типа НКЭ-3Г.

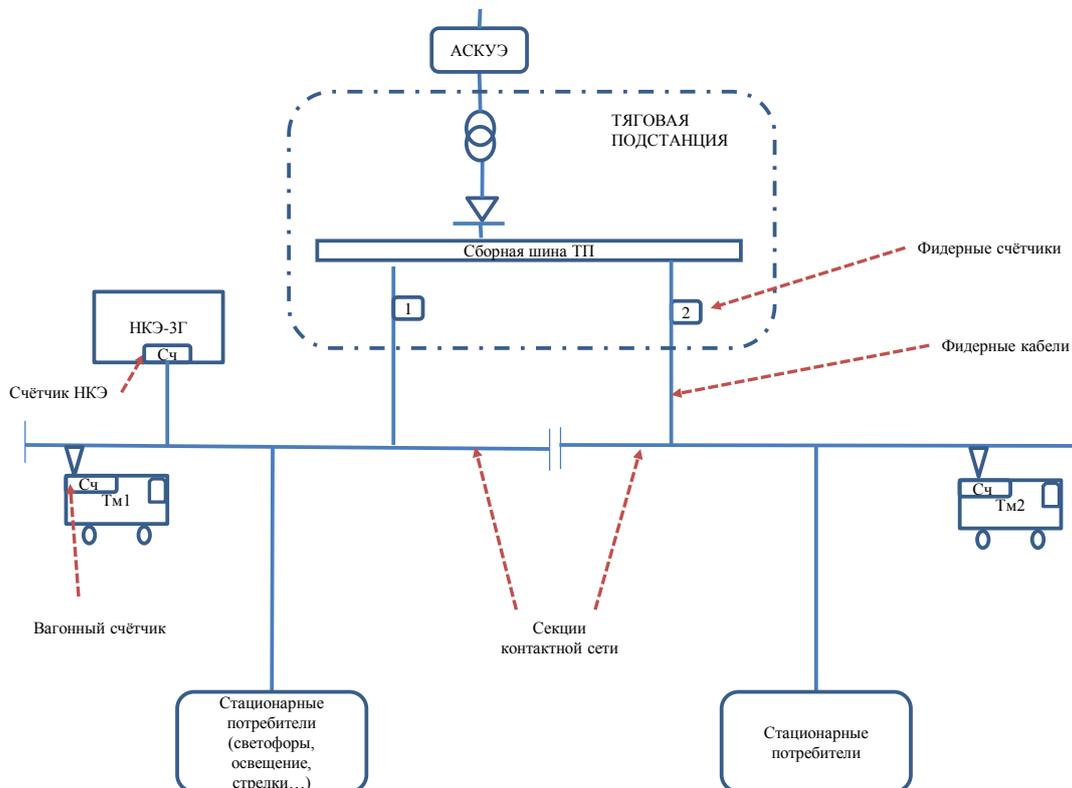


Рис. 2. Схема электрической цепи СТЭ со стационарным накопителем
 Fig. 2. Diagram of the electric circuit of the traction power supply system with a stationary storage device

Для полной утилизации рекуперации на полезное потребление для выполнения транспортной работы ГЭТ стационарных накопителей требуется на порядок меньше, чем бортовых. Режим работы СН следующий. Такой накопитель не участвует в полезных перетоках энергии рекуперации между рекуперирующим и потребляющим поездами, сохраняя их естественный процесс. Доля омических потерь энергии рекуперации при перетоках ее по КС такая же, как при перетоках энергии от тяговых подстанций, т. е. составляет 7 %. Стационарный накопитель подключается на прием избыточной энергии рекуперации при превышении напряжения в КС выше значения его верхней уставки активации (аналогично с принципом работы бортового накопителя). Также выдача ранее запасенной в СН избыточной рекуперации производится при появлении в сети потребляющего оборудования, когда уровень напряжения в КС падает ниже значения нижней уставки агрегата. При этом если в сети установлено в качестве стационарного накопителя суперконденсаторное устройство, то его КПД, как указано выше, не превышает по году значения 64 %. Примерно такой же КПД имеет и маховичный накопитель, например, типа НКЭ-3Г (Кацай и др., 2022а), т. е. стационарный и бортовой накопители с любым типом накопительных элементов имеют собственную характеристику действительной эффективности не выше указанного значения ($\eta_{сн} = \eta_{бн}$). С учетом того что почти все потоки энергии на выполнение транспортной работы для случая применения стационарных накопителей проходят по КС, уравнение баланса энергии в СТЭ принимает вид

$$(\tilde{E}_{ТП} + \tilde{E}_{рек. полезн} + \tilde{E}_{кбк} + \tilde{E}_{сн. выд})\eta_{ккс} = \tilde{E}_{тяги} + \tilde{E}_{нетяги}, \quad (3)$$

где штрихи перед показателями означают, что изменились потоки энергии от источников и к нагрузке в сравнении с системами ГЭТ без накопителей энергии; $\tilde{E}_{кбк}$ – потребление нетяговой сетевой нагрузкой части перенаправленной накопителем энергии избыточной рекуперации в ходе его зарядки; $\tilde{E}_{сн. выд}$ – выданная накопителем ранее запасенная часть энергии избыточной рекуперации, равная энергии его зарядки с учетом КПД накопителя $\tilde{E}_{сн. выд} = \tilde{E}_{сн. заряд}\eta_{сн}$. Вся энергия избыточной рекуперации, которая отражена в формуле (1), в этом случае перенаправлена в КС на сетевую маломощную нагрузку и на зарядку

$$\text{накопителя } \frac{\tilde{E}_{кбк} + \tilde{E}_{сн. заряд}}{\eta_{ккс}} = \tilde{E}_{рек. изб}.$$

Условия работы вагонов со СН отличаются от условий работы этих же вагонов с бортовыми накопителями и имеют следующие особенности:

- 1) $\eta_{\text{ККС}} = 0,93$;
- 2) $\eta_{\text{сн}} = \eta_{\text{бн}} = 0,64$;
- 3) " $E_{\text{тяги}} = E_{\text{тяги}}$ " (в сети со СН масса вагонов и, соответственно, тяговая работа не изменяются в сравнении с вариантом без накопителей);
- 4) " $E_{\text{нетяги}} = 0,6062E_{\text{тяги}}$ " [нетяговое энергопотребление системы со СН увеличивается в сравнении с таковым у систем без накопителей энергии за счет собственных нужд накопителя (вентиляция, система управления, компенсация просадок напряжения накопительных элементов)].

Из формулы (3) видно, что стационарный накопитель имеет существенно меньшее абсолютное значение омических потерь при обеспечении использования всей энергии рекуперации вагонов на повторное полезное применение для транспортной работы в сравнении с бортовыми накопителями, что отражено в выражении (2), поскольку $\eta_{\text{ККС}} \gg \eta_{\text{бн}}$. Этот факт объясняется конфигурацией электрической цепи при эксплуатации стационарных накопителей, отличающейся от конфигурации цепи при использовании бортовых накопителей:

– СН сохраняет все перетоки полезной рекуперации от тормозящих вагонов к потребляющим, при которых омические потери в КС составляют всего 7 %;

– появляется эффект, когда в ходе зарядки накопителя часть энергии избыточной рекуперации, которая при зарядке стационарного накопителя перетекает к нему по КС от избыточно рекуперирующего тормозящего вагона, непосредственно потребляется полезной сетевой нагрузкой (нетяговой бортовой и стационарной, а также тяговой малой мощности). Такой эффект получил название "эффект КБК²" (*Кацай и др., 2022б*). Поскольку эта часть избыточной рекуперации не попадает в накопитель, хотя и появляется в сети благодаря ему, то от нее теряется только энергия в КС, т. е. имеют место лишь омические потери в сети (7 %), а не омические потери в накопителе (36 %). Такой эффект невозможен при работе бортовых накопителей, так как вся рекуперация циркулирует между тяговым приводом вагона и бортовым накопителем (рис. 1), в котором омические потери составляют 36 %;

– оставшаяся часть избыточной рекуперации принимается в СН, хранится там незначительное время (до появления в КС потребляющего оборудования), после чего выдается накопителем в сеть. Если бортовой накопитель принимает 100 % рекуперации ПС, то стационарный накопитель не участвует в перетоках полезной рекуперации (68,5 % от полного объема рекуперации), позволяет сетевой нагрузке потреблять непосредственно часть избыточной рекуперации ("эффект КБК" составляет 14,7 % от всего объема рекуперации), и оставшийся объем от полного значения рекуперации (16,74 %) накопитель опосредствует своей работой (принимает, хранит и затем выдает в сеть на появившуюся нагрузку). Омические потери бесплатной рекуперации в накопителе ($\eta_{\text{сн}} = 0,64$) распространяются только на эту последнюю часть;

– СН находится на земле, поэтому отсутствуют затраты энергии на его перевозку (тягу) (в отличие от бортовых накопителей, которые перевозятся вагоном как дополнительный балласт к массе тары);

– собственное потребление энергии стационарным накопителем (такое же, как и потребление бортового накопителя на его собственные нужды) лишь частично удовлетворяется оплачиваемой энергией от тяговой подстанции (пропорционально его коэффициенту загрузки). Остальная часть электропотребления на собственные нужды СН удовлетворяется за счет избыточной энергии рекуперации вагонов в периоды, когда накопитель принимает или выдает избыточную энергию рекуперации (бесплатную). В это время напряжение на клеммах накопителя формируется в процессе оборота избыточной рекуперации и всегда выше, чем формируемое в этой точке цепи напряжение от ТП.

Как показала длительная эксплуатация стационарного накопителя типа НКЭ-3Г в КС трамвая (*Кацай и др., 2023б*), снижение потребления оплачиваемой энергии от ТП в сравнении с вариантом отсутствия накопителей энергии (когда только часть полной рекуперации становится полезной – перетекает по КС к потребляющим вагонам), составляет 10 %.

Затраты на обслуживание одного стационарного накопителя суперконденсаторного типа такие же, как и для аналогичного одного бортового накопителя. Если применяется в качестве СН маховичный накопитель, обладающий более простой конструкцией накопительного элемента, то его обслуживание для транспортного предприятия обойдется значительно дешевле (все остальные подсистемы его аналогичны таковым у суперконденсаторных устройств: силовой преобразователь, система вентиляции, система контроля и управления). Срок службы маховичной системы вдвое превышает срок службы суперконденсаторов.

Следует упомянуть также и о необходимости затрат сетевой энергии на поддержание минимального уровня заряда накопительных элементов СН. Разработчики и исследователи БН отмечают, что в среднем за рабочий день бортовой накопитель производит 400 циклов зарядки/разрядки (именно столько торможений с рекуперацией делает одна единица ПС за день). Некоторые исследователи указывают, что этот показатель

² Эффект КБК – процесс электропитания полезной сетевой нагрузки, перенаправленной избыточной энергией рекуперации подвижного состава в ходе зарядки стационарного накопителя (эффект Кацай – Бизьева – Козаревича).

составляет 500–600 циклов³. А у стационарных накопителей количество циклов зарядки/разрядки достигает 4 000 и более за день (Баранов и др., 2014; Кацай и др., 2022a). Сравнение суммарной длительности процессов зарядки и разрядки у стационарных и бортовых накопителей показывает, что и время активной работы их различается в сутки примерно на такой же порядок. Это означает, что бортовой накопитель большую часть времени перевозится подвижным составом как обычный балластный груз и не совершает полезной работы. Стационарный же накопитель имеет коэффициент загрузки, близкий к единице ($> 0,75$). Этот показатель также означает, что время выбега у стационарного накопителя (когда он не принимает и не выдает энергию избыточной рекуперации) в несколько раз меньше, чем у бортового накопителя в периоды между выдачей всей запасенной энергии на разгон своего вагона и приемом им энергии рекуперативного торможения (т. е. на выбеге вагона и на стоянке). При этом нужно учесть, что бортовой накопитель после разгона вагона всегда "пуст", т. е. отдал весь рабочий объем энергии, и в нем осталось такое ее количество на момент прекращения выдачи, которое является предельно минимальным для нормальной работы данного устройства. Затем саморазряд суперконденсаторного бортового накопителя идет естественным образом, и для восполнения потерь из КС для поддержания минимально технологически допустимого уровня заряда накопителя потребляется оплачиваемая энергия от ТП (как было описано выше). Период выбега у бортового накопителя длится между этапами выдачи энергии и ее приема при выданной всей ранее запасенной энергии, а также в периоды стоянки вагона после приема энергии рекуперации, т. е. при заполненном объеме.

Между тем у стационарного накопителя прекращение выдачи или приема энергии, т. е. режим выбега, возникает только при одновременном отсутствии в сети избыточной рекуперации и любого вида нагрузки – как тяговой, так и нетяговой. Прекращение выдачи или приема происходит существенно реже, поскольку энергию из накопителя потребляют оба вида нагрузки. Нетяговая нагрузка у подвижного состава и у стационарных устройств сети потребляет энергию всегда, и стационарный накопитель выдает ранее запасенную энергию на них малыми токами. А тяговая нагрузка при работе стационарного накопителя может электроснабжаться как от одновременно рекуперирующих вагонов, так и от накопителя. Количество же событий наличия избыточной рекуперации, как было показано выше, в КС на порядок больше, чем во внутренней цепи подвижного состава между тяговым приводом и бортовым накопителем.

Сводные данные, позволяющие сравнить изменение потребления энергии в СТЭ (в том числе оплачиваемой от ТП) в случаях работы ГЭТ без накопителей, с бортовыми и стационарными накопителями, приведены на рис. 3.

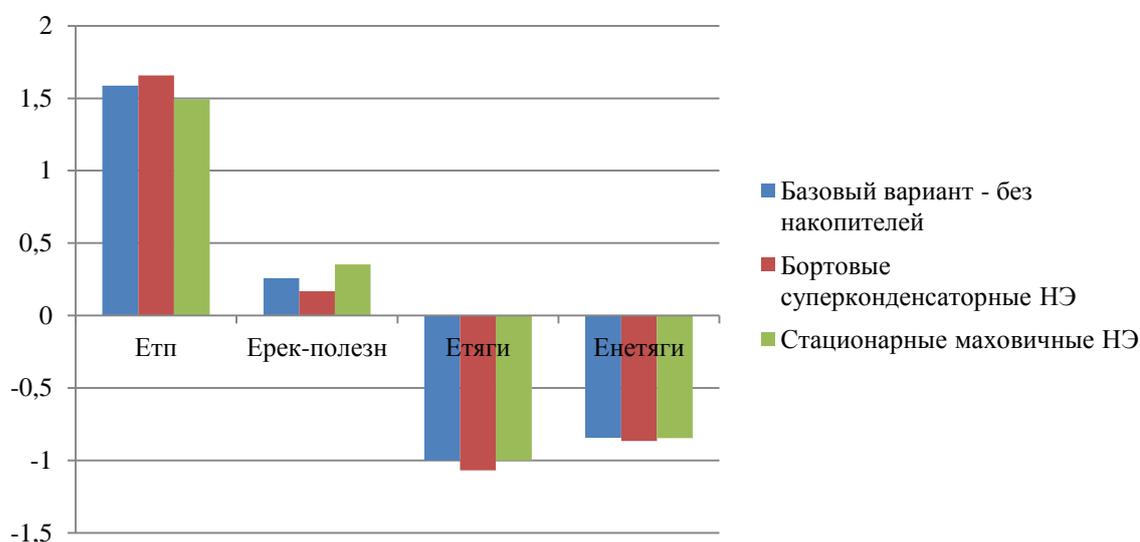


Рис. 3. Баланс источников и нагрузки для рассматриваемых вариантов трамвайной системы (без накопителей, с бортовыми и стационарными накопителями) по статьям: нагрузка (тяговая и нетяговая), источники энергии (тяговая подстанция и повторно использованная рекуперация).

По оси ординат – пропорция от тягового энергопотребления в сети без накопителей ($E_{тяги}$)
 Fig. 3. Balance of sources and load for the tram system options under consideration (without storage devices, with onboard and stationary storage devices) according to the points: load (traction and non-traction), energy sources (traction substation and reused recovery). On the ordinate axis – the proportion of traction power consumption in a network without storage devices ($E_{тяги}$)

³ Компания "ТЭЭМП". ENERGY RECYCLER // Отраслевой информационный сборник: российский общественный транспорт 2022 + материалы участников выставок Российской недели общественного транспорта. М., 2022. С. 164.

Из рис. 3 видно, что применение бортового накопителя существенно увеличивает в системе тяговое и нетяговое энергопотребление, при этом объем повторно использованной на транспортную работу энергии рекуперации заметно снижается в сравнении с системой без накопителей, а в сравнении с работой стационарных накопителей – снижается значительно. Применение стационарных накопителей не влияет на тяговое энергопотребление вагонов, немного увеличивает нетяговое энергопотребление стационарной инфраструктуры и способствует полному использованию энергии рекуперации вагонов. В итоге в сравнении с системами без накопителей энергии применение БН приводит к увеличению потребления оплачиваемой энергии от ТП более чем на 23 %, а стационарных накопителей – к снижению потребления оплачиваемой энергии от ТП на 10 %.

Заключение

Для предприятия ГЭТ стационарных накопителей для обработки всей энергии рекуперации требуется в 10 раз меньше, чем бортовых накопителей.

Применение БН приводит к увеличению потребления оплачиваемой энергии от тяговой подстанции примерно на 23,36 %.

Применение стационарных накопителей приводит к снижению потребления оплачиваемой энергии от тяговых подстанций примерно на 10 %.

Применение бортовых накопителей энергии нерентабельно как по причине увеличения объемов потребления оплачиваемой энергии в СТЭ, так и в силу сверхвысоких капитальных и эксплуатационных затрат.

В качестве стационарных накопителей могут использоваться накопительные агрегаты суперконденсаторного и маховичного типов. Остается неисследованным вопрос достаточности ресурса суперконденсаторов при стационарном использовании, поскольку в год в КС ТП стационарный накопитель любого типа производит до 1,5 млн циклов зарядки/разрядки. Бортовой накопитель большую часть времени своего подключения не работает, поскольку он в течение года осуществляет (сообразно с количеством циклов разгона/торможения) не более 150 тысяч циклов зарядки/разрядки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баранов Л. А., Гречишников В. А., Ершов А. В., Родионов М. Д. [и др.]. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена // *Электротехника*. 2014. № 8. С. 18–21. EDN: SGHUSZ.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. 2022а. Т. 30, № 4(76). С. 127–141. DOI <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.9>. EDN: AMJPCB.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Экономия энергии в контактной сети электротранспорта при работе стационарного накопителя // *Практическая силовая электроника*. 2023б. № 1(89). С. 42–52. EDN: OYNQUC.
- Кацай А. В., Бизяев А. А., Козаревич В. А. Эффект питания полезной сетевой нагрузки избыточной энергией рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя // *Энергетические системы*. 2022б. Т. 7, № 4. С. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.34031/es.2022.4.008>.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023а. Вып. 4. С. 542–560. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-542-560. EDN: XOJPAO.
- Мукин С. Рост цен на электроэнергию, высокая стоимость ремонта и обновление оборудования. Администрация города рассказала, почему хочет повышать цену проезда на трамвае. URL: <https://ulpressa.ru/2019/03/11/рост-цен-на-электроэнергию-высокая-ст/>.
- Спиридонов Е. А., Ярославцев М. В., Хайленко Е. А. Оценка влияния характеристик троллейбуса на эффективность рекуперативного торможения // *Электропривод на транспорте и в промышленности* : тр. II Всерос. науч.-практ. конф., Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. С. 235–243. EDN: YTZVBZ.
- Чернигов В. М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем. URL : http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf.
- Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Агунов А. В., Третьяков А. В. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // *Электротехника*. 2018. № 10. С. 55–59. EDN: MAGDHV.
- Bartłomiejczyk M., Hołyszko P., Filipek P. Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport // *Journal of Ecological Engineering*. 2016. Vol. 17, Iss. 5. P. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/65447>.

- Hamacek Š., Bartłomiejczyk M., Hrbáč R., Mišák S. [et al.]. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport // *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 112. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.001>.
- Jandura P., Kubín J., Hubka L. Electric energy monitoring for applying an energy storage systems in trolleybus DC traction // *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*. Donostia, Spain, 2017. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecmsm.2017.7945904>.

References

- Baranov, L. A., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. V., Rodionov, M. D. et al. 2014. Performance indicators of stationary energy storage device at traction substations of the Moscow Metro. *Elektrotehnika*, 8, pp. 18–21. EDN: SGHUSZ. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2022a. Efficiency coefficients of an energy storage device in the contact network of the city electric transport. *Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)*, 30(4(76)), pp. 127–141. DOI <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.9>. EDN: AMJPCB. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2023b. Energy saving in the contact network of electric transport during the operation of a stationary storage device. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika*, 1(89), pp. 42–52. EDN: OYHQUC. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Bizyaev, A. A., Kozarevich, V. A. 2022b. The effect of feeding the payload with excess recovery energy during charging of a stationary storage device. *Energy Systems*, 7(4), pp. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.34031/es.2022.4.008>. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2023a. The influence of buffer accumulators of on-board and stationary type on the energy consumption of traction substations in city electrical transport. *Izvestiya Tula State University*, 4, pp. 542–560. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-542-560. EDN: XOJPAO. (In Russ.)
- Mukin, S. The rise in electricity prices, the high cost of repairing and updating equipment. The city administration told why it wants to raise the price of a tram ride. URL: <https://ulpressa.ru/2019/03/11/пост-цен-на-электроэнергию-высокая-ст/> (Accessed 9.09.2023). (In Russ.)
- Spiridonov, E. A., Yaroslavtsev, M. V., Khailenko, E. A. 2018. Assessment of the influence of trolleybus characteristics on the efficiency of regenerative braking. In Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conf. *Electric drive in transport and industry*, Khabarovsk, 20–21 September, 2018. Khabarovsk, pp. 235–243. EDN: YTZVBZ. (In Russ.)
- Chernigov, V. M. Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device. URL: http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Accessed: 07/22/2022). (In Russ.)
- Sharyakov, V. A., Sharyakova, O. L., Agunov, A. V., Tretyakov, A. V. 2018. Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock. *Elektrotehnika*, 10, pp. 55–59. EDN: MAGDHV. (In Russ.)
- Bartłomiejczyk, M., Hołyszko, P., Filipek, P. 2016. Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport. *Journal of Ecological Engineering*, 17(5), pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/65447>.
- Hamacek Š., Bartłomiejczyk M., Hrbáč R., Mišák S. et al. 2014. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research*, 112, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.001>.
- Jandura P., Kubín J., Hubka L. 2017. Electric energy monitoring for applying an energy storage systems in trolleybus DC traction. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*. Donostia, Spain, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecmsm.2017.7945904>.

Сведения об авторе

Кацай Александр Владимирович – ул. Южнопортовая, 40, стр. 3, г. Москва, Россия, 115088;
ООО "Кинемак", канд. филос. наук, генеральный директор;
e-mail: proton764@mail.ru

Alexander V. Katsay – 40/3 Yuzhnoportovaya Str., Moscow, Russia, 115088;
Kinemak LLC, Cand. Sci. (Philosophy), General Director;
e-mail: proton764@mail.ru

УДК 621.311

Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях

А. Р. Петров*, Е. И. Грачева, S. Valtchev

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: petroval13@mail.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
28.08.2023;

принята
к публикации
14.09.2023

Ключевые слова:

электрические
аппараты,
сопротивление
контактов,
нагрев контактов,
аппроксимирующие
функции,
потери
электроэнергии

В работе проведено исследование технических параметров низковольтных коммутационных аппаратов российского производства – магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19. Рассматривается проблема оценки энергоэффективности эксплуатации магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых во внутривоздушных системах электроснабжения. Приведены основные дестабилизирующие факторы, существенно влияющие на технические характеристики коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ. Надежность функционирования исследуемых аппаратов, прежде всего, зависит от степени износа коммутационных контактов. Исследованы зависимости температуры нагрева контактных площадок коммутационных аппаратов от коэффициента загрузки. Выявлено, что с увеличением загрузки аппаратов в диапазоне от 1,0 до $2,0I_{ном}$ температура контактов и контактных площадок находится в допустимых пределах в соответствии с требованиями ГОСТ 403-73. Показаны основные, влияющие на сопротивление контактных соединений факторы – ток, протекающий по контактам, их размеры и температура нагрева. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов от номинального тока и определены погрешности расчетного метода оценки сопротивлений контактов. Разработанные зависимости могут быть использованы для определения эквивалентного сопротивления сетей внутривоздушного электроснабжения при оценке уровня потерь электроэнергии, что повысит достоверность полученных результатов.

Для цитирования

Петров А. Р. и др. 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>.

Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks

Almaz R. Petrov*, Elena I. Gracheva, S. Valtchev

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: petroval13@mail.ru

Article info

Received
28.08.2023;

accepted
14.09.2023

Key words:

electrical
devices,
contact resistance,
contact heating,
approximating functions,
power losses

Abstract

The study of technical parameters of low-voltage switching devices of Russian production – magnetic starters PML and switches RE19 has been carried out. The problem of evaluating energy efficiency of operation of magnetic starters and switches installed in in-plant power supply systems has been presented. The main destabilizing factors significantly affecting the technical characteristics of switching devices with voltage up to 1 kV have been given. Reliability of functioning of the investigated devices, first of all, depends on the degree of wear of switching contacts. The dependences of the heating temperature of the contact areas of switching devices on the loading coefficient have been studied. It has been revealed that with the increase of loading of devices in the range from 1,0 to $2,0I_{nom}$ the temperature of contacts and contact areas is within the permissible limits in accordance with the requirements of GOST 403-73. The main factors influencing the resistance of contact connections – current flowing through the contacts, their dimensions and heating temperature – have been shown. According to the results of theoretical and experimental studies approximating functions of dependences of resistance of contacts and contact connections of switching devices on rated current have been developed and errors of the calculated method of contact resistance estimation have been determined. The developed dependencies can be used to determine the equivalent resistance of networks of in-plant power supply when estimating the level of power losses, which will increase the reliability of the results obtained.

For citation

Petrov, A. R. et al. 2023. Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 384–394. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>.

Введение

Низковольтные коммутационные аппараты (НКА) являются важнейшей частью всех электрифицированных объектов промышленного назначения (Аполлонский и др., 2016). Поэтому к качеству функциональных характеристик НКА предъявляют высокие требования. НКА подвергаются одновременно одному или нескольким воздействующим факторам в процессе эксплуатации, хранения и транспортировки. Отдельные из этих факторов – как внутренние, так и внешние – можно рассматривать в качестве дестабилизирующих. Совокупность таких воздействий ведет к снижению параметров надежности, уменьшению механической прочности, ложным срабатываниям и, в конечном счете, может привести к отказу аппарата. Уровень надежности НКА в основном зависит от скорости износа коммутационных контактов (Садыков, 2017; Gheorghita et al., 2017). Факторы, определяющие скорость износа контактных соединений и дальнейший возможный отказ аппарата, представлены на рис. 1.

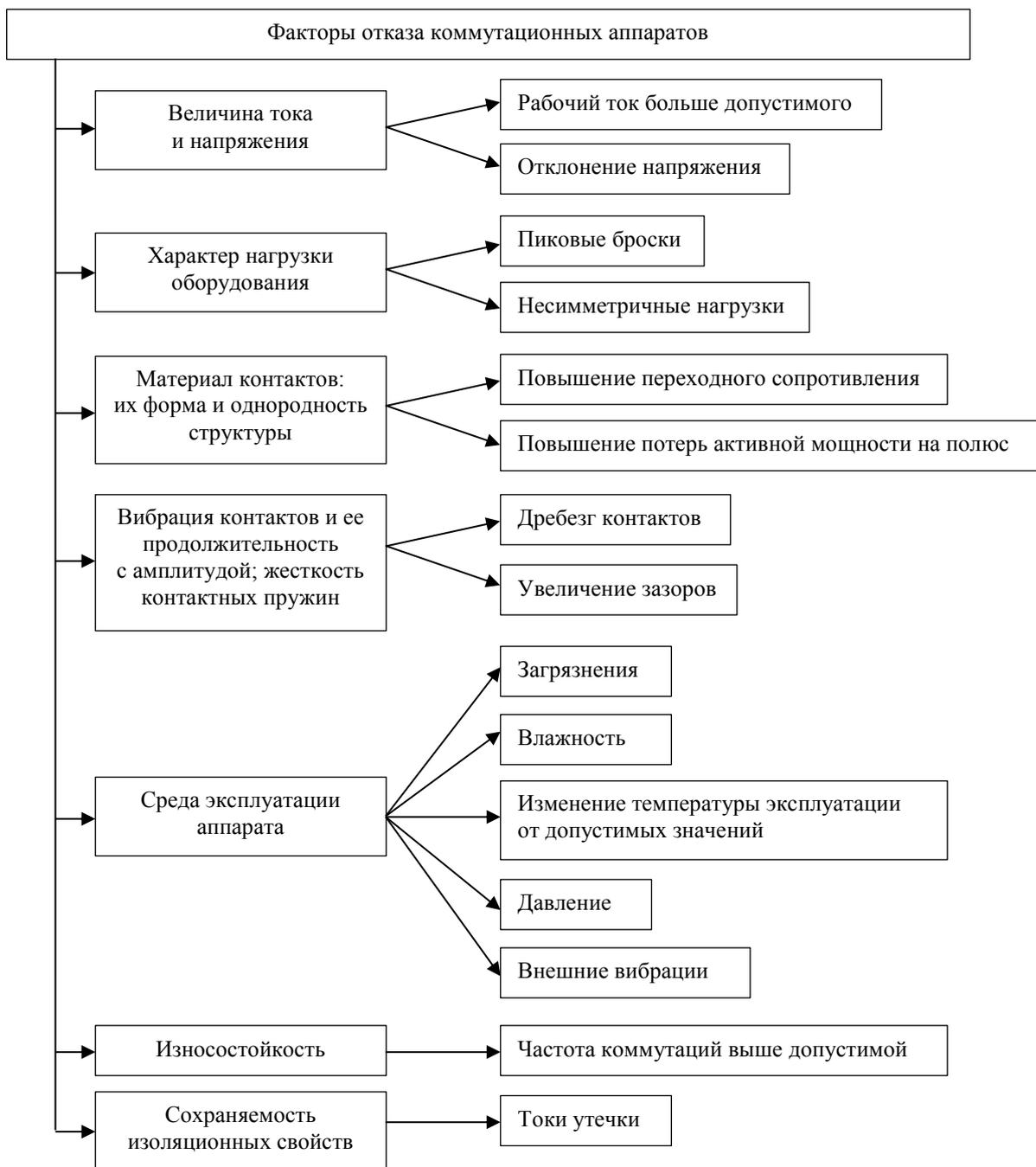


Рис. 1. Факторы отказа низковольтных коммутационных аппаратов
Fig. 1. Failure factors of low-voltage switching devices

Одним из основных критериев износа контактов для большинства контактных соединений является величина провала контактов. Другим важным фактором, влияющим на износ контактов и контактных соединений НКА, является дуга, возникающая при цикле включение – отключение (Егоров и др., 2019; Shin et al., 2018; Ruempler et al., 2014). Процессы, происходящие при возникновении дуги, вызывают плавление и испарение материала контакта (Shin et al., 2017). Степень износа контактов НКА в процессе коммутации зависит от значения тока, протекающего через аппарат, материала контактов, а также конструктивных и массогабаритных особенностей аппарата (Hadziefendic et al., 2019; Lyuminarskaja et al., 2018).

В процессе эксплуатации аппарата не должно быть недопустимого перегрева аппарата в целом и его отдельных элементов, это требование необходимо соблюдать на протяжении всего срока службы НКА. Как известно, контактное сопротивление НКА представляет собой дополнительный источник потерь (Andrușcă et al., 2016; Deac et al., 2019). Допустимые превышения температур контактов НКА определяются условиями эксплуатации и зависят от температуры окружающей среды, давления, режима работы и применяемых материалов (Calin et al., 2020; Derevyankin et al., 2020). Нагрев контактных соединений НКА происходит под воздействием различных источников тепла, интенсивность которых меняется в зависимости от режима работы и нагрузки аппарата (Егоров и др., 2018; Gonzalez et al., 2018). Различные части и узлы НКА при протекании тока нагреваются неравномерно, поэтому температура контактных соединений обычно выше, чем температура прилегающих к нему проводников.

Целью работы является исследование и оценка величины сопротивлений контактных соединений НКА экспериментальным и расчетным методами. Полученные результаты исследования позволят в дальнейшем определять значения потерь электроэнергии в сетях напряжением до 1 кВ с высокой достоверностью.

Материалы и методы

Как показывает практика, учет сопротивлений НКА позволяет повысить точность определения потерь в низковольтных сетях электроснабжения и определить проблемные участки сети с точки зрения энергоэффективности (Абдуллазянов и др., 2022; Грачева и др., 2019). Неучет таких параметров сети как температура нагрева проводников, температура окружающей среды и сопротивления НКА приводит к существенным погрешностям при определении потерь электроэнергии в сетях до 1 кВ (Абдуллазянов и др., 2021; Грачева и др., 2018).

Для эффективного функционирования НКА мощность, потребляемая аппаратом при его эксплуатации и рассеиваемая в нем, должна быть минимальной (Шагидуллин, 2017). Поэтому вопрос исследования потерь в НКА является актуальной задачей для достоверного моделирования основных технических характеристик низковольтных сетей (Петров и др., 2023; Ye et al., 2023; Kim et al., 2019).

Анализ большинства паспортных и каталожных данных НКА показывает, что в них не приводятся все основные технические характеристики. Не представлены значения сопротивлений большей части элементов НКА, так, например, нет данных о сопротивлениях силовых цепей и контактов аппаратов. При этом, как показывают исследования статистических данных отказов магнитных пускателей, наиболее слабыми элементами аппарата являются его силовые контакты (Буторин и др., 2019). Данные, которые содержатся в каталогах, как правило, носят приближенный характер, в связи с чем возникает необходимость исследования законов изменения сопротивлений контактных соединений НКА.

В табл. 1 представлены основные каталожные данные магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19, выпускаемых Курским электроаппаратным заводом (КЭАЗ).

Таблица 1. Основные каталожные характеристики коммутационных аппаратов

Table 1. Main catalog characteristics of switching devices

Тип аппарата	Номинальный ток $I_{ном}$, А	Коммутационная износостойкость, циклов	Механическая износостойкость, циклов	Потери мощности ΔP , Вт	Стоимость, руб.
Магнитный пускатель ПМЛ (КЭАЗ)	6–63	$1 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	0,2–4,2	1 195–5 280
	80–95	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	5,1–7,2	7 950
Рубильник РЕ19 (КЭАЗ)	100	нет данных	$25 \cdot 10^3$	1,4	9 662
	250–630	нет данных	$10 \cdot 10^3$	5,4–26,2	11 575–17 938

Проведем оценку сопротивлений контактных соединений аппаратов в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки по выражению

$$R_{к.расч.} = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot F \cdot k_T \cdot S}}{I^2} \cdot \left(\theta_{к} - \frac{I^2 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \nu_{к})}{F \cdot k_T \cdot S} \right), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность материала контакта, для меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К); F – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м² ($F = 2 \cdot (a + b) \cdot 10^{-3}$ – прямоугольное сечение; $F = 2\pi r \cdot 10^{-3}$ – цилиндрическая поверхность); k_T – коэффициент теплоотдачи, для меди $k_T = 16$ Вт/(м²·К); S – площадь поперечного сечения контактов, м² ($S = a \cdot b$ – прямоугольное сечение; $S = \pi r^2$ – цилиндрическая поверхность); I – ток, проходящий через контакты, А; υ_K – температура контактных площадок, °С; $\theta_K = 45^\circ\text{C}$ – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha = 0,0043$.

Определим установившееся значение температуры контакта из условия равенства между выделенной в контакте и отводимой с его поверхности тепловыми мощностями

$$\upsilon_K = \frac{I^2 \cdot \rho + \upsilon_0 \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \quad (2)$$

где υ_0 – температура окружающей среды, $\upsilon_0 = 35$ °С.

По выражению (1) для магнитного пускателя ПМЛ с $I_{\text{ном}} = 40$ А, коэффициент загрузки $K_{зг} = 1$, сопротивление контактных соединений $R_{\text{кс.расч.мп}}$

$$R_{\text{кс.расч.мп}} = \frac{2 \cdot \sqrt{390 \cdot 2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}}}{40^2} \times \left(45 - \frac{40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 35,9)}{2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}} \right) = 6,34 \text{ мОм},$$

где υ_K по (2):

$$\upsilon_K = \frac{40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6} - 40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 35,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов сопротивлений контактных соединений и температуры контактных площадок для исследуемых аппаратов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета технических характеристик коммутационных аппаратов
Table 2. Results of calculation of technical characteristics of switching devices

Тип аппарата	Ток $I_{\text{ном}}$, А	Размеры контактов, мм	Температура контактных площадок υ_K , °С	Сопротивление контактных соединений, $R_{\text{кс.расч.}}$, мОм
Магнитный пускатель ПМЛ	25	$r = 4$	35,6	12,6
	40	$a = 8,1$ $b = 8,1$	35,9	6,34
	63	$a = 12$ $b = 12$	35,7	4,35
Рубильник РЕ19	100	$a = 10$ $b = 16$	36,5	1,98
	250	$a = 20$ $b = 20$	37,4	0,61
	400	$a = 25$ $b = 25$	38,2	0,32
	630	$a = 35$ $b = 35$	37,8	0,22

На рис. 2 представлены графические зависимости температуры контактных площадок υ_K от коэффициента загрузки $K_{зг}$ для магнитного пускателя марки ПМЛ с номинальным током 25 А и 40 А.

Графические зависимости (рис. 2) показывают, что температура контактных площадок магнитных пускателей с номинальным током 25 А и 40 А увеличивается незначительно: при коэффициенте загрузки аппарата $K_{згмп} = 0,5$ температура $\upsilon_{\text{кмп}} = 35$ °С, при перегрузке аппаратов – $K_{згмп} = 2,0$ температура $\upsilon_{\text{кмп}}$ повышается до 38 °С. В расчетном выражении увеличения температуры υ_K не учитывается влияние элементов установленного в цепи аппарата оборудования. Также в расчете не учитывается длительность протекания тока перегрузки.

Аналогичные зависимости представлены для рубильников РЕ19 (рис. 3).

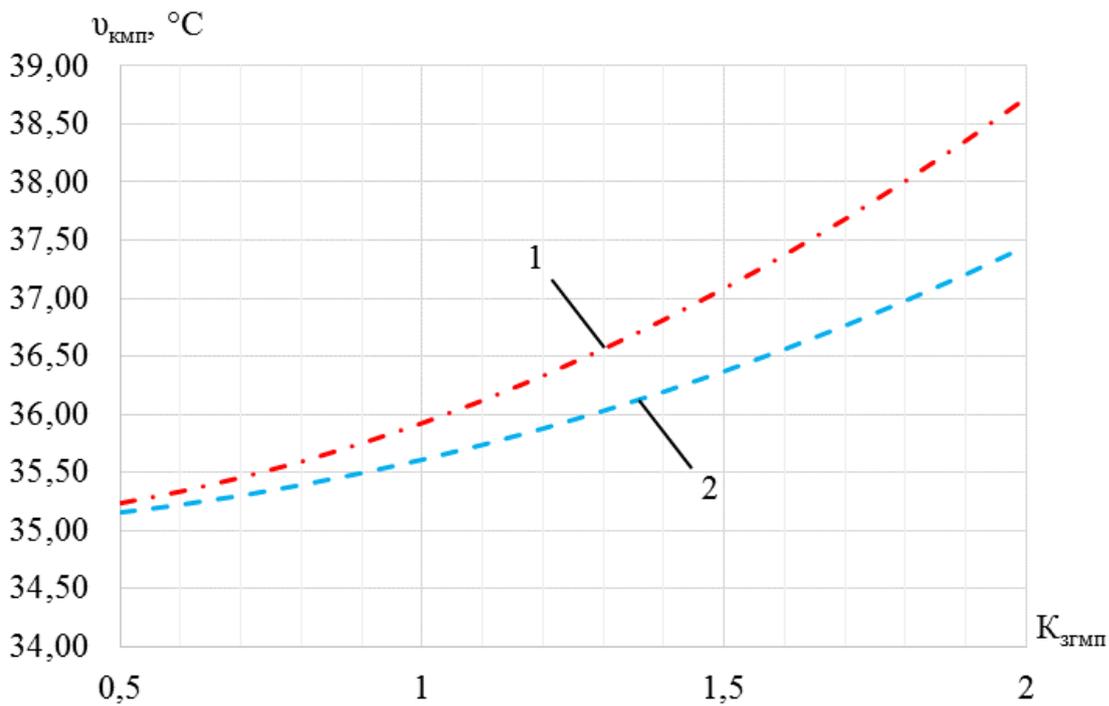


Рис. 2. Графики зависимостей температуры контактных площадок от коэффициента загрузки для магнитного пускателя ПМЛ: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 25$ А

Fig. 2. Graphs of dependences of contact area temperature on the loading factor for the magnetic starter PML: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 25$ А

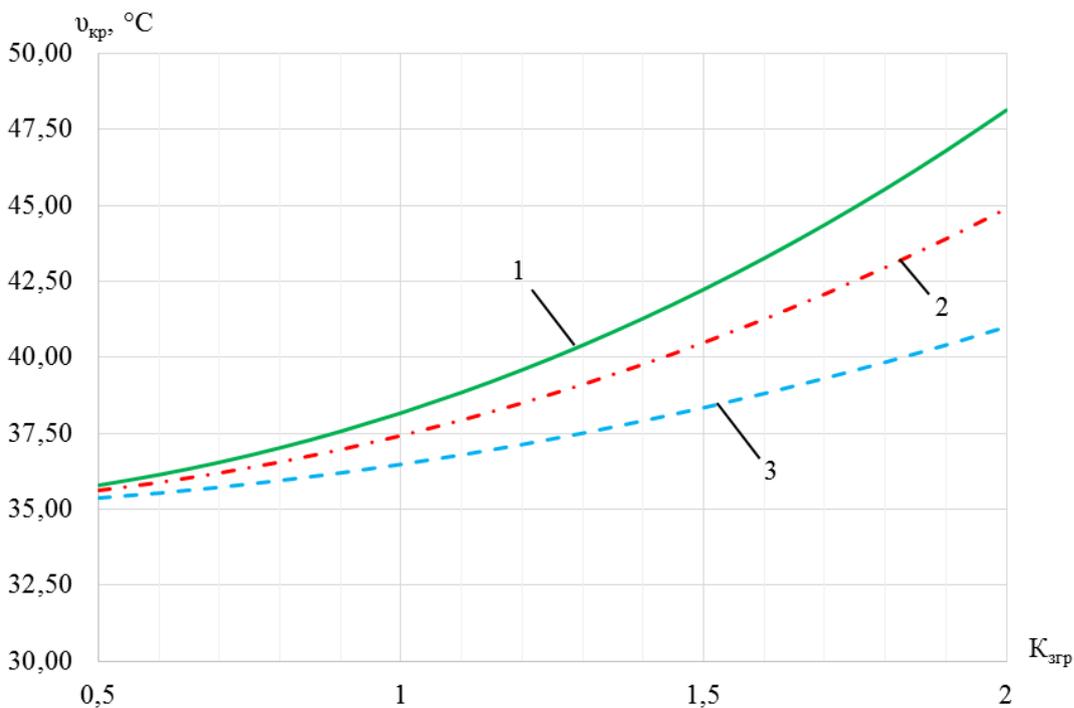


Рис. 3. Графики зависимостей температуры контактных площадок от коэффициента загрузки для рубильника РЕ19: 1 – $I_{ном} = 400$ А; 2 – $I_{ном} = 250$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А

Fig. 3. Graphs of dependences of contact area temperature on the loading factor for the switch RE19: 1 – $I_{ном} = 400$ А; 2 – $I_{ном} = 250$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А

Графические зависимости (рис. 3) показывают, что для рубильника РЕ19 на номинальный ток 100 А температура контактных площадок $\upsilon_{кр}$ повышается с 36,5 °С при номинальном значении до 41 °С при двукратной перегрузке током аппарата. При номинальном токе 250 А и коэффициенте загрузки рубильника $K_{згр} = 0,5$ температура $\upsilon_{кр}$ составила 35,6 °С, при загрузке $K_{згр} = 2,0$ температура повышается до 45 °С. Расчет температуры $\upsilon_{кр}$ для рубильника на номинальный ток 400 А показал, что при увеличении загрузки с $K_{згр} = 1,0$ до $K_{згр} = 2,0$ значение температуры увеличивается с 38,2 до 48 °С.

Полученные значения температуры нагрева контактных площадок удовлетворяют требованиям ГОСТ 403-73¹. Максимально допустимая температура контактных соединений из меди для магнитных пускателей и рубильников не должна превышать 95 °С, а допустимое превышение температуры контактов НКА при температуре окружающей среды 40 °С составляет 55 °С.

В результате экспериментальных исследований выявлены зависимости сопротивлений контактов НКА от номинального тока (табл. 3). Погрешность полученных аппроксимирующих функций не превышает 5 % (Грачева и др., 2021).

Таблица 3. Зависимости сопротивлений контактов коммутационных аппаратов от номинального тока
 Table 3. Dependence of contact resistance of switching devices on rated current

Тип аппарата	Номинальный ток, $I_{ном}$	Аппроксимирующая функция
Магнитный пускатель	$I_{ном} < 70$ А	$R_{кc.эксп.мп} = \frac{825}{I_{ном}}$
	$I_{ном} \geq 70$ А	$R_{кc.эксп.мп} = \frac{760}{I_{ном}}$
Рубильник	для любых $I_{ном}$	$R_{кc.эксп.р} = \frac{68}{I_{ном}}$

Используя данные исследований, проведем сравнительный анализ графических зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока, полученных экспериментально и расчетным способом для рассматриваемых магнитных пускателей и рубильников (рис. 4, 5).

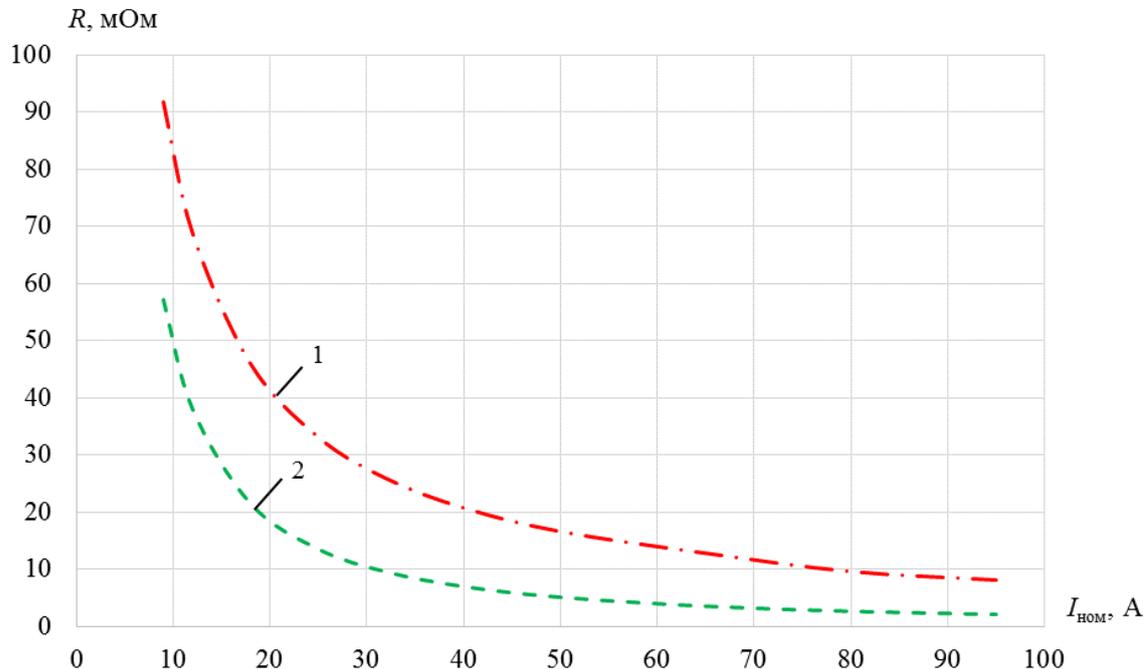


Рис. 4. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для магнитных пускателей ПМЛ: 1 – экспериментальные данные $R_{кc.эксп.мп}$; 2 – расчетные значения $R_{кc.расч.мп}$

Fig. 4. Graphs of contact resistance dependences on rated current for PML magnetic starters:
 1 – experimental data $R_{cc.exp.ms}$; 2 – calculated values $R_{cc.calcul.ms}$

¹ ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов. М., 2003.

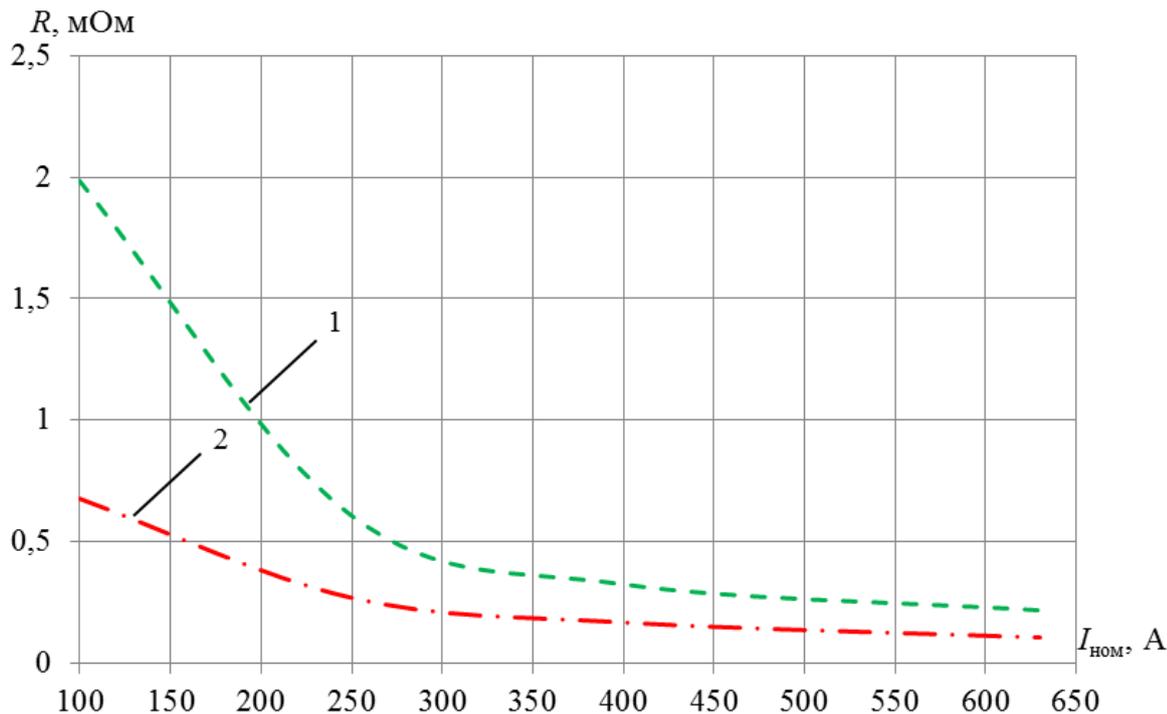


Рис. 5. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для рубильников РЕ19: 1 – расчетные значения $R_{к.расч.р}$; 2 – экспериментальные данные $R_{к.эксп.р}$

Fig. 5. Graphs of contact resistance dependences on rated current for switches RE19: 1 – calculated values $R_{cc.calcul.s}$; 2 – experimental data $R_{cc.exp.s}$

Оценим погрешность результатов расчетного метода относительно экспериментально полученных данных

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{R_{к.расч.и} - R_{к.эксп.и}}{R_{к.эксп.и}} \right) \cdot 100 \% \right], \quad (3)$$

где n – количество измерений.

Для магнитных пускателей марки ПМЛ погрешность

$$\delta = \frac{1}{14} \left[\left(\frac{101,3 - 141,8}{141,8} \right) + \dots + \left(\frac{2,04 - 8,28}{8,28} \right) \right] \cdot 100 \% = -57,55 \%$$

Для рубильников марки РЕ19 погрешность

$$\delta = \frac{1}{12} \left[\left(\frac{1,912 - 0,68}{0,68} \right) + \dots + \left(\frac{0,203 - 0,108}{0,108} \right) \right] \cdot 100 \% = 118,94 \%$$

Проведенные исследования и графические зависимости (рис. 4, 5) показывают, что расчетный и экспериментальный способы определения сопротивлений контактных соединений магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19 имеют значительное различие в полученных результатах. При этом наиболее достоверным является экспериментальный метод определения сопротивлений контактных соединений. Для магнитных пускателей погрешность расчетного метода составляет $-57,55 \%$, для рубильников средняя погрешность – $118,94 \%$. Поэтому расчетный метод не может быть рекомендован для достоверных оценок технических параметров исследуемых аппаратов.

Зависимости изменения сопротивления контактов и контактных соединений могут быть рекомендованы для прогнозирования технического состояния электрооборудования внутризаводского электроснабжения и уточнения величины потерь электроэнергии в низковольтных сетях.

Заключение

В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости оценки температуры контактных площадок магнитных пускателей и рубильников от значения коэффициента загрузки аппарата. Разработаны модели расчетных и экспериментальных зависимостей сопротивлений контактных соединений

магнитных пускателей и рубильников от величины номинального тока. Аппроксимирующие функции (табл. 4) позволяют оценивать значения сопротивлений контактов и контактных соединений НКА.

Таблица 4. Аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов от номинального тока

Table 4. Approximating functions of dependences of resistance of contacts and contact connections of switching devices on rated current

Тип аппарата	Номинальный ток $I_{ном}$, А	Аппроксимирующая функция
Магнитный пускатель ПМЛ	6–630	$R_{кc.расч.мп} = 1276,2 \cdot I_{ном}^{-1,414}$
		$R_{кc.эксп.мп} = 894,51 \cdot I_{ном}^{-1,028}$
Рубильник РЕ19	100–1 600	$R_{кc.расч.р} = 521,9 \cdot I_{ном}^{-1,218}$
		$R_{кc.эксп.р} = \frac{68}{I_{ном}}$

Выявлены функциональные закономерности изменения значений сопротивлений НКА. Разработанные зависимости могут быть использованы для вычисления значений эквивалентных сопротивлений внутрицеховых сетей электроснабжения при определении величины потерь электроэнергии. Уточнение значений потерь в цеховых сетях позволяет наиболее эффективно планировать мероприятия по энергосбережению, а также осуществлять контроль за техническим состоянием электрооборудования.

На основании проведенных исследований технических характеристик магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях, предлагается принимать параметр сопротивления контактов и контактных соединений как один из критериев энергоэффективности НКА. Предлагаемый критерий рекомендуется для выбора наиболее эффективных в эксплуатации типов электрооборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Альзаккар А., Низамиев М. Ф. [и др.]. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 6. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. EDN: DYCRLP.
- 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. EDN: TVQQNU.
- Аполлонский С. М., Куклев Ю. В. Низковольтные электрические аппараты // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 251–260. EDN: VXLDQP.
- Буторин В. А., Царев И. Б., Банин Р. В., Шарпилов А. Ю. Время первой проверки состояния контактов магнитного пускателя // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 2(30). С. 58–60. EDN: XIVECH.
- Грачева Е. И., Горлов А. Н., Алимова А. Н., Муханова П. П. Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>. EDN: KPMROA.
- Грачева Е. И., Шакурова З. М., Абдуллазянов Р. Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5. С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>. EDN: NTJFZF.
- Грачева Е.И., Алимова А. Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 11–12. С. 81–92. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92>. EDN: YXRTVR.
- Егоров Е. Г., Егоров Г. Е., Луия Н. Ю. Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 78–86. EDN: JSGLUV.
- Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю., Афанасьев А. В. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15. EDN: UTZVLZ.

- Петров А. Р., Грачева Е. И. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2(186). С. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-186-126-133>. EDN: SHFUKK.
- 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.
- Шагидуллин А. В. Эффективность замены низковольтных коммутационных аппаратов на примере промышленного предприятия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 3–4. С. 89–95. EDN: ZBTJAF.
- Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
- Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
- Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
- Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
- Gheorghîță C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
- Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
- Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
- Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
- Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
- Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
- Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
- Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
- Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Alzakkar, A., Nizamiev, M. F. et al. 2022. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 24(6), pp. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. EDN: DYCRLP. (In Russ.)
- 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. EDN: TVQQNU. (In Russ.)

- Apollonsky, S. M., Kuklev, Y. V. 2016. Low-voltage electrical apparatus. *Journal of Mining Institute*, 218, pp. 251–260. EDN: VXLDQP. (In Russ.)
- Butorin, V. A., Tsarev, I. B., Banin, R. V., Sharpilov, A. Yu. 2019. Time of first check of condition contact magnetic pusher. *Vestnik Kurganskoi GSKhA*, 2(30), pp. 58–60. EDN: XIVECH. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Gorlov, A. N., Alimova, A. N., Mukhanova, P. N. 2021. Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws. *Vestnik of MSTU*, 24(4), pp. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>. EDN: KPMROA. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Shakurova, Z. M., Abdullazyanov, R. E. 2019. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 21(5), pp. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>. EDN: NTJFZF. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Alimova, A. N. 2018. Possible errors of calculations of losses of the electric power on shop industrial networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 20(11–12), pp. 81–92. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92>. EDN: YXRTVR. (In Russ.)
- Egorov, E. G., Egorov, G. E., Luiya, N. Yu. 2019. Features of measurement of recoverable electrical strength in low-voltage ac contactors. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 3, pp. 78–86. EDN: JSGLUV. (In Russ.)
- Egorov, E. G., Ivanova, S. P., Luiya, N. Yu., Afanasiev, A. V. 2018. Investigation of the breaking capacity of the automatic circuit-breakers in the short-circuit mode. *Russian Electrical Engineering*, 8, pp. 12–15. EDN: UTZVLZ. (In Russ.)
- Petrov, A. R., Gracheva, E. I. 2023. Modeling of power losses in contact systems of low-voltage switching devices. *Omsk Scientific Bulletin*, 2(186), pp. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-186-126-133>. EDN: SHFUKK. (In Russ.)
- Sadykov, R. R. 2017. Evaluation of reliability of low voltage commercial networks of industrial power supply. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(5–6), pp. 98–108. EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Shagidullin, A. V. 2017. The effectiveness of the replacement low-voltage switching devices on the example of industrial enterprise. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(3–4), pp. 89–95. EDN: ZBTJAF. (In Russ.)
- Andrușcă, M., Adam, M., Burlica, R., Munteanu, A. et al. 2016. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. Iasi, Romania, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
- Călin, M. D., Helerea, E. 2020. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips. *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. Bucharest, Romania, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
- Deac, C. N., Adam, M., Andrușcă, M., Dragomir, A. 2019. Aspects regarding contact resistance measurement. *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Cluj, Romania, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
- Derevyankin, P. G., Frolov, V. Ya., Gorchakov, S. L. 2020. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, pp. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
- Gheorghiuță, C. M., Adam, M., Andrușcă, M., Munteanu, A. et al. 2017. About contact resistance of the electrical equipment. *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Romania, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
- Gonzalez, D., Hopfeld, M., Berger, F., Schaaf, P. 2018. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 8(6), pp. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
- Hadziefendic, N., Kostic, N., Trifunovic, J., Kostic, M. 2019. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(1), pp. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
- Kim, K., Joo, H. W., Bae, C. Y., Choi, J. et al. 2019. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker. *5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Kitakyushu, Japan, pp. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
- Lyuminarskaja, E. S., Lyuminarsky, I. E. 2018. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
- Ruempler, C., Zacharias, A., Stammberger, H. 2014. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion. *The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014)*. Dresden, Germany, pp. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.

- Shin, D., Golosnoy, I. O., Bull, T. G., McBride, J. W. 2017. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices. *4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Xi'an, China, pp. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
- Shin, D., McBride, J. W., Golosnoy, I. O. 2018. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Albuquerque, NM, USA, pp. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
- Ye, Z., Liu, S., Zhao, S. 2023. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation. *IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Changchun, China, pp. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

Сведения об авторах

Петров Алмаз Радикович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант; e-mail: petroval13@mail.ru

Almaz R. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, PhD Student; e-mail: petroval13@mail.ru

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>

Станимир Валтчев – Лиссабон, Португалия; Университет NOVA в Лиссабоне, профессор;
e-mail: ssv@fct.unl.pt

S. Valtchev – Lisbon, Portugal; University NOVA of Lisbon, Professor; e-mail: ssv@fct.unl.pt

УДК 621.311

Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения

Р. М. Петрова*, Е. И. Грачева, S. Valtchev, Н. К. Мифтахова

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

Информация о статье

Поступила
в редакцию
29.08.2023;

получена
после доработки
27.09.2023;

принята к публикации
03.10.2023

Ключевые слова:

схема внутрицехового
электроснабжения,
системы распределения
электроэнергии,
электрические аппараты,
кабельные линии,
методы оценки
надежности

Реферат

Научно-исследовательская деятельность в области развития электроэнергетического и электротехнического оборудования включает разработку новых подходов к оценке показателей надежности элементов электрооборудования и в целом систем внутрицехового электроснабжения. В ходе исследования рассмотрены методы оценки надежности работы электрооборудования в системах внутрицехового электроснабжения на примере участка цеховой сети, включающей ее основные элементы: силовой трансформатор, кабельные линии низкого напряжения, распределительные пункты, автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, рубильники. Параметры надежности схемы рассчитаны относительно распределительного шкафа силового ШРС и распределительного пункта силового ПРС; относительно каждого присоединения ШРС и ПРС. Рассматриваемые методы рекомендуется использовать для уточнения периодичности и сроков проведения технического обслуживания и ремонтов электрооборудования системы внутрицехового электроснабжения, а также для анализа надежности работы и выявления наименее надежных участков схем сетей. Представленный расчет с использованием логико-вероятностного метода с помощью построения дерева отказов целесообразно применять для оценки частоты потери питания ШРС и ПРС, а также отдельных присоединений. Для исследуемых схем построены графические зависимости вероятности безотказной работы электрооборудования и появления отказа во времени.

Для цитирования

Петрова Р. М. и др. 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>.

Methods for assessing the reliability of in-shop power supply

Renata M. Petrova*, Elena I. Gracheva, S. Valtchev, Naila K. Miftakhova

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

Article info

Received
29.08.2023;

received
in revised
27.09.2023;

accepted
03.10.2023

Key words:

scheme of in-shop
power supply,
power
distribution systems,
electrical apparatuses,
cable lines,
reliability assessment
methods

Abstract

Research activities in the field of development of electrical power and electrical equipment include the development of new approaches to assessing the reliability indicators of electrical equipment elements and in-house power supply systems in general. The study has examined methods for assessing the reliability of electrical equipment in intra-shop power supply systems using the example of a workshop network section, including its main elements: power transformer, low-voltage cable lines, distribution points, circuit breakers, magnetic starters, contactors, switches. The reliability parameters of the circuit are calculated relative to the distribution cabinet of the power (DCp) and the distribution point of the power (DPP); regarding each connection of DCp and DPP. The methods under consideration are recommended to be used to clarify the frequency and timing of maintenance and repairs of electrical equipment of the in-shop power supply system, as well as to analyze the reliability of operation and identify the least reliable sections of network diagrams. The presented calculation using the logical-probabilistic method by constructing a fault tree is advisable to use to estimate the frequency of power loss of DCp and DPP, as well as individual connections. For the studied circuits, graphical dependences of the probability of failure-free operation of electrical equipment and the occurrence of a failure over time have been constructed.

For citation

Petrova, R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

Введение

Современные промышленные предприятия характеризуются динамичностью технологического процесса, обусловленной введением различных методов обработки, нового оборудования, переналадкой производства в связи с непрерывным усовершенствованием выпускаемой продукции. С развитием новых типов оборудования актуализируется проблема определения основных показателей надежности и эффективности функционирования оборудования систем внутрицехового электроснабжения (Petrov et al., 2020).

Оценка надежности электрооборудования и электрических сетей систем электроснабжения потребителей представлена в статье (Виноградов и др., 2015). Данная оценка включает определение причин повреждений воздушных и кабельных линий 0,38 кВ и 6–10 кВ, трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и распределительных пунктов; установление основных показателей надежности (частоты отказов и времени восстановления оборудования); оценку ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям; сравнение статистических параметров надежности рассматриваемых электрических сетей с данными литературных источников. В статье представлены основные мероприятия по повышению надежности электроснабжения потребителей за счет снижения количества отказов электрооборудования.

В работе (Грачева и др., 2018) приведен алгоритм установления законов распределения вероятностных характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов на примере контакторов серии ПМЛ (Курский электроаппаратный завод, КЭАЗ, г. Курск) на основании случайных выборок при проведении наблюдений за отказами аппаратов в одинаковых эксплуатационных условиях ряда промышленных предприятий г. Казани. Имитационная модель, выполненная в программе Matlab-Simulink, позволяет рассчитывать фиксированные интенсивности отказов аппаратов по случайным выборкам.

В исследовании (Грачева и др., 2019а) приведен алгоритм оценки параметров надежности (вероятности работоспособного состояния низковольтных аппаратов во времени) на основании статистических данных об отказах автоматических выключателей, установленных в цепях управления и защиты потребителей промышленных предприятий; рассмотрены теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы автоматических выключателей в зависимости от срока службы и режимов эксплуатации. Вид распределения параметров надежности низковольтных аппаратов определен на примере автоматических выключателей ВА-57; получены аналитические и графические зависимости основных показателей надежности.

Работа (Грачева и др., 2019б) посвящена исследованию надежности функционирования системы внутрицехового электроснабжения на основе распределительного шкафа и распределительного пункта производственного предприятия с использованием аналитического и статического методов расчета.

Авторами статьи (Зацетина и др., 2020) рассматривается проблема надежности систем электроснабжения. По результатам анализа для построения систем автоматики предложен ряд математических выражений, позволяющих на стадии проектирования провести оценку отказоустойчивости системы электроснабжения при выбранных устройствах защиты, тем самым упростить процесс выбора наиболее предпочтительной системы, основываясь на полученных показателях.

Алгоритм и методика оценки показателей надежности при технико-экономическом сравнении вариантов схем промышленного электроснабжения предложены в работе (Конюхова, 2018). Автором определены зависимости времени наработки на отказ схемы электроснабжения от номинальной мощности трансформаторов двухтрансформаторных подстанций при наличии и отсутствии резервирования на распределительном устройстве низкого напряжения.

Исследование, проведенное учеными (Петрова и др., 2023; Gracheva et al., 2023), включало: 1) установление законов изменения вероятностных характеристик надежности низковольтного электрооборудования (силовых трансформаторов, автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов) на основании статистических данных эксплуатации; 2) проверку на соответствие вероятностных характеристик электрооборудования нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова; 3) определение видов функций изменения основных параметров надежности электрооборудования с указанием соответствующих графических зависимостей; 4) сравнение полученных результатов значений вероятности безотказной работы с требованиями ГОСТа¹.

Статья (Садыков, 2017) посвящена разработке методики оценки показателей надежности функционирования системы внутрицехового электроснабжения на примере радиальных схем. При анализе статистических данных моделировалось изменение вероятности времени безотказной работы распределительных устройств в зависимости от количества присоединений нагрузки с применением коэффициента отношения вероятности присоединений.

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

Результаты исследования надежности систем электроснабжения, полученные в работе (Секретарев и др., 2022), должны учитываться на этапах планирования, проектирования и строительства. На основе статистической информации об отказах авторами рассчитаны результирующие параметры надежности и вероятности безотказной работы для исследуемых схем; разработана и реализована имитационная модель для моделирования текущего технического состояния электрооборудования.

В статьях (Шпиганович и др., 2018; Shpigianovich et al., 2021) проанализированы внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность электрооборудования систем электроснабжения в процессе эксплуатации (превышение влажности воздуха; агрессивность сред, пыли; неблагоприятные атмосферные явления; механические и электрические нагрузки и т. д.), и показаны изменения основных свойств материалов электроустановок в зависимости от воздействия различных факторов.

В настоящее время в связи с динамичностью технологических процессов на современных промышленных предприятиях требуются новые подходы к оценке показателей надежности элементов электрооборудования и систем внутрицехового электроснабжения в целом. Цель настоящего исследования заключается в оценке и анализе основных характеристик надежности электрооборудования низковольтных цеховых сетей.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись системы внутризаводского электроснабжения. На рис. 1 показана схема участка цеховой сети, для которой рассчитаны параметры надежности. Система состоит из высоконадежных элементов, т. е. время безотказной работы превышает время восстановления электроустановки, а отказ более двух независимых элементов – событие маловероятное.

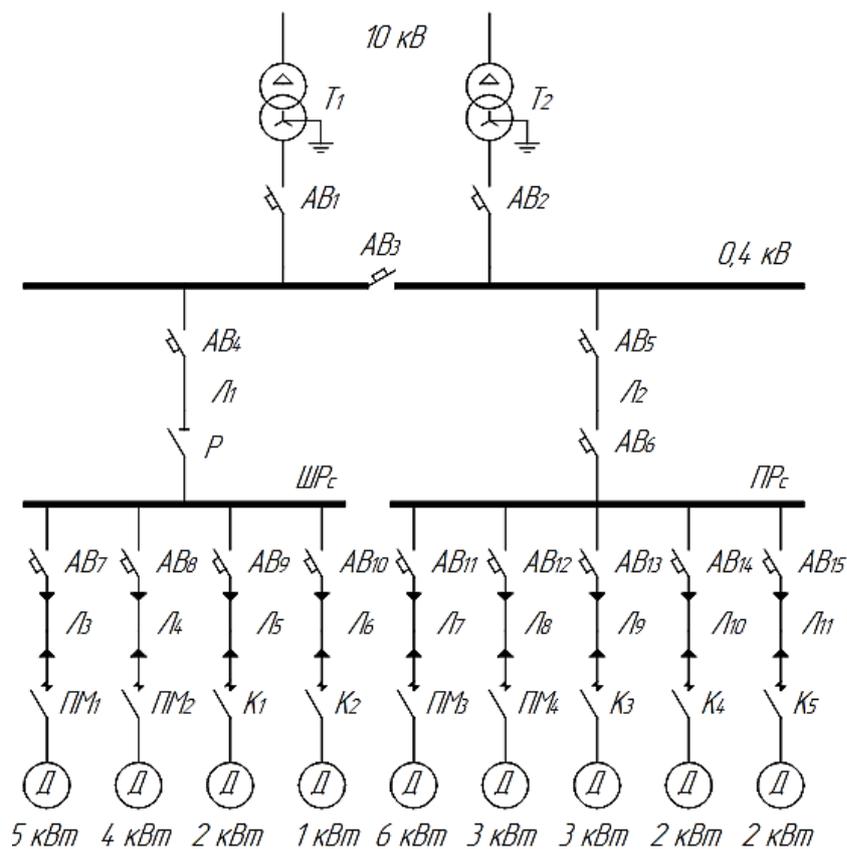


Рис. 1. Схема системы внутризаводского электроснабжения

Fig. 1. Scheme of the in-plant power supply system

Представим описание схемы (рис. 1) и исходные данные:

- длина линий: $L_1 = 10$ м, $L_2 = 10$ м, $L_3 = 5$ м, $L_4 = 5$ м, $L_5 = 5$ м, $L_6 = 5$ м, $L_7 = 5$ м, $L_8 = 5$ м, $L_9 = 5$ м, $L_{10} = 5$ м, $L_{11} = 5$ м;
- трансформаторы: T_1 – ТМ-1600/10/0,4; T_2 – ТМ-1600/10/0,4;
- автоматические выключатели AB_1, AB_2, AB_3 -секционный, $AB_4, AB_5, AB_6, AB_7, AB_8, AB_9, AB_{10}, AB_{11}, AB_{12}, AB_{13}, AB_{14}, AB_{15}$;
- рубильник Р;

– шкаф распределительный силовой ШРС;
 – пункт распределительный силовой ПРС;
 – магнитные пускатели ПМ₁, ПМ₂, ПМ₃, ПМ₄;
 – контакторы К₁, К₂, К₃, К₄, К₅;
 – нагрузка: Д₁ = 5 кВт, Д₂ = 4 кВт, Д₃ = 2 кВт, Д₄ = 1 кВт, Д₅ = 6 кВт, Д₆ = 3 кВт, Д₇ = 3 кВт, Д₈ = 2 кВт,
 Д₉ = 2 кВт;
 – время наблюдения $t = 6$ лет;
 – минимально допустимый уровень надежности для коммутационных низковольтных аппаратов согласно ГОСТ 12434-83 $R_{\text{доп}} = 0,85^2$.

Рассчитаем параметры надежности схемы (рис. 1), используя следующие методы:

- 1) относительно распределительного шкафа ШРС и распределительного пункта ПРС;
- 2) относительно каждого присоединения ШРС и ПРС;
- 3) логико-вероятностный метод.

Справочные и каталожные данные электротехнической продукции отечественных заводов-изготовителей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета оценки интенсивности отказов по элементам схемы
 Table 1. Results of calculation of failure rate estimation by circuit elements

Элемент схемы	Марка; завод- изготовитель	Интенсивность отказов λ , откл./год	Элемент схемы	Марка; завод- изготовитель	Интенсивность отказов λ , откл./год	Интенсивность отказов расчетная λ^* , откл./год
T ₁	ТМ-1600/10/0,4; "Элтехком" ³ , (г. Нижний Новгород)	0,015	L ₁	АВВГ-0,4 кВ сечением S = 4–16 мм, "Эксперт-кабель" ⁴ (гг. Орел, Москва, Екатеринбург)	0,026	0,0026*
T ₂		0,015	L ₂		0,026	0,0026*
АВ ₁	ВА51-39, КЭАЗ ⁵	0,051	L ₃		0,026	0,0013*
АВ ₂		0,051	L ₄		0,026	0,0013*
АВ ₃		0,051	L ₅		0,026	0,0013*
АВ ₄		0,051	L ₆		0,026	0,0013*
АВ ₅		0,051	L ₇		0,026	0,0013*
АВ ₆		0,051	L ₈		0,026	0,0013*
АВ ₇		0,051	L ₉		0,026	0,0013*
АВ ₈	ВА51-35, КЭАЗ	0,051	L ₁₀		0,026	0,0013*
АВ ₉		0,051	L ₁₁		0,026	0,0013*
АВ ₁₀		0,051	ПМ ₁	0,095	–	
АВ ₁₁		0,051	ПМ ₂	0,095	–	
АВ ₁₂		0,051	ПМ ₃	0,095	–	
АВ ₁₃		0,051	ПМ ₄	0,095	–	
АВ ₁₄		КЭАЗ	0,051	К ₁	0,098	–
АВ ₁₅			0,051	К ₂	0,098	–
Р	РЕ19-37, КЭАЗ	0,038	К ₃	КТ-6000, КЭАЗ	0,098	–
ШРС	ШРС-1, "Абсолют- энерго" ⁶ (г. Пермь)	0,001	К ₄		0,098	–
ПРС	ПР-11, "Абсолют- энерго"	0,001	К ₅		0,098	–

² ГОСТ 12434-83. Межгосударственный стандарт. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия. Введен 01.01.1985. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200012546>.

³ Каталог продукции компании "Элтехком". URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/> (Дата обращения: 20.09.2023.).

⁴ Каталог кабельно-проводниковой продукции "Эксперт-кабель". URL: <https://expert-cable.ru/catalog/> (Дата обращения: 20.09.2023.).

⁵ Каталог электротехнической продукции КЭАЗ. URL: <https://keaz.ru/catalog> (Дата обращения: 10.08.2023.).

⁶ Каталог электротехнической продукции ООО "Абсолют-энерго". URL: <https://absolutnrg.ru/catalog/elektrochit/nickovol.html> (Дата обращения: 20.09.2023.).

Интенсивность отказов кабельной линии АВВГ-0,4 кВ зависит от ее длины и рассчитывается исходя из 100 м:

- для Л₁, Л₂: $\lambda^* = 0,026 \cdot (10 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0026 \text{ откл./год}$;
- для Л₃... Л₁₁: $\lambda^* = 0,026 \cdot (5 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0013 \text{ откл./год}$.

Составим структурную схему надежности участка цеховой сети (рис. 2).

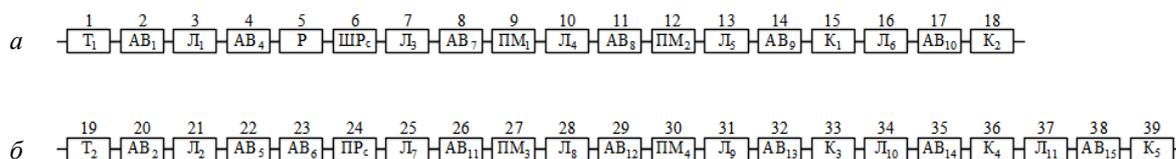


Рис. 2. Структурная схема надежности относительно ШРс (а) и ПРс (б)
Fig. 2. Reliability structure diagram with respect to a) SHRs, б) PRs

Результаты и обсуждение

Интенсивность отказов схемы системы внутризаводского электроснабжения определяется суммой интенсивностей отказов каждого элемента (*Конюхова и др., 2001*):

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n + \lambda_{л1} + \lambda_{л2} + \lambda_{л3} + \dots + \lambda_{лm}, \quad (1)$$

где λ_c – интенсивность отказов схемы; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ – интенсивности отказов элементов схемы; $\lambda_{л1}, \lambda_{л2}, \lambda_{л3}, \dots, \lambda_{лm}$ – интенсивности отказов кабельных линий.

Метод расчета относительно ШРс и ПРс

Интенсивность отказов схемы вычислим следующим образом:

– относительно ШРс:

$$\begin{aligned} \lambda_{C1} &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л3} + \lambda_{AB7} + \lambda_{ПМ1} + \\ &+ \lambda_{Л4} + \lambda_{AB8} + \lambda_{ПМ2} + \lambda_{Л5} + \lambda_{AB9} + \lambda_{K1} + \lambda_{Л6} + \lambda_{AB10} + \lambda_{K2} = \\ &= \lambda_T + 6\lambda_{AB} + 5\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + 2\lambda_{ПМ} + 2\lambda_K; \end{aligned}$$

– относительно ПРс:

$$\begin{aligned} \lambda_{C2} &= \lambda_{T2} + \lambda_{AB2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{AB5} + \lambda_{AB6} + \lambda_{ПРс} + \lambda_{Л7} + \lambda_{AB11} + \lambda_{ПМ3} + \\ &+ \lambda_{Л8} + \lambda_{AB12} + \lambda_{ПМ4} + \lambda_{Л9} + \lambda_{AB13} + \lambda_{K3} + \lambda_{Л10} + \lambda_{AB14} + \lambda_{K4} + \\ &+ \lambda_{Л11} + \lambda_{AB15} + \lambda_{K5} = \lambda_T + 8\lambda_{AB} + \lambda_{ПРс} + 6\lambda_{Л} + 2\lambda_{ПМ} + 3\lambda_K. \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены интенсивности отказов структурных схем относительно ШРс и ПРс.

Таблица 2. Данные для расчета параметров надежности схемы относительно ШРс и ПРс
Table 2. Data for calculating the scheme reliability parameters with respect to DCp and DPp

Схема относительно ШРс			Схема относительно ПРс		
Номер элемента схемы	Элемент схемы	Интенсивность отказов λ , откл./год	Номер элемента схемы	Элемент схемы	Интенсивность отказов λ , откл./год
1	T ₁	0,015	19	T ₂	0,015
2	AB ₁	0,051	20	AB ₂	0,051
3	Л ₁	0,0026	21	Л ₂	0,0026
4	AB ₄	0,051	22	AB ₅	0,051
5	P	0,038	23	AB ₆	0,051
6	ШРс	0,001	24	ПРс	0,001
7	Л ₃	0,0013	25	Л ₇	0,0013
8	AB ₇	0,051	26	AB ₁₁	0,051
9	ПМ ₁	0,095	27	ПМ ₃	0,095
10	Л ₄	0,0013	28	Л ₈	0,0013
11	AB ₈	0,051	29	AB ₁₂	0,051
12	ПМ ₂	0,095	30	ПМ ₄	0,095
13	Л ₅	0,0013	31	Л ₉	0,0013
14	AB ₉	0,051	32	AB ₁₃	0,051
15	K ₁	0,098	33	K ₃	0,098

16	Л ₆	0,0013	34	Л ₁₀	0,0013
17	АВ ₁₀	0,051	35	АВ ₁₄	0,051
18	К ₂	0,098	36	К ₄	0,098
Сумма интенсивностей λ _{с1}	0,7538		37	Л ₁₁	0,0013
			38	АВ ₁₅	0,051
			39	К ₅	0,098
			Сумма интенсивностей λ _{с2}		0,9171

Для определения изменения значений функций вероятности безотказной работы и вероятности отказа во времени применим метод "свертки":

– для схемы относительно ШРс:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{с1}t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{18})t}, \quad (2)$$

$$Q_1(t) = 1 - e^{-\lambda_{с1}t} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{18})t}, \quad (3)$$

где $P_1(t)$ – вероятность безотказной работы во времени; $Q_1(t)$ – вероятность появления отказа; $\lambda_{с1}$ – сумма интенсивностей отказов схемы относительно ШРс; t – время наблюдения, равное 6 годам;

– для схемы относительно ПРс за первый год эксплуатации:

$$P_1(t=1) = e^{-0,7538 \cdot 1} = 0,471,$$

$$Q_1(t=1) = 1 - e^{-0,7538 \cdot 1} = 1 - 0,471 = 0,529.$$

Расчет относительно ПРс произведем аналогично по выражениям (2)–(3). Результаты расчетов параметров надежности на заданном интервале эксплуатации по годам представлены в табл. 3.

Таблица 3. Прогнозирование показателей надежности схем относительно ШРс и ПРс на период 6 лет

Table 3. Forecasting of schemes' reliability indicators in relation to DCp and DPr for the period of 6 years

Схема относительно ШРс	Σλ	Год эксплуатации схемы					
		1	2	3	4	5	6
Вероятность безотказной работы в течение времени $P_1(t)$	0,7538	0,471	0,221	0,104	0,049	0,023	0,011
Вероятность появления отказа $Q_1(t)$		0,529	0,779	0,896	0,951	0,977	0,989
Схема относительно ПРс	Σλ	Год эксплуатации схемы					
		1	2	3	4	5	6
Вероятность безотказной работы в течение времени $P_2(t)$	0,9171	0,400	0,160	0,064	0,026	0,010	0,004
Вероятность появления отказа $Q_2(t)$		0,600	0,840	0,936	0,974	0,990	0,996

Оценим периодичность технического обслуживания (ТО) в соответствии с условием

$$P(t) = P_{\text{доп}} \quad (4)$$

Данные, указанные в табл. 3, свидетельствуют о том, что критерий (4) нарушается в первый год эксплуатации, тогда

$$P_{\text{доп}} > P(1),$$

для схемы относительно ШРс: $0,85 > 0,471$,

для схемы относительно ПРс: $0,85 > 0,400$.

Поэтому $t_{\text{доп}} = 1$ и ТО должно быть ежегодным, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 30852.16-2002 о проведении ТО не реже одного раза в течение 12 месяцев⁷.

По данным табл. 3 построим графики изменения функции вероятности безотказной работы и вероятности появления отказа во времени для схем относительно ШРс и ПРс (рис. 3).

На рис. 3 вероятности безотказной работы и появления отказа во времени для схемы относительно ШРс обозначены $P_1(t)$, $Q_1(t)$; для схемы относительно ПРс – $P_2(t)$, $Q_2(t)$.

Графики показывают (рис. 3), что вероятности времени безотказной работы для схем относительно ШРс и ПРс отличаются в первый год эксплуатации на 17,75 %, во второй – на 38,13 %, в третий – на 62,5 % (что объясняется снижением уровня надежности схемы) и начиная с четвертого года практически равны нулю. Исследуемые характеристики соответствуют экспоненциальному закону распределения параметров надежности.

⁷ ГОСТ 30852.16-2002 (МЭК 60079-17:1996). Межгосударственный стандарт. Электрооборудование взрывозащищенное. Введен 15.02.2014. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200103399>.

Данный метод оценки параметров рекомендуется применять для уточнения периодичности технического обслуживания и ремонта электрооборудования в системе внутривзаводского электроснабжения (Ivanova et al., 2022; Gasparyan et al., 2018; Shenggang et al., 2019).

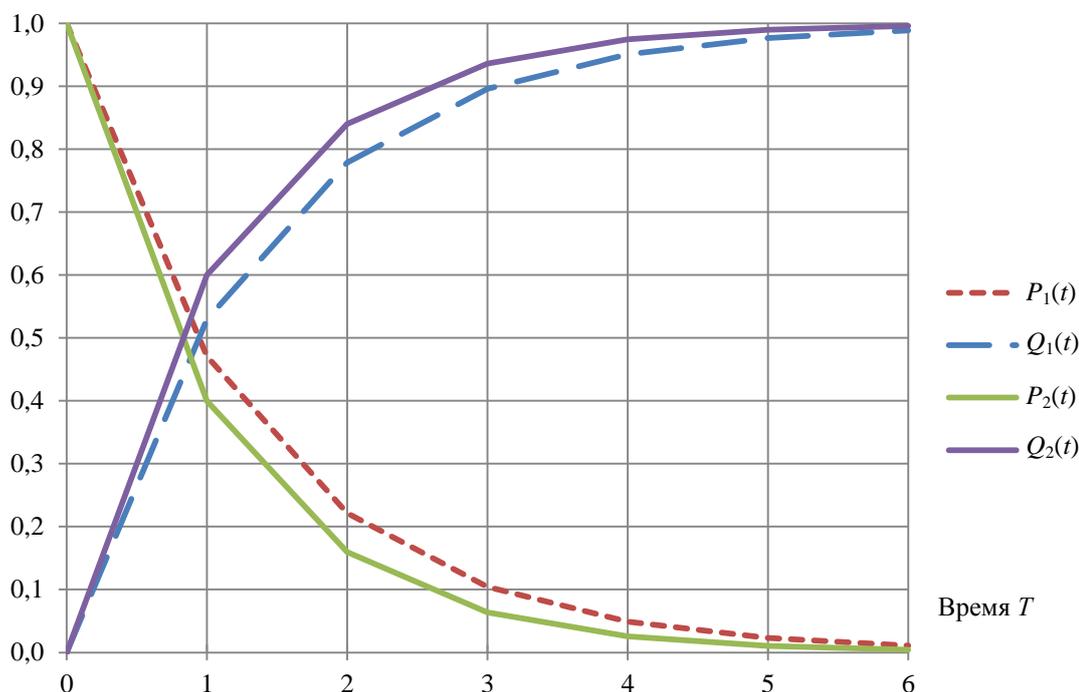


Рис. 3. Графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени
 Fig. 3. Graphs of changing functions of failure-free operation probability and failure occurrence in time

Метод расчета относительно каждого присоединения ШПрс и ППрс

Рассмотрим метод оценки параметров надежности схем относительно каждого присоединения ШПрс и ППрс.

На рис. 4 показаны расчетные схемы надежности относительно каждого присоединения ШПрс.

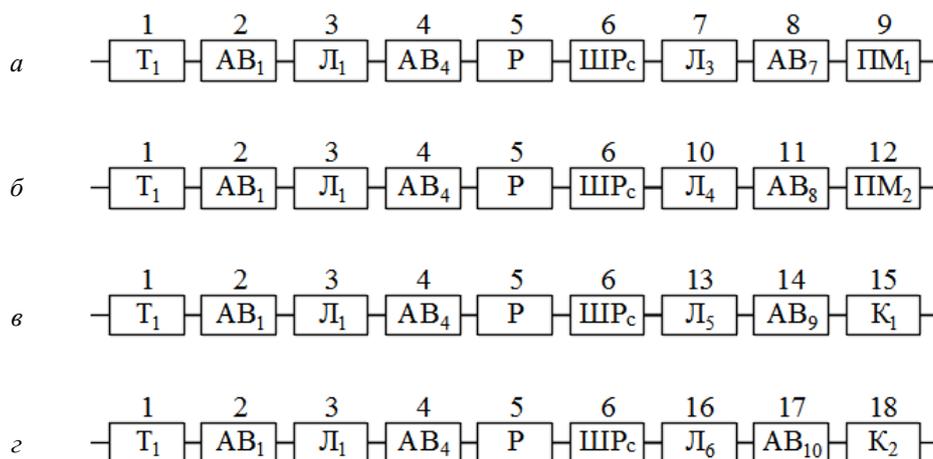


Рис. 4. Расчетные схемы надежности относительно первого (а), второго (б), третьего (в), четвертого (г) присоединений ШПрс

Fig. 4. Calculated reliability diagrams for (a) the first, (б) the second, (в) the third, and (г) the fourth connections of DCp

Рассчитаем интенсивности отказов схемы относительно каждого присоединения, используя данные табл. 1:

– для первого присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л3} + \lambda_{AB7} + \lambda_{ПМ1} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{ПМ} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,095 = 0,354; \end{aligned}$$

– второго присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л4} + \lambda_{AB8} + \lambda_{ПМ2} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{ПМ} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,095 = 0,354; \end{aligned}$$

– третьего присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л5} + \lambda_{AB9} + \lambda_{К1} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{К} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,098 = 0,357; \end{aligned}$$

– четвертого присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л6} + \lambda_{AB10} + \lambda_{К2} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{К} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,098 = 0,357. \end{aligned}$$

Рассчитаем вероятности безотказной работы и появления отказа во времени:

$$P_{1,2}(t=1) = e^{-\lambda t} = e^{-0,354 \cdot 1} = 0,702,$$

$$Q_{1,2}(t=1) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,354 \cdot 1} = 0,298.$$

Расчетные схемы надежности относительно каждого присоединения ПРс представлены на рис. 5.

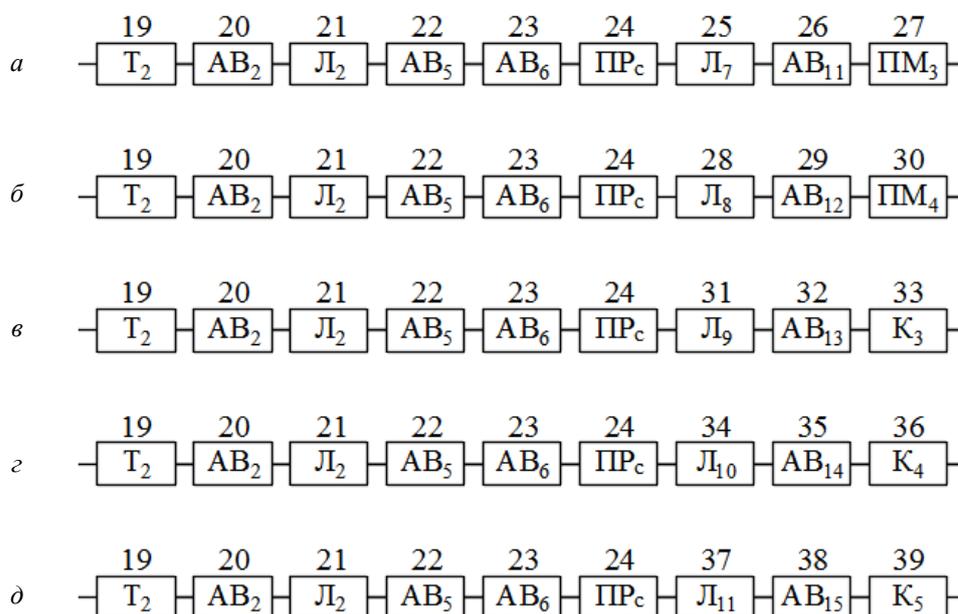


Рис. 5. Расчетные схемы надежности относительно пятого (а), шестого (б), седьмого (в), восьмого (г) и девятого (д) присоединений ПРс

Fig. 5. Calculated reliability diagrams for (a) the fifth, (б) the sixth, (в) the seventh, (г) the eighth, and (д) the ninth connections of DPp

Интенсивности отказов относительно каждого присоединения ПРс рассчитываются аналогично. Результаты расчетов схем относительно каждого присоединения ШРс и ПРс показаны в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчетов параметров схем относительно каждого присоединения ШРс и ПРс
Table 4. Results of calculations of circuit parameters with respect to each connection of DCp and DPp

Номер присоединения	Присоединение относительно	Интенсивность отказов, откл./год	–	Год					
				1	2	3	4	5	6
1, 2	ШРс	0,354	$P_{1,2}(t)$	0,702	0,493	0,346	0,243	0,170	0,120
			$Q_{1,2}(t)$	0,298	0,507	0,654	0,757	0,830	0,880
3, 4		0,357	$P_{3,4}(t)$	0,700	0,490	0,343	0,240	0,168	0,117
			$Q_{3,4}(t)$	0,300	0,510	0,657	0,760	0,832	0,883
Номер присоединения	Присоединение относительно	Интенсивность отказов, откл./год	–	Год					
5, 6	ПРс	0,367	$P_{5,6}(t)$	0,693	0,480	0,333	0,230	0,160	0,111
			$Q_{5,6}(t)$	0,307	0,520	0,667	0,770	0,840	0,889
7, 8, 9		0,37	$P_{7,8,9}(t)$	0,691	0,477	0,330	0,228	0,157	0,109
			$Q_{7,8,9}(t)$	0,309	0,523	0,670	0,772	0,843	0,891

На рис. 6 показаны графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени относительно каждого присоединения ШРс и ПРс.

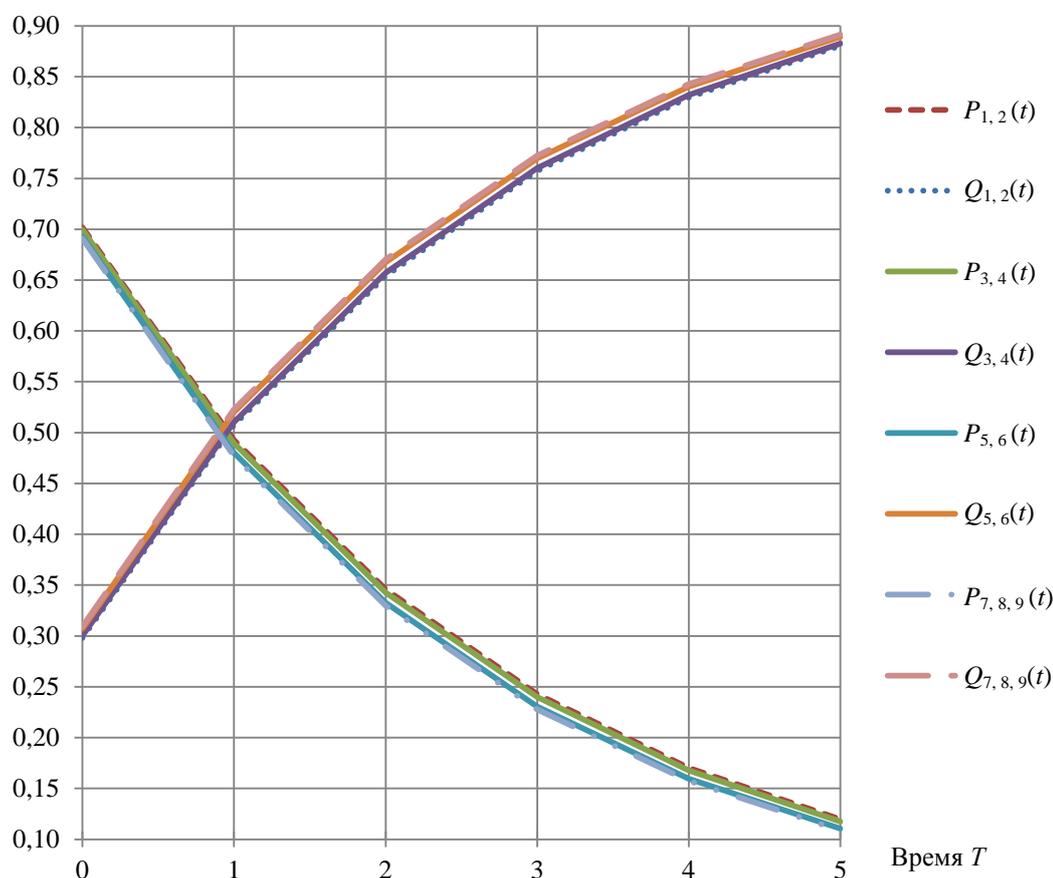


Рис. 6. Графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени относительно каждого присоединения ШРс и ПРс
Fig. 6. Graphs of change of functions of failure-free operation probability and occurrence of failure in time with respect to each connection of DCp and DPp

На основании результатов исследований (табл. 4, рис. 6) установлено, что функции вероятности безотказной работы и появления отказа во времени подчиняются экспоненциальному закону распределения параметров. Данный метод рекомендуется для оценки надежности схемы относительно каждого присоединения.

Логико-вероятностный метод расчета

Для расчетной схемы (рис. 1) определим частоту отключений первой и второй секций шин, построив дерево отказов относительно источников питания ШРС и ПРС и относительно каждого присоединения по отдельности (на примере первого и пятого присоединений) (рис. 7–10).

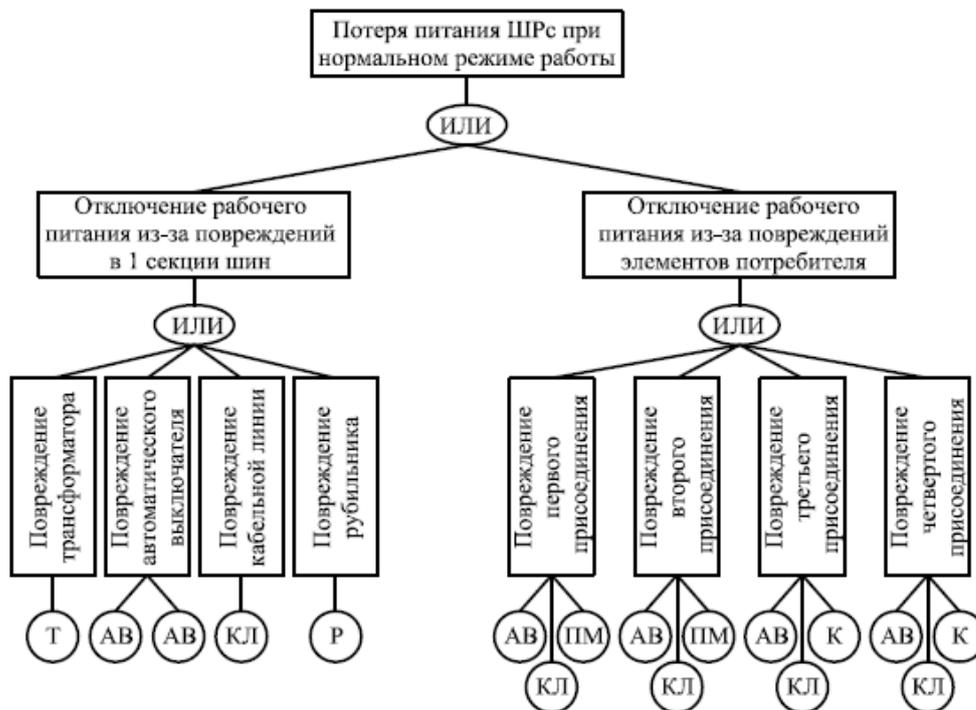


Рис. 7. Дерево отказов для оценки частоты потери питания ШРС
 Fig. 7. Failure tree for estimating the frequency of power loss of DCp

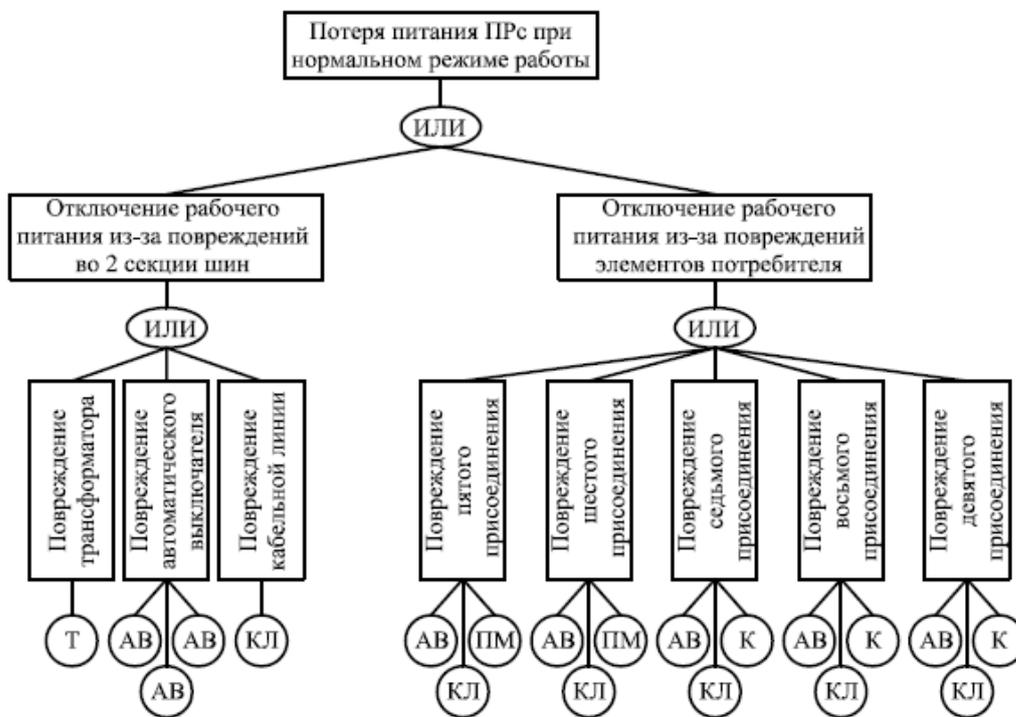


Рис. 8. Дерево отказов для оценки частоты потери питания ПРС
 Fig. 8. Failure tree for estimating the frequency of power loss of DPr

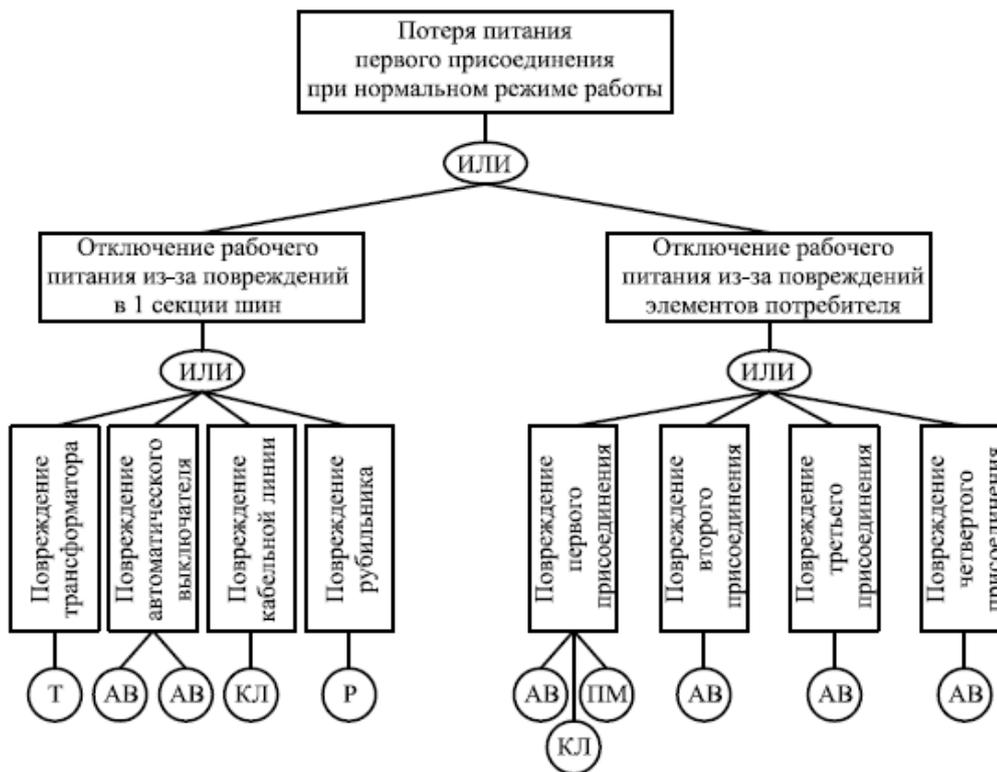


Рис. 9. Дерево отказов для оценки частоты потери питания первого присоединения ШРс
 Fig. 9. Failure tree for estimating the frequency of loss of power supply to the first bay of DCp

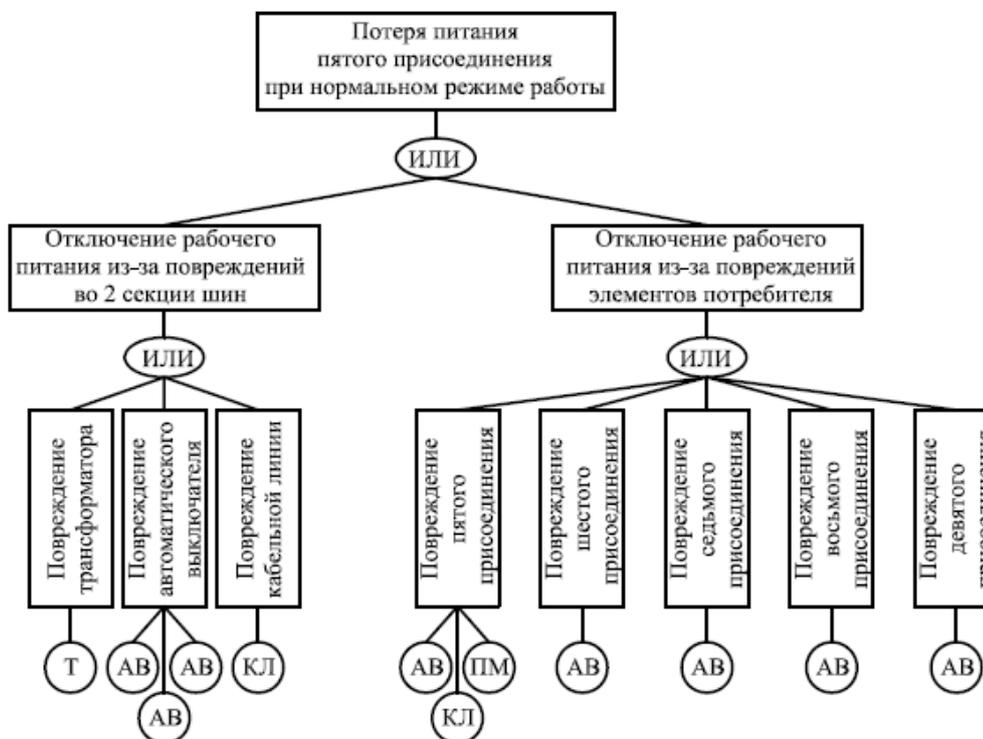


Рис. 10. Дерево отказов для оценки частоты потери питания пятого присоединения ПРс
 Fig. 10. Failure tree for estimating the frequency of power loss of the fifth bay of DPp

Найдем функцию отказа при потере питания ШРс (рис. 7):

$$\begin{aligned} X(\text{ШРс}) &= [T + AB + AB + KЛ + P] + \left[\begin{array}{l} (AB + KЛ + ПМ) + (AB + KЛ + ПМ) + \\ + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) \end{array} \right] = \\ &= T + 2AB + KЛ + P + 2(AB + KЛ + ПМ) + 2(AB + KЛ + K) = \\ &= T + 6AB + 5KЛ + P + 2ПМ + 2K = \\ &= 0,015 + 6 \cdot 0,051 + 5 \cdot 0,026 + 0,038 + 2 \cdot 0,095 + 3 \cdot 0,098 = 0,973. \end{aligned}$$

Функцию отказа при потере питания ПРс (рис. 8) определим так:

$$\begin{aligned} X(\text{ПРс}) &= [T + AB + AB + AB + KЛ] + \left[\begin{array}{l} (AB + KЛ + ПМ) + (AB + KЛ + ПМ) + \\ + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) \end{array} \right] = \\ &= T + 3AB + KЛ + 2(AB + KЛ + ПМ) + 3(AB + KЛ + K) = \\ &= T + 8AB + 6KЛ + 2ПМ + 3K = \\ &= 0,015 + 8 \cdot 0,051 + 6 \cdot 0,026 + 2 \cdot 0,095 + 3 \cdot 0,098 = 1,063. \end{aligned}$$

Рассчитаем функцию отказа при потере питания первого присоединения ШРс (рис. 9):

$$\begin{aligned} X(1) &= [T + AB + AB + KЛ + P] + [(AB + KЛ + ПМ) + AB + AB + AB] = \\ &= T + 2AB + KЛ + P + AB + KЛ + ПМ + 3AB = \\ &= T + 6AB + 2KЛ + P + ПМ = \\ &= 0,015 + 6 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,095 = 0,506. \end{aligned}$$

Определим функцию отказа при потере питания пятого присоединения ПРс (рис. 10):

$$\begin{aligned} X(5) &= [T + AB + AB + AB + KЛ] + [(AB + KЛ + ПМ) + AB + AB + AB + AB] = \\ &= T + 3AB + KЛ + AB + KЛ + ПМ + 4AB = \\ &= T + 8AB + 2KЛ + ПМ = \\ &= 0,015 + 8 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,095 = 0,57. \end{aligned}$$

Сравним полученные значения результатов расчета функций отказа при потере питания ШРс и ПРс логико-вероятностным методом с результатами, полученными при использовании метода расчета относительно каждого присоединения распределительного шкафа и распределительного пункта.

Метод расчета относительно ШРс и ПРс предполагаем эталонным вариантом расчета, т. е. при его применении погрешность составляет 0 %.

Оценим погрешность полученных результатов по формуле

$$\delta = \left(\frac{X_{\text{расч}} - X_{\text{эталон}}}{X_{\text{эталон}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $X_{\text{расч}}$ – проверяемое значение; $X_{\text{эталон}}$ – эталонное значение.

При использовании логико-вероятностного метода:

1) погрешность относительно ШРс составляет

$$\delta = \frac{0,973 - 0,7538}{0,7538} \cdot 100 \% = 29,07 \%;$$

2) погрешность относительно ПРс равна

$$\delta = \frac{1,063 - 0,9171}{0,9171} \cdot 100 \% = 15,91 \%.$$

Таким образом, логико-вероятностный метод является менее достоверным, так как при его использовании возможно получение завышенных значений интенсивности отказов λ и результатов расчетов погрешности (на 29 и 16 % относительно ШРс и ПРс соответственно).

Заключение

В результате проведенных исследований выполнен анализ основных характеристик надежности низковольтного электрооборудования. Рассмотренные методы анализа могут быть использованы для оценки надежности схемы низковольтной сети.

Метод расчета относительно ШРс и ПРс рекомендуется применять для уточнения периодичности и сроков проведения ТО и ремонтов электрооборудования в системе внутризаводского электроснабжения.

Метод расчета относительно присоединений ШРс и ПРс целесообразно применять для анализа надежности участков схемы сети.

Результаты расчетов параметров надежности схемы при использовании логико-вероятностного метода (дерево отказов) могут применяться для оценки частоты потери питания как ШРс и ПРс, так и каждого присоединения в отдельности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Виноградов А. В., Перьков Р. А. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей // Вестник НГИЭИ. 2015. № 12(55). С. 12–21. EDN: VNJVXX.
- Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Абдуллазянов Р. Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019а. Т. 21, № 1–2. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18>. EDN: WCWLKE.
- Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Алимова А. Н. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019б. Т. 11, № 1(41). С. 3–9. EDN: HVYFHO.
- 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). С. 27–33. EDN: QUERVT.
- Зацепина В. И., Астанин С. С. Анализ надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости релейной защиты // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 4. С. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD.
- Конюхова Е. А. Исследование и анализ надежности схем при сравнении вариантов систем промышленного электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 66–76. EDN: FQSCHV.
- Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергопрогресс : Энергетик, 2001. 91 с. (Библиотечка электротехника ; Вып. 12(36)).
- 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. DOI: [10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108). EDN: ZIXFIF.
- Секретарев Ю. А., Горшунов А. А., Меняйкин Д. А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. Т. 18, № 3(69). С. 3–14. DOI: https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3. EDN: YFYEFB.
- Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Зацепин Е. П. К анализу безотказности электрических систем промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 59–63. EDN: YTEJZR.
- 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/gpecom58364.2023.10175821>.
- Ivanova S. P., Pestrjaev 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>.
- Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020). 2020. Vol. 178. Article number: 01016. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801016>.
- Shenggang X., Jin L., Jiale L., Rushan C. Research on reliability and working life assessment method of mechanical and electrical products in weapon equipment // 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRs), Rome, Italy, 2019. P. 364–368. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsrs48664.2019.8987718>.
- 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

- Vinogradov, A. V., Perkov, R. A. 2015. Analysis of electrical equipment damageability of electrical networks and justification of measures to improve the reliability of power supply to consumers. *Bulletin NGIEI*, 12(55), pp. 12–21. EDN: VHJBXX. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Abdullazianov, R. E. 2019a. Investigation of reliability parameters of low-voltage switching devices according to operational data of industrial enterprises. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 21(1–2), pp. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18>. EDN: WCWLKE. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Alimova, A. N. 2019b. Reliability and component of low-voltage displaying devices of internal electrical supply. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 11(1(41)), pp. 3–9. EDN: HVYFHO. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Shakurova, Z. M. 2018. Information parametric characteristics of the reliability of low-voltage switching devices of industrial complexes. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 3(39), pp. 27–33. 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. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 26(4), pp. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A. 2018. Research and analysis of the reliability of schemes when comparing options of industrial electrical supply systems with double-transformator substations. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 4(40), pp. 66–76. EDN: FQSCHV. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A., Kireeva, E. A. 2001. Reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Abdullazyanov, E. Yu., Grachieva, E. I., Valtchev, S. et al. 2023. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo 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. DOI: [10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108). EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Secretarev, Yu. A., Gorshunov, A. A., Menyaykin, D. A. 2022. Modeling of the technical state of the equipment of the power supply systems of the mono-consumers taking into account the circuit reliability. *Vesti Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Chernozem'ya*, 18(3(69)), pp. 3–14. DOI: https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3. EDN: YFYEFB. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Shpiganovich, A. A., Zatsepin, E. P. 2018. To the analysis of the failure-free operation of the electrical systems of the industrial enterprises. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 12, pp. 59–63. EDN: YTEJZR. (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/gpecom58364.2023.10175821>.
- 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>.
- Petrov, T. I., Safin, A. R. 2020. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020). Vol. 178. Article number: 01016. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801016>.
- Shenggang, X., Jin, L., Jiale, L., Rushan, C. 2019. Research on reliability and working life assessment method of mechanical and electrical products in weapon equipment. 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Rome, Italy, pp. 364–368. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsrs48664.2019.8987718>.
- 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, PhD 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>

Валтчев Станимир – Лиссабон, Португалия; Университет NOVA в Лиссабоне, профессор;
e-mail: ssv@fct.unl.pt

Stanimir Valtchev – Lisbon, Portugal; University NOVA of Lisbon, Professor; e-mail: ssv@fct.unl.pt

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

УДК 629.1

Моделирование работы устройства индукционного зарядного для мобильной установки заряда электротранспорта

А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Д. Ю. Лямзина, Т. И. Петров*, В. Р. Басенко

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;

e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.09.2023;

получена
после доработки
02.11.2023;

принята
к публикации
09.11.2023

Ключевые слова:

беспроводная передача
энергии,
устройство
индукционное зарядное,
моделирование,
катушки,
магнитное поле

Скорость внедрения электротранспорта зависит от уровня развития зарядной инфраструктуры, к которой предъявляются все новые требования, в том числе по повышению удобства эксплуатации и снижению времени заряда. Решением проблемы может стать внедрение беспроводной зарядки электромобилей (устройство индукционное зарядное – УИЗ). Однако для изготовления эффективного УИЗ (без предварительного расчета и моделирования КПД устройства может не достигать 10 %) необходимо выбрать параметры катушек и провести моделирование частотных характеристик напряжения. Для этого в рамках реализации проекта по созданию мобильной установки заряда электротранспорта была решена задача по моделированию работы УИЗ. В соответствии с техническим заданием построена катушка в Excel, которую в качестве геометрии использовали в Comsol для оценки распределения магнитных полей. Для изучения частотных характеристик использовалась программа CST Studio. При помощи данных программ проведено моделирование разных методов реализации УИЗ с получением частотных характеристик. Подтверждено, что коэффициент связи растет с уменьшением расстояния между частями УИЗ. Проведены расчеты резонансных контуров, ожидаемого КПД для обоих типов резонансных контуров, сделан вывод, что уменьшение расстояния приводит к уменьшению резонансной частоты системы связанных контуров. Разработанная модель позволяет получить значения емкостей контура для образования резонанса, переходить к практической реализации и проводить верификацию полученных моделей.

Для цитирования

Сафин А. Р. и др. Моделирование работы устройства индукционного зарядного для мобильной установки заряда электротранспорта. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 410–421. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-410-421>.

Modeling the operation of an induction charger for mobile charging of electric vehicles

Alfred R. Safin, Alexey N. Tsvetkov, Daria Yu. Lyamzina,
Timur I. Petrov*, Vasily R. Basenko

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;

e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Article info

Received
08.09.2023;

received
in revised form
02.11.2023;

accepted
09.11.2023

Key words:

wireless power
transmission,
induction charger,
simulation,
coils,
magnetic field

Abstract

The speed of implementation of electric vehicles depends on the level of development of the charging infrastructure, which is subject to ever new requirements, including increasing ease of use and reducing charging time. A solution to the problem could be an introduction of wireless charging of electric vehicles (inductive charging device – WPT). However, in order to produce an effective WPT (without preliminary calculation and modeling the efficiency of the device may not reach 10 %), it is necessary to select the parameters of the coils and simulate the frequency characteristics of the voltage. For this purpose, as part of the implementation of the project to create a mobile charging installation for electric vehicles, the problem of modeling the operation of the WPT has been solved. In accordance with the technical specifications, a coil has been built in Excel, which was used as geometry in Comsol to evaluate the distribution of magnetic fields. To study the frequency characteristics, the CST Studio program has been used. Using these programs, we simulated various methods for implementing the WPT with obtaining frequency characteristics. It has been confirmed that the coupling coefficient increases with decreasing distance between parts of the WPT. Calculations of resonant circuits and the expected efficiency for both types of resonant circuits have been carried out, and it has been concluded that decreasing the distance leads to a decrease in the resonant frequency of the system of connected circuits. The developed model allows us to obtain the values of the circuit capacitances for the formation of resonance, move on to practical implementation and verify the resulting models.

For citation

Safin, A. R. et al. 2023. Modeling the operation of an induction charger for mobile charging of electric vehicles. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 410–421. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-410-421>.

Введение

Магнитно-резонансная беспроводная технология привлекает значительное внимание на рынке зарядки электромобилей. С развитием технологии беспроводной передачи энергии стало возможным заряжать электромобили без физического подключения, беспроводная зарядка для электромобилей имеет множество преимуществ, особенно с точки зрения удобства и безопасности. Удобство заключается в простоте эксплуатации, а безопасность обеспечивается исключением ситуаций, опасных для водителей, особенно в неблагоприятных погодных условиях, таких как снег или дождь, которые могут привести к поражению электрическим током. Ожидается, что со временем беспроводные зарядные станции станут преобладающим способом зарядки (Сафин и др., 2021; Tabachnikova et al., 2020).

Сотрудниками Казанского государственного энергетического университета и производственного объединения "Зарница" разрабатывается мобильная установка заряда электротранспорта, отличительной особенностью которой является наличие системы беспроводной зарядки – устройства индукционного зарядного (УИЗ).

Такая система состоит из двух катушек, соединенных беспроводным способом и подключенных к основным элементам (Bouanou et al., 2021). Реактивные компоненты, добавленные в систему УИЗ, могут быть использованы на передающей и принимающей стороне в разных последовательностях для получения разных характеристик всей системы. Таким образом, в системе УИЗ основными элементами, которые следует учитывать при проектировании, являются общая схема установки, конструкция катушек, топология и параметры схем с использованием LC элементов (Alsayegh et al., 2019).

Важным направлением исследований в этой области является проектирование топологий катушек с целью увеличения коэффициента связи и уменьшения изменения этого коэффициента из-за горизонтальных перекосов и вертикальных смещений (Zhu et al., 2013). Учитывая это, предусмотрены различные структуры связи как для статических, так и для динамических режимов. Общие конструкции, используемые при статической зарядке электромобилей, включают круглую, квадратную площадку, площадку DD и т. д. (Ahmad et al., 2018). Наиболее распространенными конструкциями, используемыми при динамической зарядке электромобилей, являются Тип S, Тип I, Тип W и Тип U, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки (Kerid et al., 2019).

В научной литературе широко обсуждается моделирование УИЗ (Nemirovskiy et al., 2021; Lassioui et al., 2020), но определение оптимальных параметров площадки для эффективной передачи энергии остается серьезной проблемой. В работе представлен подход к проектированию последовательно-последовательной (SS топология) системы УИЗ для передачи мощности 10 кВт на частоте 85 кГц, которая может применяться к различным уровням мощности (Panchal et al., 2018).

Материалы и методы

Условия численного эксперимента и описание модели

Современным решением проблем развития транспортной и электросетевой инфраструктуры может служить создание мобильных установок заряда электротранспорта (МУЗЭ), которые будут включать в себя блок УИЗ (рис. 1). Важным этапом для обеспечения эффективной передачи энергии является предварительное моделирование работы катушки в зависимости от параметров LC элементов в системе согласования. В работе моделируется передающая катушка, так как она является элементом МУЗЭ, в качестве принимающей рассчитывается полностью аналогичная катушка для удобства моделирования (у электромобилей имеются разные варианты исполнения катушек, но выбрана конфигурация, принятая в международном стандарте SAE J2954) (Bouanou et al., 2023).



Рис. 1. Общая схема мобильной установки зарядки электротранспорта с выделением блока УИЗ и связью с электромобилем

Fig. 1. General diagram of a mobile charging installation for electric vehicles highlighting the WPT unit and communicating with the electric vehicle

Типичные формы катушек УИЗ представляют собой круглую, квадратную, прямоугольную и двойную D (DD) конфигурацию (Ahmad et al., 2018). DD – одна из самых популярных современных катушек, ее геометрия представляет собой две прямоугольные катушки поверх материала сердечника, направляющие магнитный поток. Катушка DD имеет меньшее магнитное поле рассеяния, чем прямоугольная площадка и более высокий коэффициент связи. Магнитная связь значительно выше у многокатушечной формы по сравнению с круглой и прямоугольной. Однако сопротивление катушки также увеличивается, поскольку используется больше проводов, но эффективность относительно высока, и площадка DD считается наиболее подходящей для первичной катушки в системе УИЗ (Thein et al., 2021). Конфигурация катушки представлена на рис. 2.

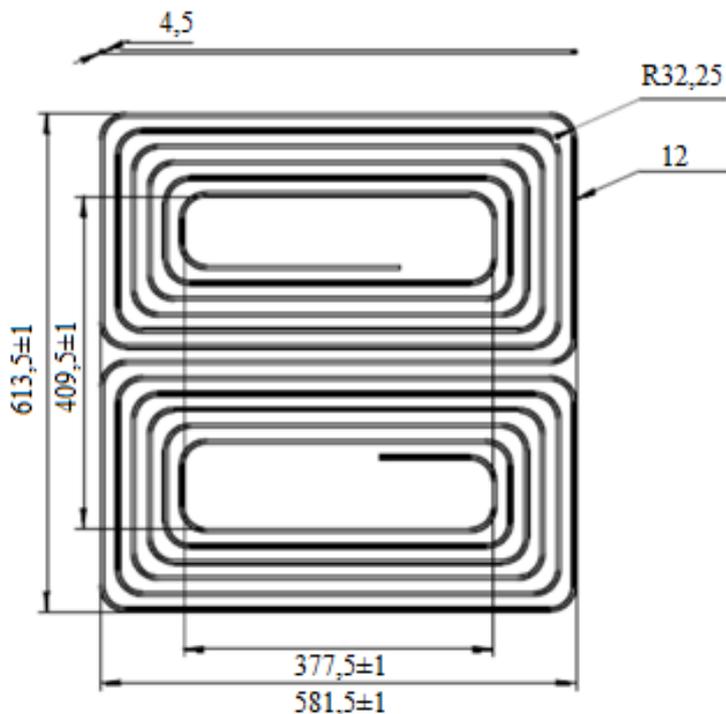


Рис. 2. Конфигурация передающей катушки
Fig. 2. Transmit coil configuration

Моделирование проводилось в программных комплексах COMSOL Multiphysics и CST Studio Suite 2021. Была построена компьютерная модель заданной системы и проанализированы частотные характеристики. Для теоретического расчета генерации магнитного поля использовали программный пакет COMSOL Multiphysics (Kuzey et al., 2017; Bentalhik et al., 2022). Расчет токов и генерация магнитного поля производится путем решения уравнений в частных производных, разбиением области на конечные объемы и нахождением приближенного решения методами итерационного подхода (метод Ньютона). Уравнения составляются исходя из выбора механизмов, моделей и физических явлений. В данной модели была использована мультифизическая связка физики электромагнитных полей и модуля электрических цепей (Lukic et al., 2013). Аналогичным образом производились расчеты частотных характеристик катушки и передающей системы из двух катушек в программном пакете CST Studio в частотной области с использованием связи из моделируемых катушек и идеальных элементов электрической цепи (Lumped elements).

Метод конечных элементов является мощным методом для численного решения сложных систем (Сафин и др., 2022; Kim et al., 2016).

Параметры УИЗ, приведенные в техническом задании (ТЗ): мощность – 10 кВт, КПД – не менее 70 %. Катушка (координаты вершин) построена в Excel (рис. 3) согласно заданным в техническом задании параметрам:

- изменяемые габариты внутреннего прямоугольника;
- расстояние между витками;
- размеры проводника.

Все вышеперечисленные параметры изменяемы, координаты вершин квадратной спирали рассчитываются автоматически.

Профиль проводника (рис. 4) реализуем в Comsol (в нашем расчете взят круглый профиль).

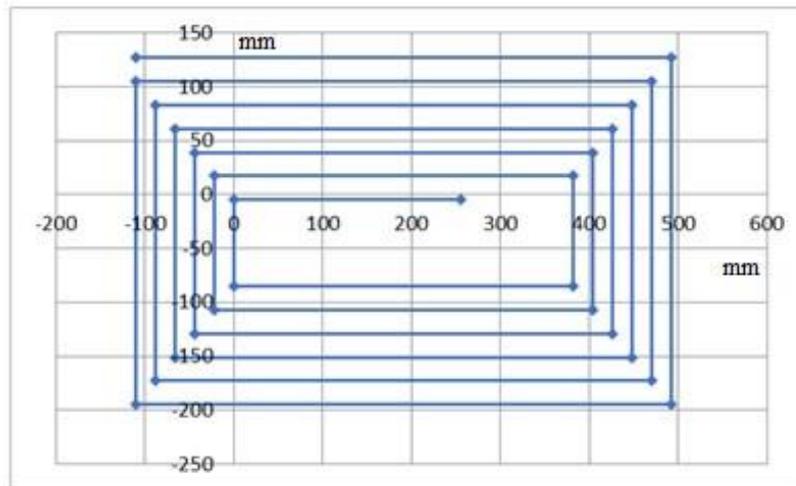


Рис. 3. Эскиз части DD катушки в EXCEL
Fig. 3. Sketch of the DD coil part in EXCEL

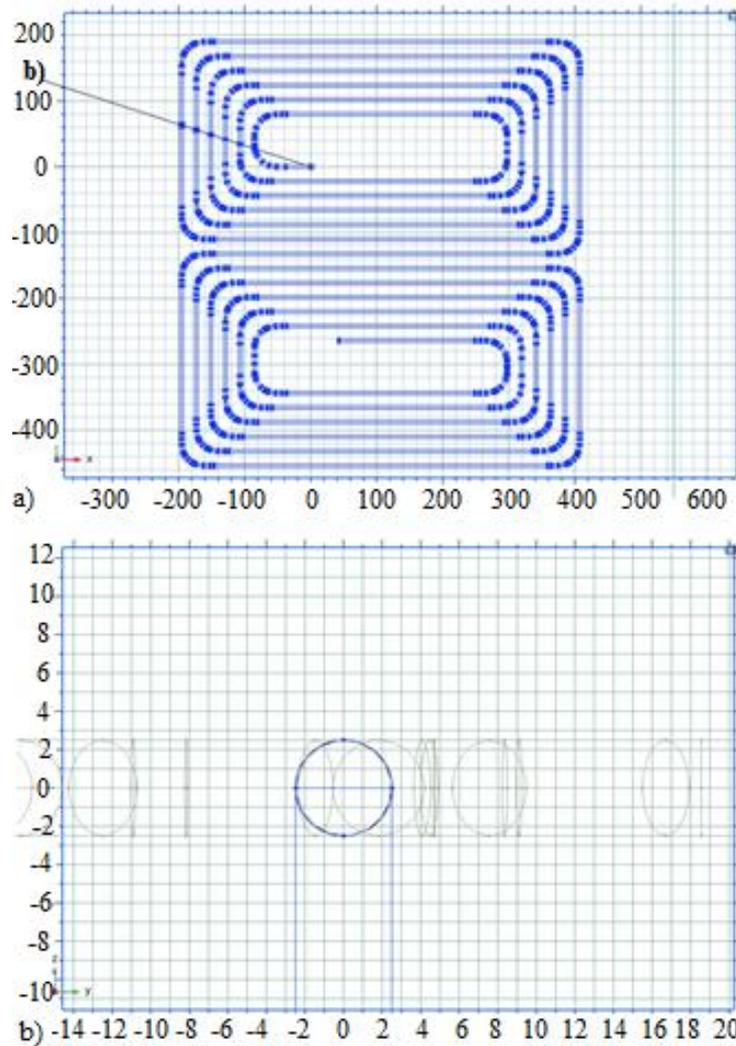


Рис. 4. *a* – профиль катушки в COMSOL, *b* – сечение провода в COMSOL
Fig. 4. *a* – COMSOL coil profile, *b* – COMSOL wire section

Назначены материалы и граничные условия для моделирования (*Jia et al., 2021; Lu et al., 2016*).

На данном этапе приложен постоянный ток значением 1А. Получено распределение магнитного поля в 3 плоскостях: XY, YZ, XZ (рис. 5). Катушка лежит параллельно плоскости XY.

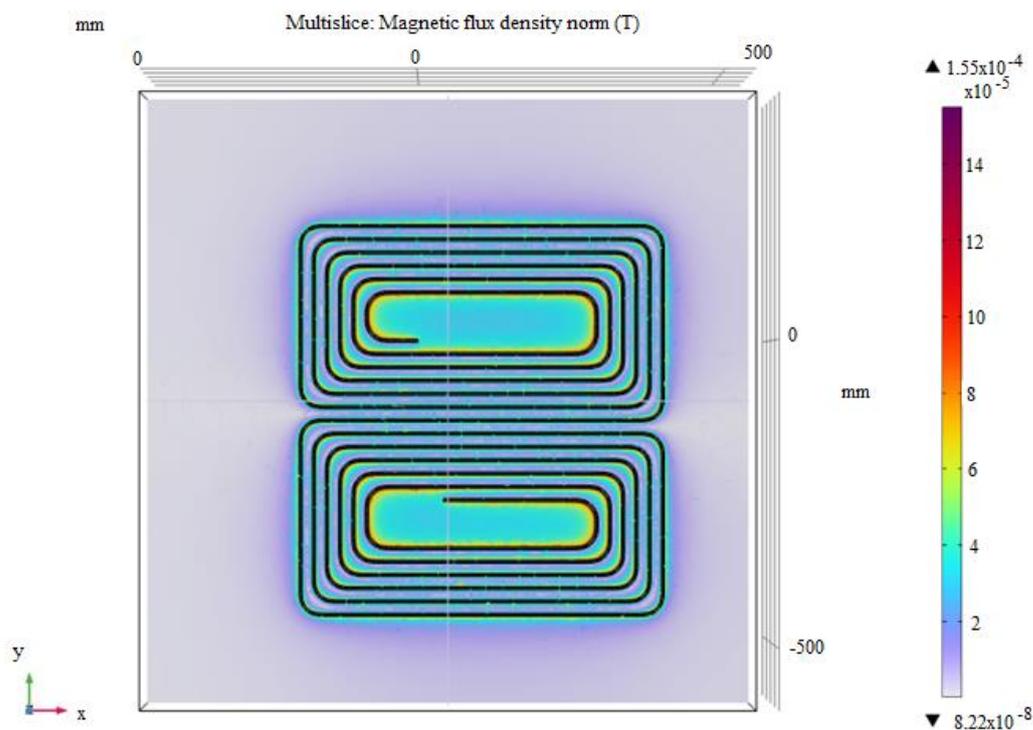


Рис. 5. Распределение магнитного поля в плоскости XZ
Fig. 5. Magnetic field distribution in the XZ plane

Далее для изучения частотных характеристик исследования проводились в программном пакете CST Studio. На основании ТЗ была создана математическая модель объекта, состоящая из стального листа (толщиной 3 мм), на ней находится ферритовая подложка (толщиной 7 мм), на которой лежит медная плоская катушка с двойной противоположно закрученной спиралью. Катушки идентичны по способу намотки, никаких поворотов друг относительно друга не производилось (Buja et al., 2015; Cui et al., 2018).

Примененные математические уравнения и схемы моделей расчета

Уравнения (1) и (2) показывают связь между частотой резонанса для контура с индуктивностью L и емкостью C_0 (собственная емкость катушки) или $C_{total, new}$ (общая емкость системы)

$$f_{res,0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}; \tag{1}$$

$$f_{res,new} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{total,new}}}. \tag{2}$$

Для определения индуктивности катушки в цепь была последовательно добавлена емкость C . Для такой системы общая емкость определяется по формуле (3)

$$C_{total,new} = C_0 + C. \tag{3}$$

После подстановки уравнение (3) в (2) и объединяя (1) и (2) возможно определить собственную емкость C_0 (4) и индуктивность катушки L (5)

$$C_0 = C \frac{f_{res,new}^2 - f_{res,0}^2}{f_{res,0}^2}; \tag{4}$$

$$L = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{1}{(2\pi f_{res,0})^2}. \tag{5}$$

Из уравнения (2): общая емкость системы C_{tot} может быть найдена по формуле (6) для достижения резонанса при частоте f_{res} и индукции L

$$C_{tot} = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(2\pi f_{res})^2}. \tag{6}$$

Из уравнения (3): величина, на которую надо изменить общую емкость при последовательном соединении конденсатора в систему

$$C = \frac{C_{tot} \cdot C_0}{C_0 - C_{tot}}. \quad (7)$$

Для достижения резонанса на 85 кГц в цепь была добавлена емкость C_2 , общая емкость последовательной цепи будет определяться по формуле (8), откуда можно выразить C_2

$$C_{total, new} = C_0 + C + C_2. \quad (8)$$

Для упрощения расчетов толщина медного проводника была выбрана равной 35 мкм, ширина шины 3 мм.

Результаты моделирования

Моделирование проводилось в программных комплексах COMSOL Multiphysics и CST Studio Suite 2021. Была построена компьютерная модель заданной системы и проанализированы частотные характеристики.

В результате моделирования работы схемы рис. 6, а (схема модели для определения резонансной частоты катушки) и построения частотной характеристики катушки определена частота резонанса 3,64 МГц. Далее по схеме модели для определения собственной емкости и индуктивности катушки (рис. 6, б) для параллельного LC-контура с конденсатором 10 нФ найдена частота резонанса – 211 кГц.

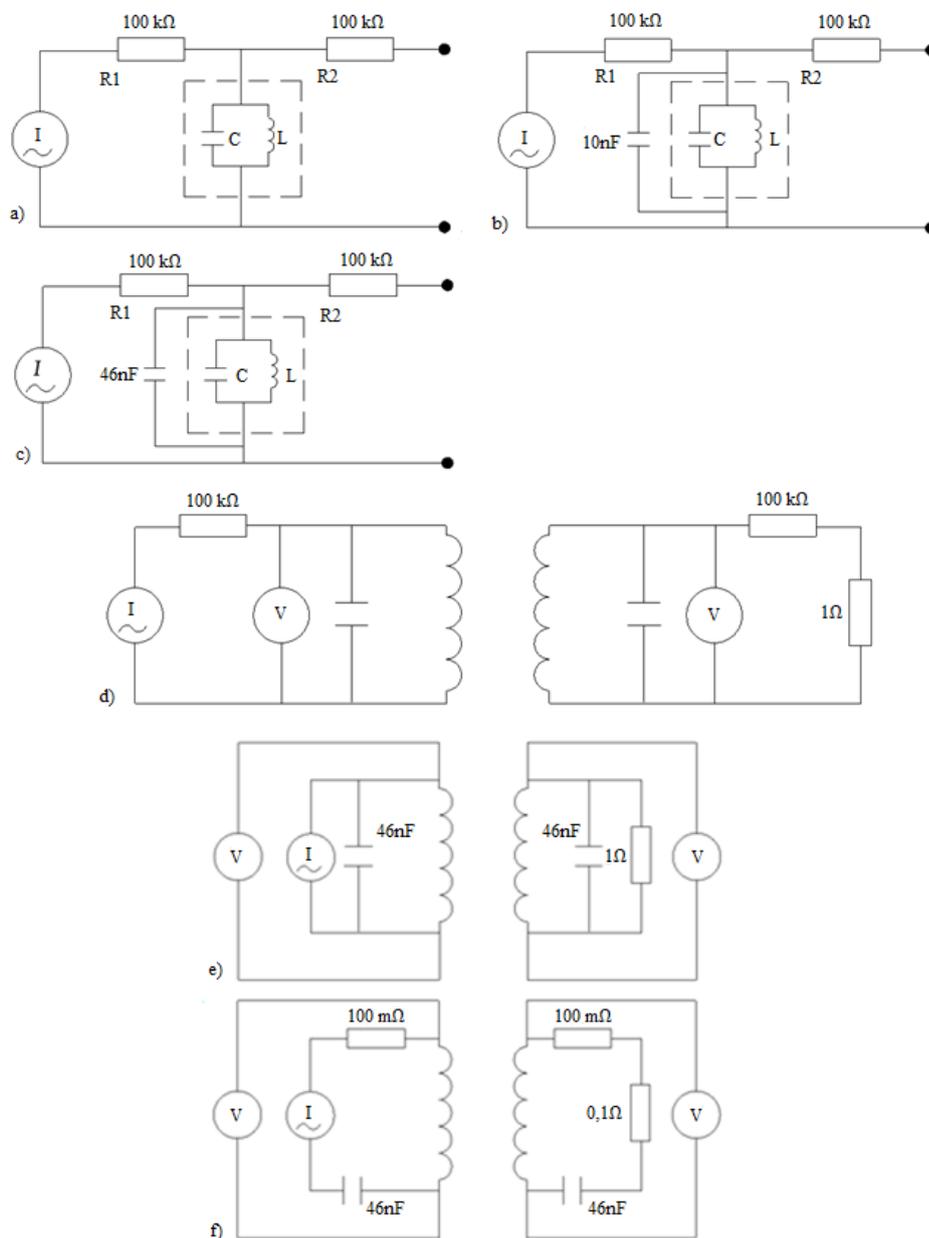


Рис. 6. Схемы моделей для определения параметров УИЗ
 Fig. 6. Schemes of models for determining the parameters of the WPT

Из полученных двух резонансных частот находим собственную емкость и индуктивность катушки, учитывая сложение емкостей (собственной и добавленной) для параллельных конденсаторов: собственная емкость – 35 пФ, собственная индуктивность – 55 мкГн.

Рассчитываем емкость конденсатора (схема – рис. 6, *c*) для достижения резонанса на 100 кГц, теоретически рассчитанная емкость равна 46 нФ.

Следующим шагом стало добавление идентичной схемы для принимающей части. Вместо генератора тока добавлена нагрузка с сопротивлением 1 Ом (рис. 6, *d*).

На рис. 7 представлена частотная характеристика системы двух катушек при различных расстояниях между катушками (10-30-50-70-90-110-130-150 мм).

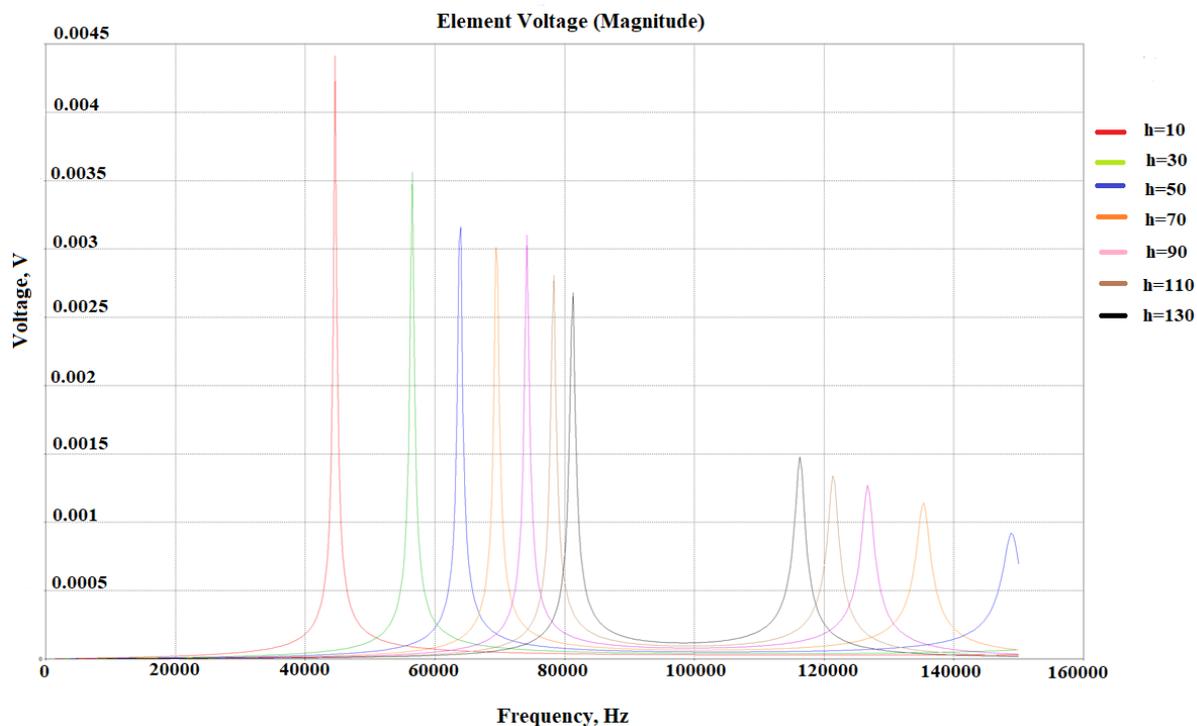


Рис. 7. Частотная характеристика системы двух катушек при различных расстояниях между катушками
Fig. 7. Frequency response of a two-coil system at different distances between the coils

Далее убираем резисторы, которые развязывали генератор тока, от резонансного контура (рис. 6, *e*) (Zhang et al., 2016). Таким образом, получена топология PP (параллельная-параллельная). Для ознакомления представлены только графики частотных характеристик напряжения (рис. 8), приложенного к нагрузке, в генераторе тока. В приемнике будут аналогичные по форме графики, которые отличаются только значениями. Для полученных значений рассчитано, что КПД передачи энергии в резонансе равно ~5 %.

Далее было решено перейти к последовательному контуру (топология SS). Данная топология (рис. 6, *f*) отличается тем, что при низкой взаимной индуктивности достигается высокая и стабильная эффективность передачи, что делает эту топологию лучшим выбором для использования в условиях переменной нагрузки. Полученная частотная характеристика представлена на рис. 9.

Очевидно, что при последовательном контуре (рис. 9) наиболее эффективной передача будет при наименьшем расстоянии катушек, данное значение равно 10 мм (меньшее расстояние будет сложно использовать для реальной эксплуатации). Для этого случая определим напряжение в принимающей и передающей катушках, результат представлен на рис. 10. Степень связи между двумя катушками можно выразить с помощью коэффициента связи k , который имеет значение от 0 до 1. Коэффициент связи между двумя катушками оказывает огромное влияние на выходную мощность и эффективность передачи, однако на коэффициент связи двух катушек оказывают непосредственное влияние все параметры катушки. В данном случае коэффициент можно рассчитать как отношение напряжений, он равен 0,92, что является хорошим результатом передачи электромагнитной энергии.

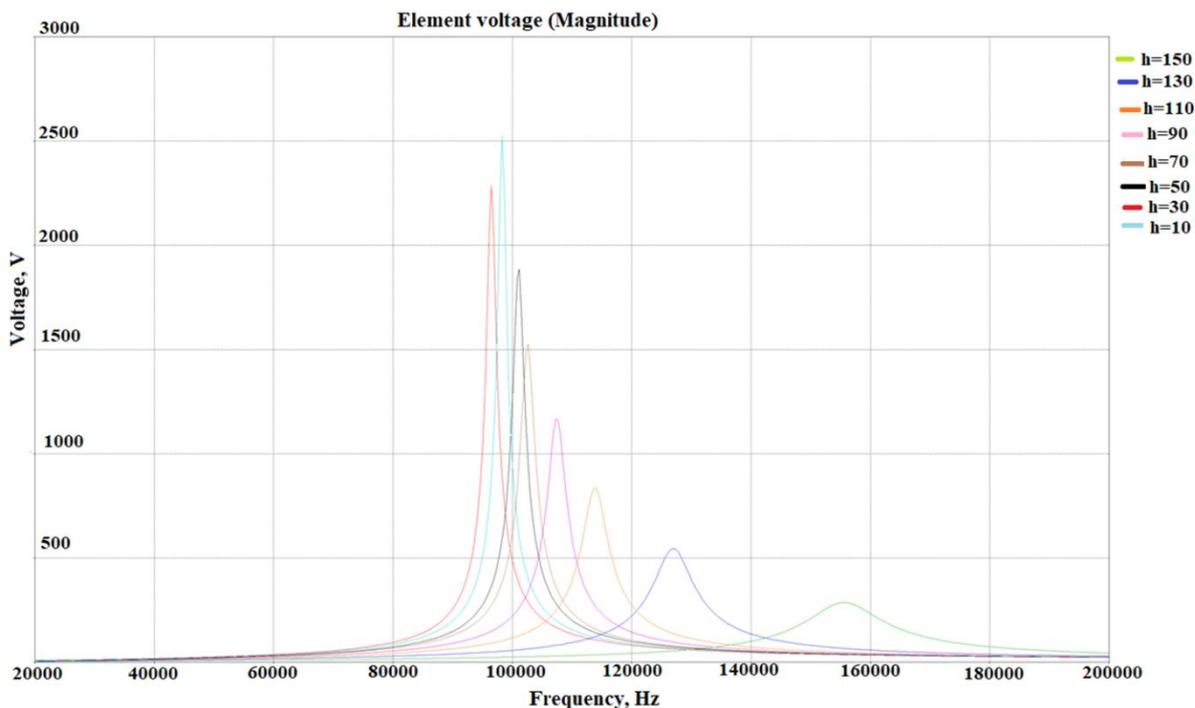


Рис. 8. Частотная характеристика напряжения, приложенного к нагрузке в генераторе тока при различных расстояниях
Fig. 8. Frequency response of voltage applied to the load in a current generator at various distances

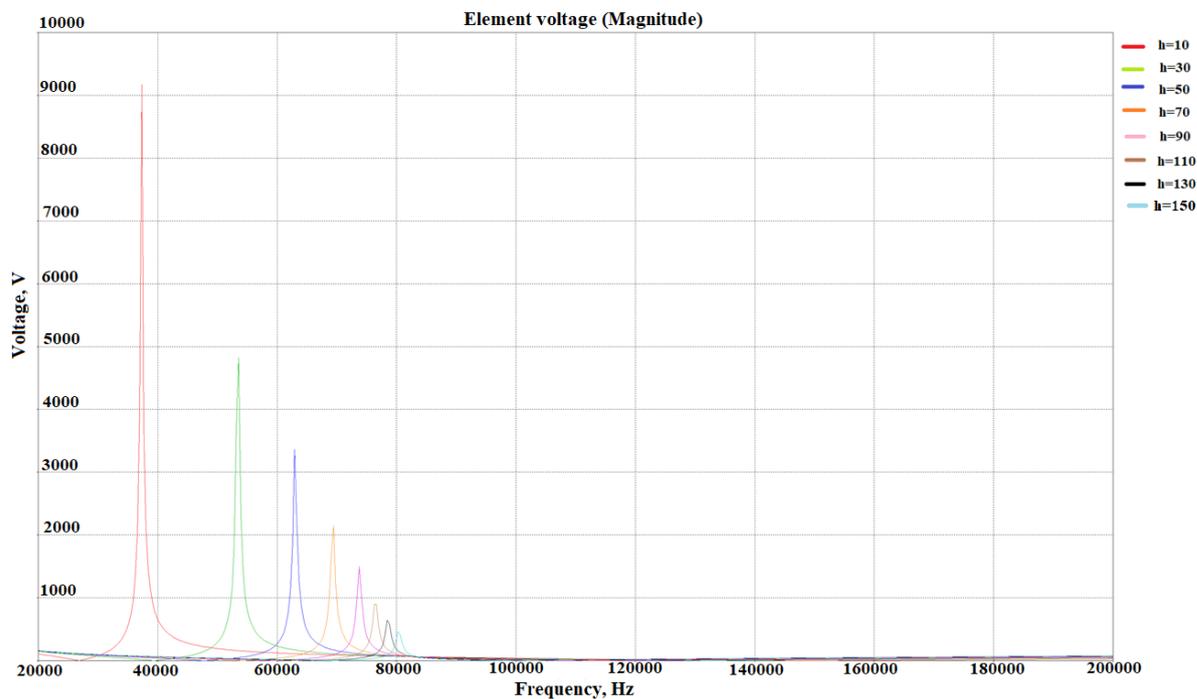


Рис. 9. Частотная характеристика напряжений для последовательного контура в генераторе
Fig. 9. Frequency response of voltages for a series circuit in a generator

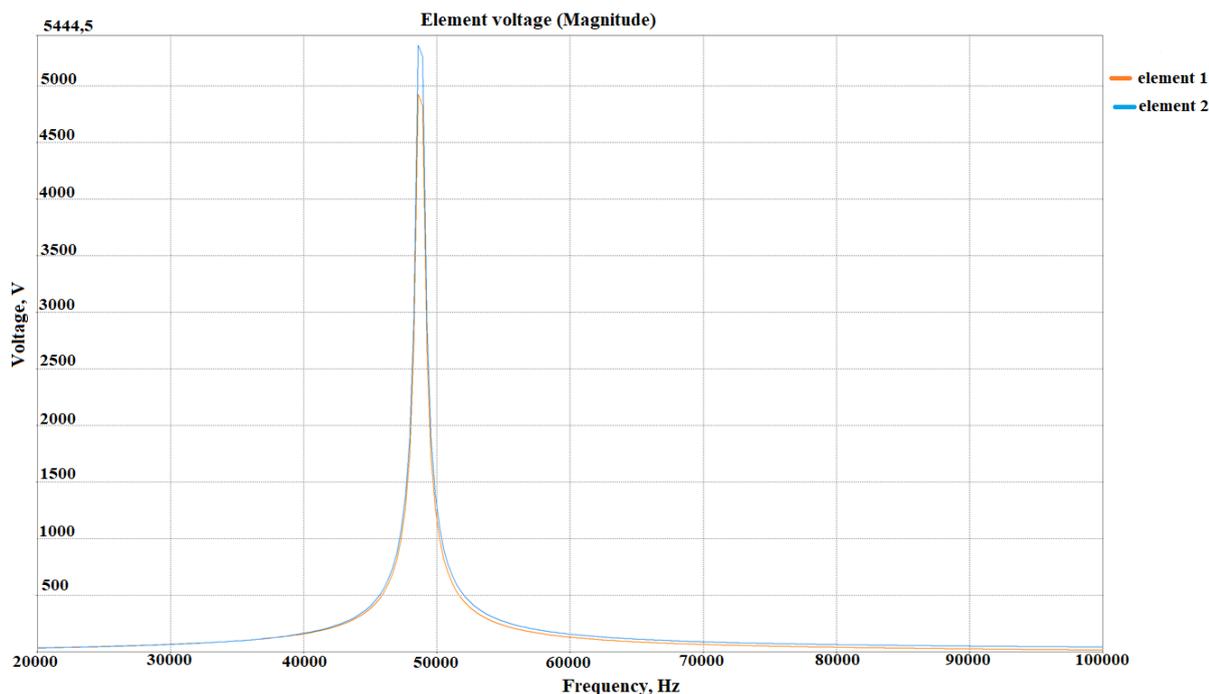


Рис. 10. Сравнение напряжений в принимающей и передающей катушках
 Fig. 10. Comparison of voltages in the receiving and in the primary coils

Заключение

В результате проведенных исследований:

1) в случае слабой связи с окружением (т. е. генератор и нагрузка подключены через высокоомные сопротивления) два, сильно связанных между собой параллельных резонансных контура обнаруживают два резонансных пика (по аналогии с акустическими и оптическими фоннными модами в твердотельной физике). Данный эффект можно использовать для измерения собственных потерь в системе передатчик – приемник и расчета ожидаемого КПД;

2) в полном согласии с теорией коэффициент связи сильно связанных между собой параллельных резонансных контуров растет с уменьшением расстояния между принимающей и передающей частями системы;

3) проведены расчеты для сильно связанных как между собой, так и с окружением (т. е. генератор и нагрузка подключены через низкоомные сопротивления) параллельных и последовательных резонансных контуров. Проведен расчет ожидаемого КПД для обоих типов резонансных контуров. Однако отметим, что использованная программа численного моделирования имела ограничение, состоящее в том, что возможно было использовать в качестве генератора только источник тока (в дальнейших исследованиях можно проанализировать и случай источника напряжения). Поэтому практическое значение имеют только результаты моделирования последовательных резонансных контуров. В частности, показано, что уменьшение расстояния, как и ожидалось, приводит к уменьшению резонансной частоты системы связанных контуров из-за роста вклада взаимной индукции;

4) численное моделирование позволяет рассчитать емкости для достижения резонанса в требуемой области частот как для параллельного, так и последовательного контура;

5) в процессе дальнейшего моделирования необходимо обязательно сравнить практическую реализацию и модель для ее верификации.

Предполагается также проведение дальнейших исследований для установления условий достижения максимального КПД, изучения влияния взаимной ориентации и ошибок изготовления, выработки оптимальных конфигураций с учетом ограничений на используемые материалы, максимальные токи и напряжения.

Библиографический список

Сафин А. Р., Ившин И. В., Цветков А. Н., Доломанюк Л. В. [и др.]. Изучение конструктивных особенностей мобильных установок заряда электротранспорта для разработки эскизной конструкторской документации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 3(51). С. 15–24. EDN: KMOTRQ.

Сафин А. Р., Козырев А. Б., Петров Т. И., Низамиев М. Ф. [и др.]. Определение параметров катушек индуктивности устройства индукционного зарядного для бесконтактного способа зарядки электротранспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 5. С. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83>. EDN: GPYWAY.

- Ahmad A., Alam M. S., Mohamed A. A. S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2019. Vol. 5, Iss. 4. P. 934–945. DOI: <https://doi.org/10.1109/tte.2019.2929443>.
- Bentalhik I., Lassioui A., EL Fadil H., Bouanou T. [et al.]. Analysis, design and realization of a wireless power transfer charger for electric vehicles: Theoretical approach and experimental results // *World Electric Vehicle Journal*. 2022. Vol. 13, Iss. 7. Article number: 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Bouanou T., El Fadil H., Lassioui A., Assaddiki O. [et al.]. Analysis of coil parameters and comparison of circular, rectangular, and hexagonal coils used in WPT system for electric vehicle charging // *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12, Iss. 1. Article number: 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12010045>.
- Bouanou T., El Fadil H., Lassioui A., Bentalhik I. [et al.]. Methodology and circuit analysis of wireless power transfer systems applied to electric vehicles wireless chargers // *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14, Iss. 5. Article number: 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14050117>.
- Buja G., Bertoluzzo M., Mude K. N. Design and experimentation of WPT charger for electric city car // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62, Iss. 12. P. 7436–7447. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2455524>.
- Cui H., Zhong W., Li H., He F. [et al.]. A study on the shielding for wireless charging systems of electric vehicles // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. San Antonio, TX, USA, 2018. P. 1336–1343. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2018.8341190>.
- Jiao C., Xu Y., Li X., Zhang X. [et al.]. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2021. Article number: 9984595. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9984595>.
- Kerid R., Bourouina H. Analysis of wireless power transfer system with new resonant circuit for high efficiency using perforated capacitors // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. P. 2445–2451. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3579-2>.
- Kim H., Song C., Kim D.-H., Jung D. H. [et al.]. Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol. 64, Iss. 2. P. 383–400. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2015.2513394>.
- Kuzey S., Balci S., Altin N. Design and analysis of a wireless power transfer system with alignment errors for electrical vehicle applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, Iss. 28. P. 17928–17939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.160>.
- Lassioui A., El Fadil H., Rachid A., El-Idrissi Z. [et al.]. Modelling and sliding mode control of a wireless power transfer system for BEV charger // *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2020. Vol. 34, Iss. 2. P. 171–186. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2020.110358>.
- Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C. C. An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31, Iss. 12. P. 8471–8482. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2519903>.
- Lukic S., Pantic Z. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles // *IEEE Electrification Magazine*. 2013. Vol. 1, Iss. 1. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Nemirovskiy A., Gracheva E., Bashirov M. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it // *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*. Eds.: A. Sinitsyn. 2021. Vol. 141. P. 155–166. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_18.
- Panchal C., Stegen S., Lu J. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018. Vol. 21, Iss. 5. P. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- Tabachnikova T. V., Gracheva E. I., Naumov O. V., Gorlov A. N. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 860. Article number: 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/860/1/012014>.
- Thein M. E., Charoensuk J., Masomtob M., Onreabroy W. [et al.]. Investigation of power transfer efficiency: Utilizing different coil designs in wireless charging of electric vehicles // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1137. Article number: 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1137/1/012019>.
- Zhang X., Kan T., You C., Mi C. Modeling and analysis of AC output power factor for wireless chargers in electric vehicles // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32, Iss. 2. P. 1481–1492. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2542163>.
- Zhu T., Feng P., Li X., Li F. [et al.]. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model // *International Conference on Mechanical and Automation Engineering*. Jiujiang, China, 2013. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1109/maee.2013.40>.

References

- Safin, A. R., Ivshin, I. V., Tsvetkov, A. N., Dolomanyuk, L. V. et al. 2021. The study of the design features of mobile installations for the charge of electric transport for the development of draft design documentation. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 13(3(51)), pp. 15–24. EDN: KMOTRQ. (In Russ.)
- Safin, A. R., Kozyrev, A. B., Petrov, T. I., Nizamiev, M. F. et al. 2022. Determination of the parameters of the inductance coils of an induction charger for a non-contact method of charging electric vehicles. *News of higher educational institutions. Energy problems*, 24(5), pp. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83>. EDN: GPYWAY. (In Russ.)
- Ahmad, A., Alam, M. S., Mohamed, A. A. S. 2019. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(4), pp. 934–945. DOI: <https://doi.org/10.1109/tte.2019.2929443>.
- Bentalhik, I., Lassioui, A., EL Fadil, H., Bouanou, T. et al. 2022. Analysis, design and realization of a wireless power transfer charger for electric vehicles: Theoretical approach and experimental results. *World Electric Vehicle Journal*, 13(7). Article number: 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Bouanou, T., El Fadil, H., Lassioui, A., Assaddiki, O. et al. 2021. Analysis of coil parameters and comparison of circular, rectangular, and hexagonal coils used in WPT system for electric vehicle charging. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1). Article number: 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12010045>.
- Bouanou, T., El Fadil, H., Lassioui, A., Bentalhik, I. et al. 2023. Methodology and circuit analysis of wireless power transfer systems applied to electric vehicles wireless chargers. *World Electric Vehicle Journal*, 14(5). Article number: 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14050117>.
- Buja, G., Bertoluzzo, M., Mude, K. N. 2015. Design and experimentation of WPT charger for electric city car. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), pp. 7436–7447. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2455524>.
- Cui, H., Zhong, W., Li, H., He, F. et al. 2018. A study on the shielding for wireless charging systems of electric vehicles. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. San Antonio, TX, USA, pp. 1336–1343. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2018.8341190>.
- Jiao, C., Xu, Y., Li, X., Zhang, X. et al. 2021. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application. *International Journal of Antennas and Propagation*. Article number: 9984595. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9984595>.
- Kerid, R., Bourouina, H. 2019. Analysis of wireless power transfer system with new resonant circuit for high efficiency using perforated capacitors. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, pp. 2445–2451. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3579-2>.
- Kim, H., Song, C., Kim, D.-H., Jung, D. H. et al. 2016. Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(2), pp. 383–400. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2015.2513394>.
- Kuzey, S., Balci, S., Altin, N. 2017. Design and analysis of a wireless power transfer system with alignment errors for electrical vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), pp. 17928–17939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.160>.
- Lassioui, A., El Fadil, H., Rachid, A., El-Idrissi, Z. et al. 2020. Modelling and sliding mode control of a wireless power transfer system for BEV charger. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 34(2), pp. 171–186. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2020.110358>.
- Lu, F., Zhang, H., Hofmann, H., Mi, C. C. 2016. An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(12), pp. 8471–8482. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2519903>.
- Lukic, S., Pantic, Z. 2013. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 1(1), pp. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Nemirovskiy, A., Gracheva, E., Bashirov, M. 2021. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. In *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*. Eds.: A. Sinitsyn. Vol. 141, pp. 155–166. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_18.
- Panchal, C., Stegen, S., Lu, J. 2018. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), pp. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- Tabachnikova, T. V., Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Gorlov, A. N. 2020. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 860. Article number: 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/860/1/012014>.

- Thein, M. E., Charoensuk, J., Masomtob, M., Onreabroy, W. et al. 2021. Investigation of power transfer efficiency: Utilizing different coil designs in wireless charging of electric vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1137. Article number: 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1137/1/012019>.
- Zhang, X., Kan, T., You, C., Mi, C. 2017. Modeling and analysis of AC output power factor for wireless chargers in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), pp. 1481–1492. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2542163>.
- Zhu, T., Feng, P., Li, X., Li, F. et al. 2013. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model. *International Conference on Mechanical and Automation Engineering*. Jiujiang, China, pp. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1109/maee.2013.40>.

Сведения об авторах

Сафин Альфред Робертович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: sarkazan@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

Alfred R. Safin – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: sarkazan@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

Цветков Алексей Николаевич – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: tsvetkov9@mail.ru

Alexey N. Tsvetkov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: tsvetkov9@mail.ru

Лямзина Дарья Юрьевна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, ассистент;
e-mail: sng55555@mail.ru

Daria Yu. Lyamzina – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Assistant;
e-mail: sng55555@mail.ru

Петров Тимур Игоревич – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Timur I. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Басенко Василий Романович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, преподаватель;
e-mail: sng55555@mail.ru

Vasily R. Basenko – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Lecturer;
e-mail: sng55555@mail.ru

УДК 621.3

Анализ результатов апробирования проекта по управлению нагрузкой для обеспечения системной надежности с точки зрения потребителей электроэнергии

Ю. А. Измайлов*, Ю. В. Кошарная

*ООО "Инженерные изыскания", г. Череповец, Вологодская обл., Россия;
e-mail: IzmailovYA@mpei.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 24.08.2023;

получена после доработки 29.09.2023;

принята к публикации 03.10.2023

Ключевые слова:

управление нагрузкой, управление спросом, ценозависимое снижение потребления, агрегатор спроса

Для цитирования

В Российской Федерации формируется рынок управления спросом электроэнергии, являющийся одним из инструментов, которые позволяют промышленным потребителям электроэнергии получать финансовое вознаграждение от инфраструктуры рынка электроэнергии и мощности. В работе рассматривается механизм управления нагрузкой предприятий для обеспечения системной надежности единой энергосистемы России. Исследованы технико-экономические возможности механизмов ценозависимого снижения потребления на оптовом рынке электроэнергии и управления нагрузкой (управления спросом) на розничном рынке электроэнергии для потребителей. Проанализирована взаимосвязь между управлением нагрузкой предприятия и снижением цены электроэнергии на рынке на сутки вперед. Определен экономический эффект для потребителей электроэнергии от внедрения механизма управления спросом на рынке электроэнергии. Описаны пути развития механизма управления нагрузкой для обеспечения системной надежности в единой энергосистеме России.

Измайлов Ю. А. и др. Анализ результатов апробирования проекта по управлению нагрузкой для обеспечения системной надежности с точки зрения потребителей электроэнергии. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 422–430. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-422-430>.

Results of the demand management project to ensure system reliability from the point of view of electricity consumers

Yury A. Izmailov*, Yulia V. Kosharnaya

*Engineering Surveys LLC, Cherepovets, Vologda Region, Russia;
e-mail: IzmailovYA@mpei.ru

Article info

Received 24.08.2023;

received in revised form 29.09.2023;

accepted 03.10.2023

Key words:

load management, demand response, price dependent reduction, demand aggregator

For citation

Abstract

In the Russian Federation an electricity demand management market is being formed, it is one of the tools that allows industrial consumers of electricity to receive financial rewards from the infrastructure of the electricity and capacity market. The paper considers the mechanism for managing the load of enterprises to ensure the system reliability of the unified energy system of Russia. The technical and economic possibilities of mechanisms for price-dependent reduction of consumption in the wholesale electricity market and load management (demand response) in the retail electricity market for consumers have been studied. The relationship between enterprise load management and the reduction in the price of electricity on the day-ahead market has been analyzed. The economic effect for electricity consumers from the introduction of a demand management mechanism in the electricity market has been determined. The directions of development of the load management mechanism to ensure system reliability in the unified power system of Russia have been described.

Izmailov, Yu. A. et al. 2023. Results of the demand management project to ensure system reliability from the point of view of electricity consumers. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 422–430. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-422-430>.

Введение

В рамках нормативного регулирования деятельности субъектов электроэнергетики Российской Федерации сформирован очень узкий перечень инструментов, которые позволяют промышленным потребителям электроэнергии получать финансовое вознаграждение от инфраструктуры рынка электроэнергии и мощности. Одним из таких инструментов является оказание услуги по управлению спросом на электрическую энергию субъектами электроэнергетики, осуществляющими управление изменением нагрузки их энергопринимающих устройств.

Управление спросом (управление нагрузкой) – термин используется в нормативных и регламентирующих документах АО "Системный оператор Единой энергетической системы" (СО ЕЭС) – это способность потребителя снижать потребление электроэнергии по требованию СО ЕЭС.

В зависимости от целей реализации механизма управления спросом различают два его вида:

- технологический – надежность электроэнергетической системы находится под угрозой аварии;
- экономический – в конкретные часы на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) складываются высокие цены.

Технологическая разгрузка применяется в целях предотвращения или ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме. В этом случае действующее законодательство рассматривает отключение потребителя или снижение потребляемой им из энергосистемы мощности в аварийной ситуации как его обязанность. При этом какое-либо вознаграждение для потребителя за реализацию данного механизма не предусмотрено, так как считается, что ограничение потребления электроэнергии в данном случае направлено на обеспечение бесперебойности электроснабжения всех потребителей, подключенных к энергосистеме.

Экономическая разгрузка может быть обусловлена высокими ценами на электроэнергию в отдельные часы суток, а также возможностью получения финансового вознаграждения за управление нагрузкой предприятия в эти часы по команде СО ЕЭС¹.

Внедрение механизмов экономической разгрузки предприятий активно применяется на зарубежных рынках электроэнергии, таких как PJM (Северо-Восток США), IESO (Онтарио, Канада), в Южной Корее, Великобритании (*Основы современной энергетики...*, 2003). Именно на опыте данных стран в законодательство Российской Федерации как на уровне Федерального закона "Об электроэнергетике"², так и постановлений Правительства РФ, внедрен механизм экономической разгрузки промышленных предприятий.

Утверждение механизма ценозависимого снижения потребления (далее ЦЗСП) путем внесения изменений в правила оптового рынка электроэнергии и мощности³ является первым импульсом по стимулированию промышленных потребителей электроэнергии к управлению их нагрузкой.

Однако участие в ЦЗСП не доступно большинству потребителей электроэнергии, так как данным механизмом могут воспользоваться только потребители ОРЭМ с фактической мощностью более 5 МВт. При этом для реализации механизма ЦЗСП заложены следующие ограничения: минимальный объем снижения нагрузки, который учитывается в рамках механизма, составляет 2 МВт; предусмотрена возможность выбора одного из трех вариантов временных интервалов фактического снижения продолжительностью 2, 4 или 8 ч подряд⁴. Механизм ЦЗСП не стал востребованным среди промышленных потребителей по причине того, что заявку на участие в ЦЗСП потребитель должен подавать в конкурентный отбор мощности, который проводится на четыре года вперед, т. е. заявка, поданная в 2023 г., потребует от потребителя снижения потребления в 2027 г. На данный момент в основе теории расчета и прогнозирования электрических нагрузок предприятия используют вероятностно-статистические методы, основанные на представлении нагрузки случайным процессом, а также неформализованные методы, основанные на работе с информационными базами по электрическим технологическим показателям, на кластер-анализе и теории распознавания образов (*Кудрин, 2007*). Но при использовании вышеуказанных методов в условиях модернизации промышленной площадки, изменений в номенклатуре и объемах выпуска основной продукции реализовать точное

¹ Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности : Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=443562&dst=100026#CcUbkfTIwqXIDCqm>.

² Об электроэнергетике : Федеральный закон от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ : [принят Государственной Думой 21 февраля 2003 года : одобрен Советом Федерации 12 марта 2003 года]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/?ysclid=lnsi9zccej536189947.

³ О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.2011 № 1172 : Постановление Правительства РФ от 20.07.2016 г. № 699 // <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=376542&dst=100001#sNWakfT7I6MUWwaR>.

⁴ Там же.

прогнозирование управления нагрузкой предприятия на четыре года вперед достаточно сложно, а зачастую невозможно (*Электротехнический...*, 2002).

При этом важно отметить, что участниками ОРЭМ в основном являются крупные промышленные потребители с максимальной мощностью более 20 МВт, а более трех четвертей всего потребления электроэнергии в ЕЭС России приходится на среднюю и мелкомоторную промышленность – потребителей розничного рынка электроэнергии и мощности (далее РРЭМ) (*Кудрин, 2007*). Таким образом, низкий предел регулирования, стимулированный механизмом ЦЗСП, а также долгосрочная ответственность и отложенная экономическая выгода для потребителя электроэнергии вынудили искать новый экономический механизм управления нагрузкой.

Целью исследования является анализ технико-экономической эффективности внедрения механизма управления спросом для потребителей электроэнергии, которые принимают непосредственное участие в управлении нагрузкой, а также для остальных потребителей электроэнергии.

Материалы и методы

Для привлечения большего количества потребителей электроэнергии к процессу управления нагрузкой СО ЕЭС предложил внедрить пилотный проект и апробировать распространение механизма управления спросом на розничный рынок электроэнергии⁵. Суть проекта заключается в том, чтобы потребитель электроэнергии за экономическое вознаграждение в оперативном режиме (на следующие сутки) снижал свое потребление в указанные СО ЕЭС часы. На данный момент пилотный проект продлен до конца 2023 г.

Однако из-за сложного нормативного регулирования в области электроэнергетики у отдельно взятого потребителя РРЭМ возникают барьеры для самостоятельного участия в процедуре регулирования нагрузки путем ее снижения. Поэтому было предложено решение о наделении полномочиями выступать от лица разрозненных потребителей РРЭМ агрегаторов спроса, в лице которых в основном выступают квалифицированные участники рынка электроэнергии – энергосбытовые компании и гарантирующие поставщики, так как они одновременно являются субъектами как розничного рынка электроэнергии, так и оптового, и действуют от имени и в интересах потребителей, находящихся на территории их зоны деятельности (*Кошарная и др., 2018*).

Целесообразность введения в указанный механизм организаций-агрегаторов обусловлена тем, что:

- потребитель розничного рынка пассивен и невосприимчив к складывающимся ценам на электроэнергию и мощность;
- потребитель розничного рынка не мотивирован на анализ правил работы рынков, а также не владеет методологией оперативной разгрузки и возможностями обеспечения передачи данных коммерческого учета;
- каждому отдельному потребителю электроэнергии экономически нецелесообразно участвовать в разработке и внедрении систем мониторинга технологической нагрузки.

К возможности воспользоваться механизмом управления нагрузкой через агрегатора спроса допускаются все потребители электроэнергии розничного рынка электроэнергии и мощности вне зависимости от максимальной мощности такого потребителя. Однако механизм управления спросом имеет ряд ограничений по аналогии с ЦЗСП: допускается минимально возможный объем снижения нагрузки в размере 0,25 МВт, у потребителя есть право выбора любого из двух временных интервалов фактического снижения электропотребления продолжительностью 2 или 4 ч подряд в рамках одних суток. В течение месяца допускается 5 команд – максимальное количество – от Системного оператора ЕЭС на снижение нагрузки (в том числе 1 тестирование).

Процедуру взаимодействия участников процесса по проведению разгрузки по требованию СО ЕЭС можно представить в виде временного графика (рис. 1), где сутки фактического события по снижению нагрузки обозначены X. Потребителю необходимо подавать агрегатору ежедневное подтверждение технической готовности к управлению нагрузкой объекта управления (далее ОУ) до конца суток X-2 в связи с тем, что непосредственно агрегатор передает сведения в СО ЕЭС до 8:30 суток X-1. При этом СО ЕЭС, планируя режим работы энергосистемы, в сутки X-1 с 17:00 до 18:00 по московскому времени выдает команду на исполнение разгрузки⁶.

В сутки X+2 СО ЕЭС на основании почасовых значений автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) потребителя и ряда статистико-математических допущений определяет, произвел ли объект управления фактическое снижение потребления

⁵ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности : Постановление Правительства РФ от 20.03.2019 № 287 // <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=376546#oD0bkfT5mcxTlXyp1>.

⁶ Там же.

электроэнергии в заявленном объеме, в определенные договором оказания услуг по управлению спросом периоды.

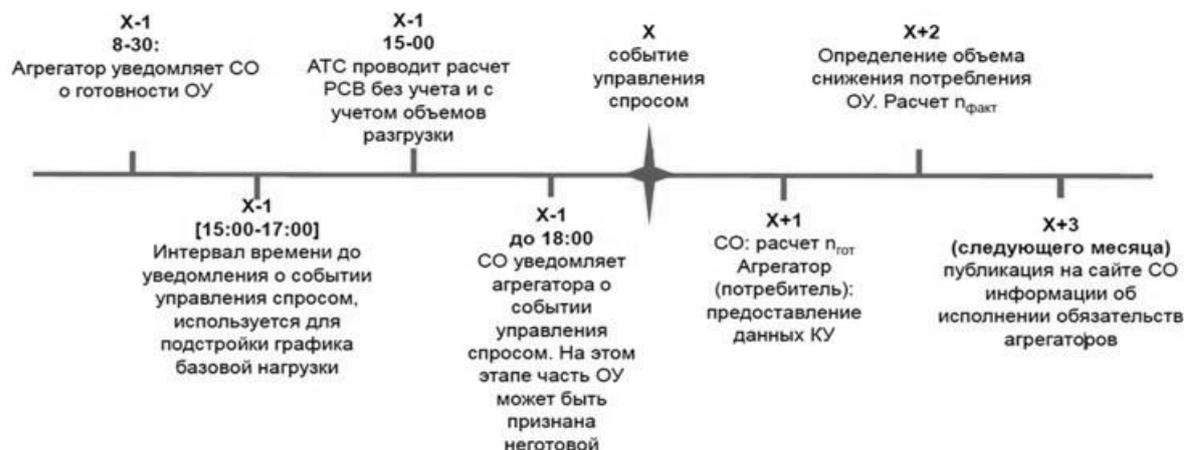


Рис. 1. Временной график взаимодействия агрегатора (потребителя) с СО ЕЭС
Fig. 1. Time schedule of interaction between the aggregator (consumer) and the system operator of the Unified Energy System (SO UES)

Для того, чтобы определить факт и значение величины снижения потребления, используются методы сравнения фактической нагрузки энергопринимающего устройства ОУ с нагрузкой, которая теоретически должна была быть при отсутствии события управления спросом.

Ниже описываются основные методы определения величины снижения потребления, которые зафиксированы в договоре оказания услуг по управлению спросом, заключаемым между агрегатором спроса и СО ЕЭС.

График базовой нагрузки (метод ГБН) – это основной метод определения объема снижения нагрузки. В этом методе осуществляется расчет 10-дневной скользящей средней арифметической, для построения которой используются предыдущие данные автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) о почасовом фактическом потреблении, переданные потребителем в адрес СО ЕЭС до даты фактического события снижения потребления. При этом из построения исключаются нехарактерные значения в следующие периоды:

- выходной день;
- часы, в которые происходила разгрузка по заданию СО ЕЭС;
- дни, в которые суммарное суточное потребление составляет менее половины от среднего суточного потребления, определенного за 10 рабочих дней;
- сутки, в которые отсутствуют данные АИИС КУЭ;
- сутки, в которые потребитель заявил о неготовности к участию в управлении спросом.

Метод ГБН является наиболее распространенным в применении, в основном используется потребителями с типовым графиком нагрузки и имеет следующие ограничения:

- величина среднеквадратического отклонения ошибки (*RRMSE*) графика базовой нагрузки от потребления электроэнергии для совокупности рассматриваемых часов хотя бы для одного из вариантов подстройки не превышает 0,2 и рассчитывается по формуле

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum (e_i)^2}{n}} / C,$$

где e_i – абсолютное отклонение графика базовой нагрузки от потребления электроэнергии по данным коммерческого учета электроэнергии за каждый час из диапазона часов; n – количество рассматриваемых часов; C – среднее часовое потребление электроэнергии по данным коммерческого учета электроэнергии для совокупности рассматриваемых часов;

- минимальное значение объема разгрузки – не менее двойной величины *RRMSE*.

Заявленный график (метод ЗГ) – метод могут использовать те потребители, у которых есть возможность качественно осуществлять почасовое планирование потребления электроэнергии. Метод ЗГ имеет очевидное преимущество в части устойчивости к манипулированию статистическими данными о фактическом почасовом потреблении в прошлые периоды, в связи с хорошей прогнозируемостью событий управления нагрузкой. Однако при этом регулирующим органам необходимо разработать дополнительные критерии контроля, которые бы ограничивали завышение заявленного графика в дни событий.

При использовании *метода максимальной базовой нагрузки (МБН)* происходит сравнение максимальной нагрузки с условной максимальной нагрузкой за 10 предыдущих рабочих дней, из которых исключают крайние (максимальное и минимальное за сутки) значения. Метод МБН в основном используется потребителями с неравномерным суточным графиком.

В качестве примера реализации механизма управления нагрузки рассмотрим потребителя с циклическим производственным процессом, график такого потребителя представлен на рис. 2. График иллюстрирует последовательную смену режима потребления электроэнергии и дальнейшее использование в производстве накопленной энергии (например, тепло от нагревательных элементов, охлаждение от компрессора, кондиционирование помещений, технологический процесс вентилирования промышленных объектов) (*Справочник..., 2010*).

Указанный жирной линией на рис. 2 график потребления электроэнергии с циклическим производством был сформирован с использованием метода ГБН на основе данных о почасовом потреблении предшествующих 10 суток (рис. 2).

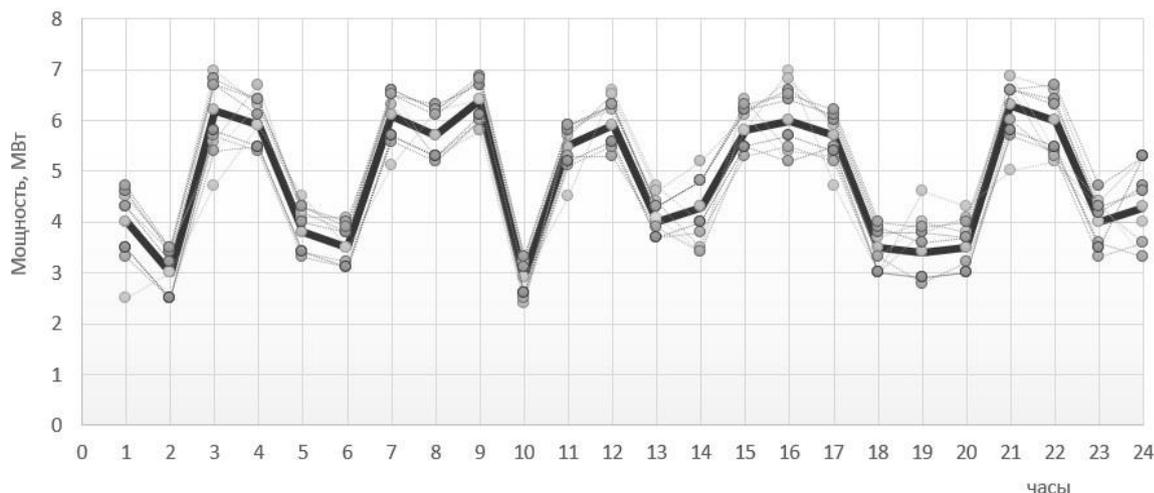


Рис. 2. График базовой нагрузки циклического производства
Fig. 2. The cyclic production base load schedule

Важно подчеркнуть, что необходимым условием для участия в управлении спросом является инертность технологического процесса и возможность работы производства без дополнительного потребления электроэнергии в течение двух или четырех часов, необходимых СО ЕЭС для обеспечения системной надежности. На рис. 3 представлен график потребления электроэнергии потребителя с циклическим производством, который имеет возможность перераспределить работу электроустановок во времени, т. е. обеспечить снижение электропотребления в назначенные СО ЕЭС часы (период с 20.00 до 22.00) без ущерба технологическому процессу и без изменения суточного объема электропотребления.



Рис. 3. Потребление электроэнергии циклического производства при переносе нагрузки
Fig. 3. Electricity consumption of cyclic production during load transfer

Стоимость оплаты потребителю за управление нагрузкой определяется по формуле

$$S = Ц \cdot \frac{n_{\text{гот}}}{n_{\text{рд}}} \cdot \frac{n_{\text{факт}}}{n_{\text{план}}} \cdot k_{\text{длит}} \cdot P_{\text{п}},$$

где Ц – цена из ценовой заявки в отношении объекта управления нагрузкой; $k_{\text{длит}}$ – коэффициент длительности (0,5 – при продолжительности разгрузки 2 ч, 1 – при разгрузке 4 ч); $P_{\text{п}}$ – объем снижаемой мощности из ценовой заявки; $n_{\text{гот}}$ – количество рабочих дней, в которые подана заявка о готовности снизить потребление; $n_{\text{рд}}$ – количество рабочих дней в месяце; $n_{\text{факт}}$ – количество раз фактического снижения мощности; $n_{\text{план}}$ – количество команд на снижение мощности в месяц (максимум – 5).

В результате участия потребителя в управлении нагрузкой через агрегатора спроса (рис. 3) при снижении объема потребления на 2500 кВт в течение двух часов при региональной цене отбора потребителей электроэнергии 398 тыс. руб/МВт в мес. позволило заработать $398\,000 \times 0,5 \times 2,5 = 497\,500$ руб. в месяц (Измайлов и др., 2023). Таким образом, в зависимости от технологической возможности по снижению потребления электроэнергии из внешней сети у различных потребителей возникает возможность получения платы за поддержание системной надежности. Согласно данным СО ЕЭС, представленным на обсуждениях в Государственной думе РФ итогов пилотного проекта по управлению спросом, по результатам отбора агрегаторов спроса в управлении нагрузкой участвуют предприятия различных отраслей промышленности (рис. 4).



Рис. 4. Распределение отобранных участников спроса по отраслям промышленности, март – июнь 2023 г.
Fig. 4. Distribution of selected demand participants by industry sectors, March – June, 2023

Результаты и обсуждение

При внедрении механизма управления спросом возникает дисбаланс интересов потребителей электроэнергии, который ставит под вопрос целесообразность и правомерность его внедрения для всех потребителей РРЭМ. Данная проблема связана с движением оплаты за услугу. Так, выплату вознаграждения в адрес потребителя, который по команде осуществил фактическое снижение потребления электроэнергии (далее "активный потребитель"), производит СО ЕЭС⁷. В то же время необходимая стоимость оплаты услуг по управлению нагрузкой ежегодно включается Федеральной антимонопольной службой РФ в тариф СО ЕЭС и оплачивается всеми потребителями электроэнергии, подключенными к ЕЭС России, в том числе потребителями, которые не участвовали в управлении нагрузкой – "пассивные потребители". Возникают очевидные вопросы: Есть ли экономический смысл "пассивным потребителям" оплачивать функционирование механизма управления спросом? Выгодно ли "пассивным потребителям" пилотный проект по управлению спросом переводить в постоянно функционирующий механизм рынка электроэнергии?

⁷ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности : Постановление Правительства РФ от 20.03.2019 № 287 // <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=376546#oD0bkfTsmcxTlXyp1>.

Эффективность механизма управления спросом на рынке электроэнергии для "пассивного потребителя" определяется тем, что для покрытия спроса на электроэнергию не привлекаются менее эффективные генерирующие объекты, т. е. при ценообразовании на рынке на сутки вперед (РСВ) "закрывающий" дорогой энергоблок исключается из процесса формирования цены на электроэнергию РСВ. Порядок ценообразования на РСВ (рис. 5) зависит от топливной составляющей генерирующего объекта и поданной им ценовой или ценопринимающей заявке согласно правилам ОРЭМ.

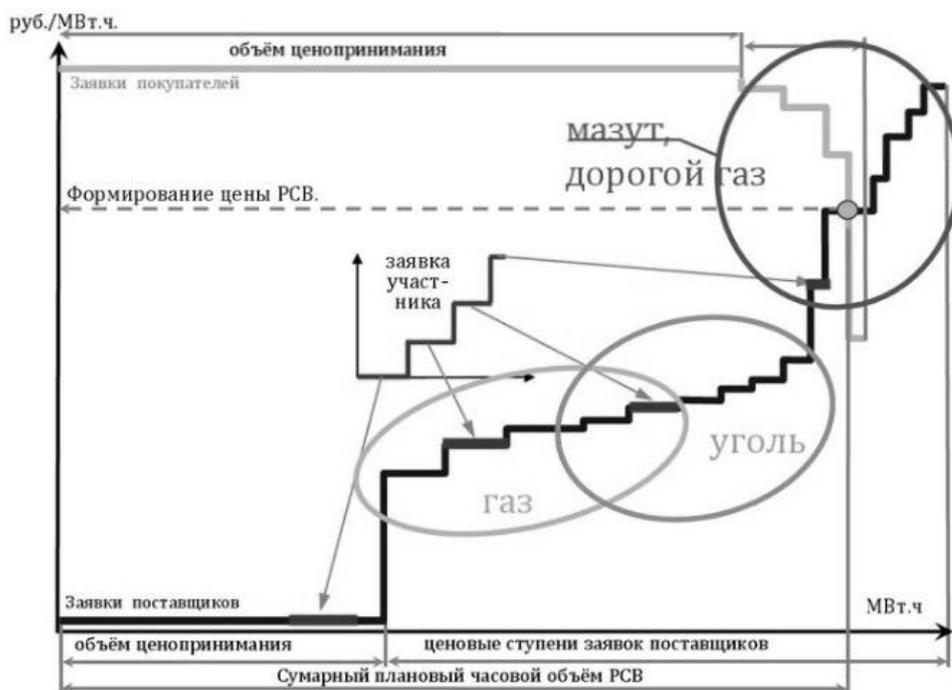


Рис. 5. Ценообразование на рынке на сутки вперед
 Fig. 5. Day-ahead market (DAM) pricing

При этом относительно небольшое снижение потребления может привести к существенному снижению цены на электроэнергию в часы контроля СО ЕЭС для всех потребителей рынка.

Графически эффект РСВ от участия потребителей в управлении спросом представлен на рис. 6, где P – цена электроэнергии на РСВ, Q – количество необходимой электроэнергии в ЕЭС, S – кривая предложения производства электроэнергии, $D1$ и $D2$ – кривые спроса на электроэнергию. Плавный рост кривой предложения S сменяется резким ростом в замыкающей части, что соответствует использованию наиболее дорогих генераторов. Снижение потребления в пиковые часы с величины $Q1$ до величины $Q2$ приводит к преобразованию кривой спроса $D1$ в кривую $D2$, которая становится более полой, и снижению цены на электроэнергию на величину ΔP , так как точка равнозначности спроса и предложения – равновесной цены – перемещается вниз по кривой предложения S .

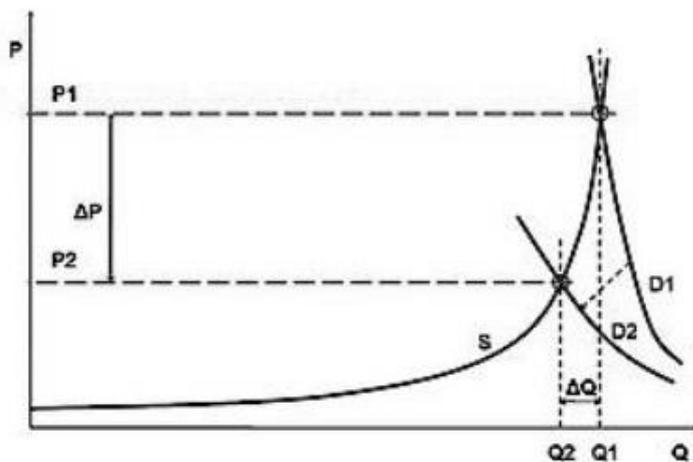


Рис. 6. Иллюстрация снижения цены в РСВ при управлении нагрузкой предприятия
 Fig. 6. Illustration of price reduction in DAM when managing enterprise load

Коммерческий оператор ОРЭМ АО "АТС" каждый рабочий день рассчитывает экономический эффект РСВ как сравнение совокупных затрат на рынке в случаях учета ресурсов управления нагрузкой и без учета управления. Результат расчета эффекта РСВ является открытой информацией, которая публикуется на официальном сайте АО "АТС"⁸. Ниже в таблице представлено сравнение затрат на оплату услуг управления нагрузкой и эффект РСВ за период действия пилотного проекта по управлению спросом 2019–2022 гг.

Таблица. Сравнение затрат на оплату услуг управления нагрузкой и эффекта в РСВ
Table. Comparison of the costs of paying for load management services and the effect in DAM

Год	Оплата услуг управления нагрузкой, тыс. руб.	Эффект в РСВ, тыс. руб.	Эффект для "пассивных потребителей", тыс. руб.	Среднемесячный объем снижения, МВт	Средневзвешенная цена, руб./МВт в мес.
2019	64 159	20 341	–43 818	49	335 904
2020	658 621	299 140	–359 481	355	351 224
2021	916 962	1 730 948	813 986	929	314 910
2022	1 188 439	1 731 442	543 003	1 035	335 813
Итого	2 828 181	3 781 871	953 690		334 463

Заключение

Анализ информации в таблице показывает, что в течение первых двух лет пилотного проекта по управлению нагрузкой, когда в проекте участвовали потребители электроэнергии с суммарной мощностью объема снижения менее 400 МВт, "пассивные потребители", не участвовавшие в управлении спросом, фактически субсидировали как "активных потребителей", так и в целом функционирование пилотного проекта. Постепенно, начиная с 2021 г., наблюдается рост объема потребителей, участвующих в управлении нагрузкой, что приводит к большему снижению цены электроэнергии в РСВ и позволяет "пассивным потребителям" окупить ранее понесенные затраты и тем самым получить экономический эффект от внедрения механизма управления спросом. Таким образом, можно признать результаты пилотного проекта положительными и перейти к внедрению данного механизма как составной части рынка электроэнергии. Однако методы определения величин фактических отклонений (сравнения) нагрузки в периоды применения события управления нагрузкой и в его отсутствие требуют дополнительного анализа и оценки их точности и адекватности из-за принятия ряда статистическо-математических допущений.

На данный момент разработан и проходит согласование в федеральных органах исполнительной власти проект Постановления Правительства Российской Федерации "О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации для определения основных положений, регулирующих оказание на оптовом рынке электрической энергии и мощности услуг по управлению изменением режима потребления", размещенный на федеральном портале проектов нормативных правовых актов⁹.

Принятие данного нормативного акта позволит интегрировать механизм управления спросом в оптовый рынок электроэнергии и мощности и обеспечить возможность конкуренции с неэффективной генерацией. Важно отметить, что для полноценной интеграции управления спросом в оптовый рынок электроэнергии и мощности необходимо внести изменения в ФЗ "Об электроэнергетике", в части определения и закрепления правового статуса агрегаторов управления изменением потребления электрической энергии в качестве субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Измайлов Ю. А., Кошарная Ю. В. Управление нагрузкой предприятия как способ обеспечения системной надежности. Тезисы конференции "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". М. : МЭИ, 2023. 592 с.
Кошарная Ю. В., Матюнина Ю. В. Нормативно-правовое обеспечение работы потребителей на рынках электроэнергии. М. : МЭИ, 2018. 76 с.
Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. М. : Интермет инжиниринг, 2007. 672 с.

⁸ Информация о ценозависимом снижении потребления // <https://www.atsenergo.ru/results/rsv/dr>.

⁹ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации для определения основных положений, регулирующих оказание на оптовом рынке электрической энергии и мощности услуг по управлению изменением режима потребления : проект Постановления Правительства РФ // <https://regulation.gov.ru/projects/List/AdvancedSearch?q=02%2F07%2F05-23%2F00138018&departmentId=>.

- Основы современной энергетики. В 2 т. Ч. 2. Современная электроэнергетика / под ред. А. П. Бурмана [и др.]. М. : МЭИ, 2003. 454 с.
- Справочник по энергоснабжению промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. С. И. Гамазина [и др.]. М. : МЭИ, 2010. 745 с.
- Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. М. : МЭИ, 2002. 696 с.

References

- Izmailov, Yu. A., Kosharnaya, Yu. V. 2023. Enterprise load management as a way to ensure system reliability. Abstract of reports of the conference *Radio electronics, electrical engineering and energy*. Moscow. (In Russ.)
- Kosharnaya, Yu. V., Matyunina, Yu. V. 2018. Regulatory and legal support for the work of consumers in electricity markets. Moscow. (In Russ.)
- Kudrin, B. I. 2007. Power supply for industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Fundamentals of modern energy. 2003. In 2 vols. Part 2. Modern electric power industry. Eds. A. P. Burman [et al.]. Moscow. (In Russ.)
- Handbook on energy supply of industrial enterprises and public buildings. 2010. Eds. S. I. Gamazin [et al.]. Moscow. (In Russ.)
- Electrical reference book. 2002. In 4 vols. Vol. 4. Use of electrical energy. Eds. V. G. Gerasimov [et al.]. Moscow. (In Russ.)

Сведения об авторах

Измайлов Юрий Александрович – ул. Мира, 30, г. Череповец, Вологодская обл., Россия, 162608; ООО "Инженерные изыскания", аспирант; e-mail: IzmailovYA@mpei.ru

Yury A. Izmailov – 30 Mira Str., Cherepovets, Vologda Region, Russia, 162608; Engineering Surveys LLC, PhD Student; e-mail: IzmailovYA@mpei.ru

Кошарная Юлия Васильевна – Красноказарменная ул., 17, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", канд. техн. наук, доцент; e-mail: KosharnayaYV@mpei.ru

Yulia V. Kosharnaya – 17 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: KosharnayaYV@mpei.ru

Результаты статистического исследования видов однофазных замыканий в низковольтных судовых электросетях

И. Е. Кажекин*, М. С. Харитонов

*Калининградский государственный университет, г. Калининград, Россия;
e-mail: kazhekin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
15.09.2023;

получена
после доработки
25.09.2023;

принята к публикации
28.09.2023

Ключевые слова:

однофазные замыкания,
низковольтные
электрические сети,
экспертный опрос,
судовое
электрооборудование,
аварийность, виды
разрядов, повреждения
электрооборудования

Реферат

Рост электроэнерговооруженности судов проявляется в увеличении мощностей судовых электростанций, общей протяженности кабельных линий, количества электрофицированных механизмов. С развитием морской техники возрастает тяжесть последствий повреждений судового электрооборудования, увеличиваются затраты на его техническое обслуживание и ремонт. Поиск путей повышения надежности и безопасности электрооборудования должен основываться на конструктивных и технологических решениях на этапах его разработки и производства, а также анализе различных факторов, которые могут проявляться в процессе эксплуатации морской техники и влиять на состояние судовых электросистем. В ходе исследования данных факторов выявлено, что одним из распространенных видов повреждений электрооборудования морской техники являются однофазные замыкания, причины возникновения которых разнообразны. Предотвращение замыканий трудозатратно и в ряде случаев неосуществимо. Однако понимание особенностей этого вида повреждений низковольтного оборудования необходимо для повышения надежности и безопасности судовых электросистем. Проведенные исследования основаны на анкетировании судовых электромехаников. Результаты опросов позволили выполнить анализ частоты возникновения однофазных повреждений изоляции, длительности их существования, выявить наиболее вероятные места возникновения замыканий и оборудование, подверженное таким повреждениям в большей степени по сравнению с остальными элементами электроэнергетической системы.

Для цитирования

Кажекин И. Е. и др. Результаты статистического исследования видов однофазных замыканий в низковольтных судовых электросетях. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 431–440. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-431-440>.

Results of a statistical study of types of single-phase faults in low-voltage ship electrical networks

Ilya E. Kazhekin*, Maxim S. Kharitonov

*Kaliningrad State University, Kaliningrad, Russia;
e-mail: kazhekin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

Article info

Received
15.09.2023;

received
in revised
25.09.2023;

accepted
28.09.2023

Key words:

single-phase faults,
low-voltage electrical
networks,
expert survey,
ship electrical
equipment,
accident rate,
types of discharges,
damage

Abstract

The increase in the power supply of ships is manifested in growth of ship power plants' capacity, the total length of cable lines, and the number of electrified mechanisms. With the development of marine technology, the severity of the consequences of damage to ship electrical equipment and the costs of its maintenance and repair increase. The search for ways to improve the reliability and safety of electrical equipment should be based on design and technological solutions at the stages of its development and production, as well as an analysis of various factors that may appear during the operation of marine equipment and affect the condition of ship electrical systems. During studying these factors, it has been revealed that one of the common types of damage to electrical equipment of marine equipment is single-phase short circuits, the causes of which are varied. Preventing short circuits is labour intensive and in some cases impracticable. However, understanding the characteristics of this type of damage to low-voltage equipment is necessary to improve the reliability and safety of ship electrical systems. The conducted research is based on a survey of ship electrical mechanics. The results of the surveys have made it possible to analyze the frequency of occurrence of single-phase insulation faults, the duration of their existence, to identify the most likely places of occurrence of short circuits and equipment that is more susceptible to such damage compared to other elements of the electrical power system.

For citation

Kazhekin, I. E. et al. 2023. Results of a statistical study of types of single-phase faults in low-voltage ship electrical networks. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 431–440. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-431-440>.

Введение

По мере развития морской техники повышаются технико-экономические показатели судового электрооборудования, растет мощность судовых электростанций, увеличиваются общая протяженность кабельных линий и количество электрофицированных механизмов.

Несмотря на развитие средств повышения безопасности и надежности морского электрооборудования, аварии на флотах продолжают происходить, возрастает тяжесть последствий повреждений судового электрооборудования, увеличиваются затраты на его техническое обслуживание и ремонт. Выполненный на основе представленных в работе (Глазюк и др., 2022) данных анализ общей аварийности за несколько лет (2016–2021 гг.) показал, что количество аварийных событий составляет примерно 187 (значения отклоняются от этого показателя не более чем на 17 %).

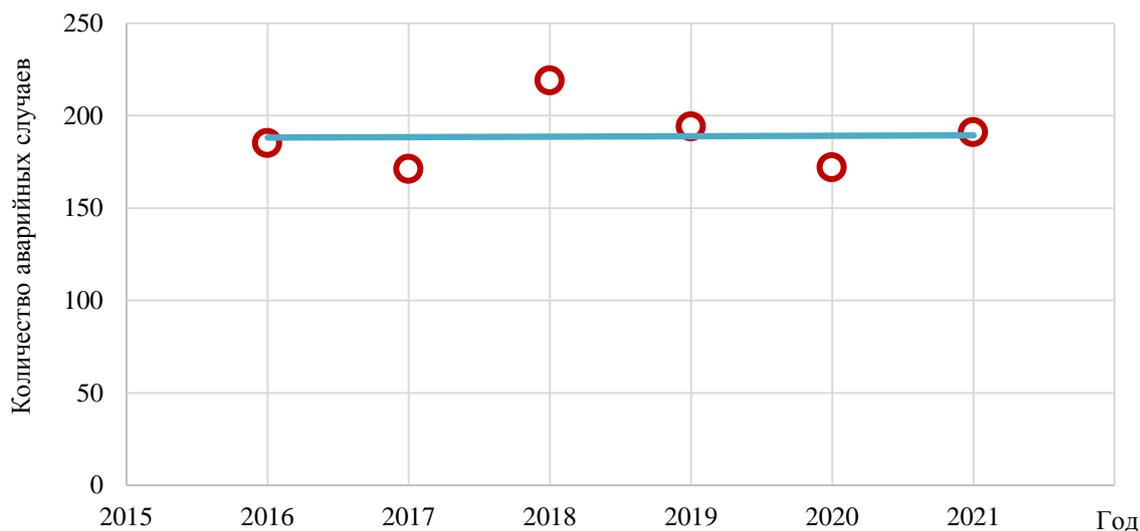


Рис. 1. Аварийность морского флота Российской Федерации за 2016–2021 гг. (Глазюк и др., 2022)

Fig. 1. Accident rate of the Russian Federation maritime fleet, 2016–2021 (Глазюк и др., 2022)

Снижение количества аварийных случаев, а также тяжести их последствий достигается в ходе мероприятий по воздействию на конкретные факторы. Выбор технических решений для минимизации рисков при эксплуатации морской техники должен осуществляться с использованием результатов анализа морских аварий. Согласно статистике (Kwiecińska, 2015) значительная доля инцидентов в общем количестве аварий судов связана с пожарами (20 %). Пожары занимают второе место среди причин несчастных случаев на флоте (рис. 2).

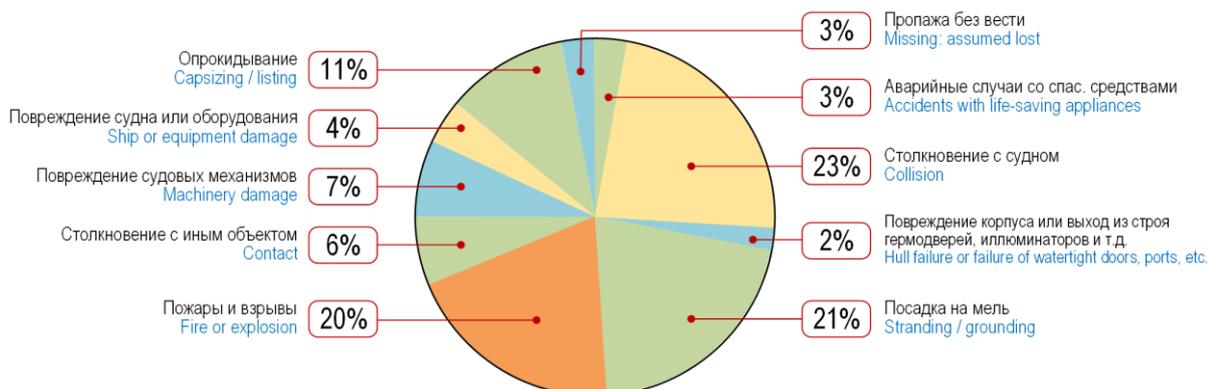


Рис. 2. Виды аварий и инцидентов на море по данным 2009–2014 гг. (Kwiecińska, 2015)

Fig. 2. Types of accidents and incidents at sea according to data from 2009–2014 (Kwiecińska, 2015)

Процентное распределение пожаров по типам судов представлено на рис. 3. Значительная часть пожаров приходится на суда рыбного промыслового флота, отличающиеся наибольшим разнообразием технологического электрооборудования и возрастного состава (Жук и др., 2015).

Решение проблемы судовых пожаров не должно основываться лишь на совершенствовании систем пожаротушения. Следует отметить, что существующие системы противопожарной защиты, расположенные как в грузовых отсеках, так и на палубах, неэффективны, так как с их помощью (без посторонней помощи) удалось потушить всего 17 % пожаров; 30 % случаев завершилось тем, что судно было оставлено экипажем, а среди его членов были раненые или погибшие (*Krmek et al., 2022*).

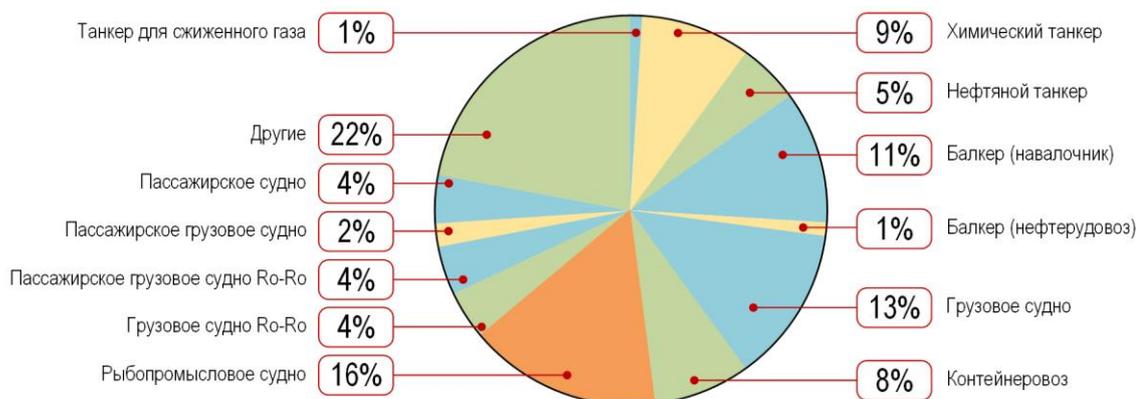


Рис. 3. Распределение пожаров по типам судов (*Kwiecińska, 2015*)
 Fig. 3. Distribution of fires by type of vessel (*Kwiecińska, 2015*)

По тяжести последствий судовой пожар является также одним из наиболее опасных происшествий. По данным, указанным в работе (*Kwiecińska, 2015*), 18,7 % судовых пожаров связано со смертельными травмами людей или их пропажей без вести, а 14,8 % случаев приводит к гибели судна. При этом оценка ущерба от судовых пожаров не должна ограничиваться повреждением судна и его груза. Значительный материальный ущерб пожарами наносится из-за возникающего загрязнения окружающей среды. Последствия этих аварий усугубляются тем, что 90 % всех судовых пожаров происходит на расстоянии до 300 миль от берега (*Bespalko et al., 1998*).

Существуют различные классификации причин возникновения пожаров на судах. В работе (*Ahn et al., 2021*) проанализированы технические причины: скопление горючих газов в грузовом танке; возникновение электрических дуг; нарушения при проведении огневых работ; появление статического электричества; самовозгорание грузов. Более детальный анализ причин приводится в работе (*Подобед, 2011*), описывающей распределение пожаров согласно причинам их возникновения на судах рыбопромышленного флота Северного бассейна. По данным указанной статистики, основная их часть (37 %) вызвана нарушениями требований безопасности при огневых работах, 23 % – неосторожным обращением с огнем, 18 % – ошибками при работе с электрооборудованием, 15 % – попаданием горючих материалов на горячие поверхности. Эти данные согласуются со сведениями, полученными национальными агентствами различных стран на основе отчетов о происшествиях на морском транспорте в 1990–2015 гг. (*Baalisampang et al., 2018*). Причины возникновения пожаров сгруппированы в пять категорий: человеческий фактор; механическая неисправность; самовозгорание грузов; электрическая неисправность; неустановленные причины. Под электрическими неисправностями автором понимается возникновение электрических разрядов; использование неисправного оборудования; замыкания и плохие контакты токопроводов. Категории причин судовых пожаров и взрывов и их процентное распределение приведены на рис. 4.

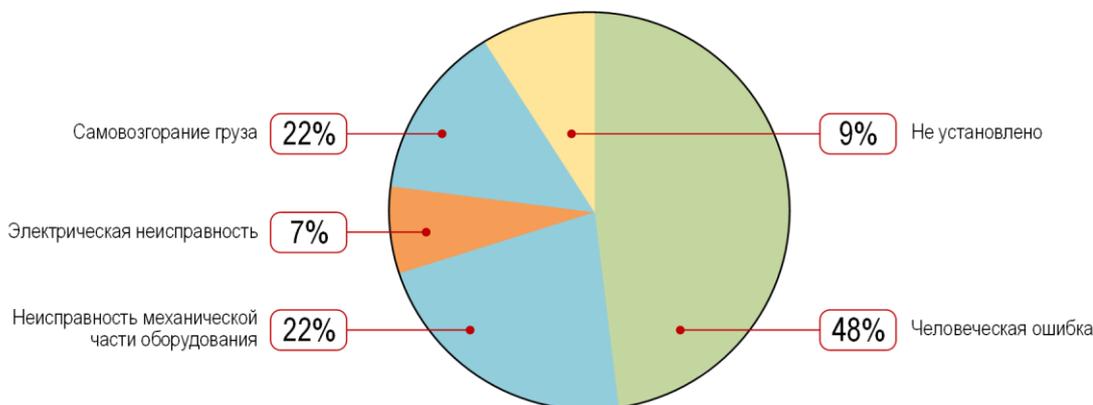


Рис. 4. Причины возникновения пожаров и взрывов (*Baalisampang et al., 2018*)
 Fig. 4. Causes of fires and explosions (*Baalisampang et al., 2018*)

В работе (*Jadin et al., 2012*) в дополнение к перечисленным видам повреждений низковольтного электрооборудования отмечены также его перегрузки, дисбаланс нагрузки и неправильная установка оборудования. Наиболее тяжелыми последствиями повреждений судового электрооборудования являются поражение электрическим током, возгорание и нарушение бесперебойности электроснабжения.

При анализе особенностей эксплуатации электроэнерговооруженных объектов морской техники отмечается значительная роль электрооборудования в возникновении и развитии пожаров (*Скороходов, 2018*) и в целом аварий. Более 80 % пожаров на подобных объектах связано с электрическими сетями (*Каракаев и др., 2011*). В работе (*Соболенко и др., 2019*) показано, что на протяжении тридцати лет треть аварийных случаев на судах рыбопромыслового флота происходит по причинам отказа или поломки судовых технических средств. Среди общей аварийности на судах типа БАТМ за 2011–2020 гг. 43–67 % случаев связано с повреждениями электрооборудования (*Омельченко, 2022*). Чаще всего аварийные дефекты возникают в генераторах и кабельных сетях (*Власов и др., 2013*).

Аварийность, обусловленная повреждениями судового электрооборудования, может быть снижена за счет совершенствования методов его диагностики (*Yu et al., 2022; Власов и др., 2021*), а также уменьшения степени тяжести последствий повреждений (*Кажекин, 2019; Острейковский и др., 2007*). Одним из наиболее опасных и распространенных видов повреждений судового электрооборудования следует признать однофазные замыкания. В частности, с этим видом замыканий связана значительная часть случаев выхода из строя судовых кабелей (*Кузнецов и др., 1991*) и электроприводов (*Кузнецов и др., 2011*). Опасность повреждений обусловлена тем, что в большинстве случаев однофазные замыкания в судовых электросистемах являются неотключаемыми. Длительность существования замыкания фазы на корпус судна ограничивается возможностью членов экипажа локализовать место повреждения оборудования. При этом место замыкания в течение всего времени, пока происходит его локализация, может подвергаться тепловым воздействиям протекающего через него тока или дуговых процессов.

Выбор технологии повышения безопасности судового электрооборудования в режиме однофазного замыкания должен проводиться с учетом сведений о его эксплуатации. Целью проведенного исследования являлся статистический анализ особенностей однофазных замыканий в действующих низковольтных электросистемах объектов морской техники, выполненный на основе анкетирования экспертов в области судового электрооборудования.

Материалы и методы

Получение информации об особенностях развития однофазных замыканий в действующих судовых электросистемах – достаточно трудная задача. К проблемам ее решения следует отнести недостаток систематизированных данных в открытой печати о результатах расследований аварийных ситуаций, а также отсутствие информации о наблюдениях за повреждениями электрооборудования. Таким образом, статистические данные об эксплуатации электросистем весьма ограничены и их использование при решении вопросов повышения безопасности электрооборудования затруднительно. Оценка показателей надежности и эффективности применения технических средств может проводиться посредством (*Prousalidis et al., 2008*):

- испытаний в лабораторных и заводских условиях;
- компьютерного моделирования процессов, возникающих при эксплуатации;
- сбора и анализа статистических материалов, полученных в ходе наблюдений за работой технического оборудования в процессе эксплуатации.

Наиболее ценными следует признать результаты статистического анализа данных наблюдений за оборудованием в процессе эксплуатации. Получение такой информации и ее анализ должен проводиться в течение длительного времени; подобные исследования необходимо периодически повторять (*Борисов и др., 2012*).

При разработке методики сбора информации следует учесть, что запрос излишних сведений затрудняет получение достоверных данных и их последующую обработку. Указанным требованиям к сбору информации удовлетворяет такой способ получения сведений, как проведение экспертных опросов, выполненных на основе количественных методов оценки (*Бубнова и др., 2018*).

На основании вышеизложенного, а также общих рекомендаций к проведению экспертных опросов (*Осинов и др., 1977; Даулеткериев, 2009*) была подготовлена методика анкетирования экспертов в области судового электрооборудования. Анкета содержала вопросы, ответы на которые позволяли оценить опасность и особенности однофазных повреждений изоляции низковольтного судового электрооборудования. В роли экспертов выступали судовые электромеханики, имеющие опыт работы в этой должности на судах различного типа не менее пяти лет. Для уменьшения степени субъективности ответов часть информации собиралась только по последнему рейсу эксперта. Опросы проводились в течение календарного года. В роли экспертов приняли участие 54 электромеханика, что превышает количество участников подобных опросов, проводимых ранее (*Кузнецов и др., 1991*).

Разработанная анкета состояла из двух частей, направленных на выявление особенностей однофазных замыканий в низковольтных электрических системах. Первая часть вопросов касалась оценки периодичности возникновения и длительности замыканий. Оценка осуществлялась на основе всего опыта эксплуатации

судового оборудования экспертом. Вторая часть анкеты содержала вопросы о видах, причинах, условиях возникновения и последствиях замыканий. В этой части опроса экспертами осуществлялось распределение случаев замыкания, произошедших во время их последнего рейса, по предложенным признакам. Возраст судов, участвовавших в наблюдении, варьировался от 1 года до 45 лет.

Результаты и обсуждение

Согласно проведенным опросам, 37 % специалистов отметили, что в их практике замыкания происходили более чем раз в месяц. Наибольшее указанное значение составило 12 раз в месяц. Распределение частоты возникновения однофазных повреждений изоляции приведено на рис. 5.

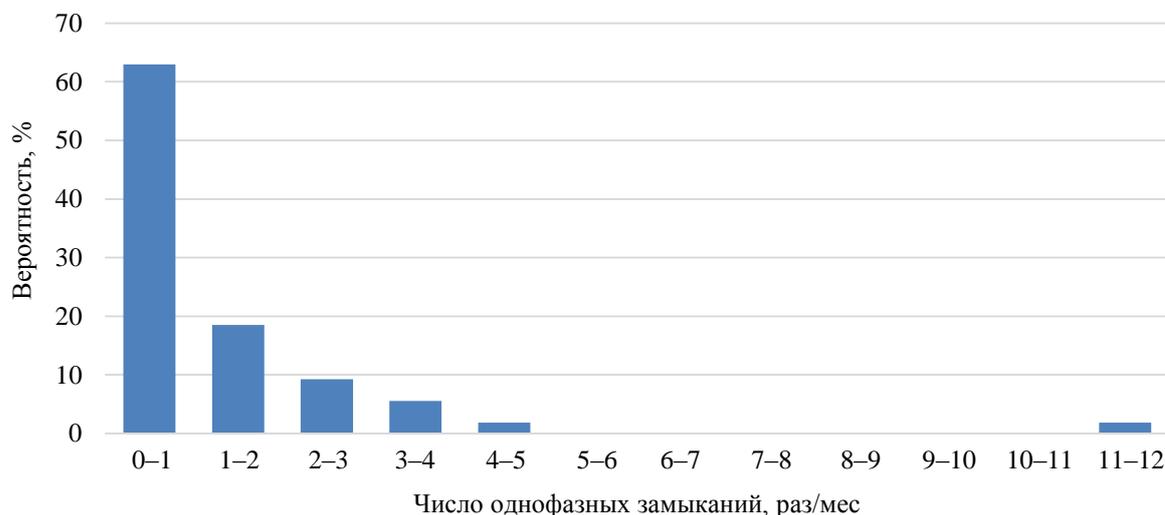


Рис. 5. Распределение частоты возникновения однофазных замыканий
Fig. 5. Distribution of frequency of single-phase faults' occurrence

Почти три четверти замыканий (73,9 %) было устранено в течение первых суток; однако были отмечены замыкания, длившиеся трое суток. Распределение замыканий по их длительности представлено на рис. 6.

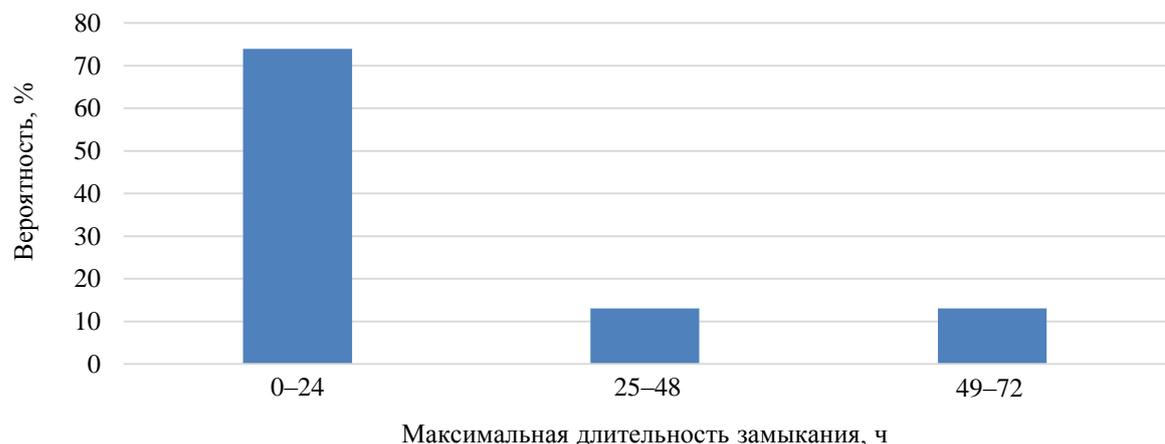


Рис. 6. Распределение однофазных замыканий по длительности их существования без отключения
Fig. 6. Distribution of single-phase faults by their duration without shutdown

Среди наиболее вероятных причин возникновения однофазных замыканий эксперты выделили увлажнение изоляции (38,3 %), возникающее по различным причинам, в том числе в результате образования конденсата на электрооборудовании. На второе место экспертами поставлено старение изоляции (34,7 %), под которым понималось постепенное ухудшение ее свойств, обусловленное воздействием электрических, механических, тепловых и прочих факторов, не приводящих к немедленному пробоя. Также большое значение имеют механические повреждения изоляции (15,2 %), возникающие как при монтаже электрооборудования, так и в результате случайных воздействий при эксплуатации. На рис. 7 показано распределение однофазных замыканий по причинам их возникновения.

Данные, представленные на рис. 7, согласуются с результатами опроса о наиболее вероятных местах возникновения замыканий (рис. 8). По мнению экспертов, значительная часть замыканий (53,2 %) возникает в связи с повреждением изоляции электрооборудования палубных механизмов, в наибольшей степени подвергаемых увлажнению. Подобное мнение соответствует результатам более ранних опросов об эксплуатации кабельного оборудования, описанных в работе (Кузнецов и др., 1991).

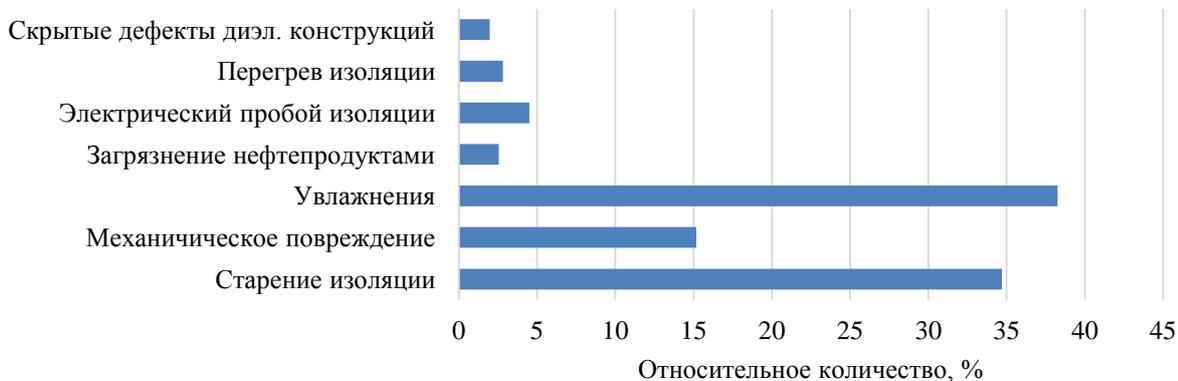


Рис. 7. Распределение однофазных замыканий по причинам их возникновения
Fig. 7. Distribution of single-phase faults by reasons for their occurrence

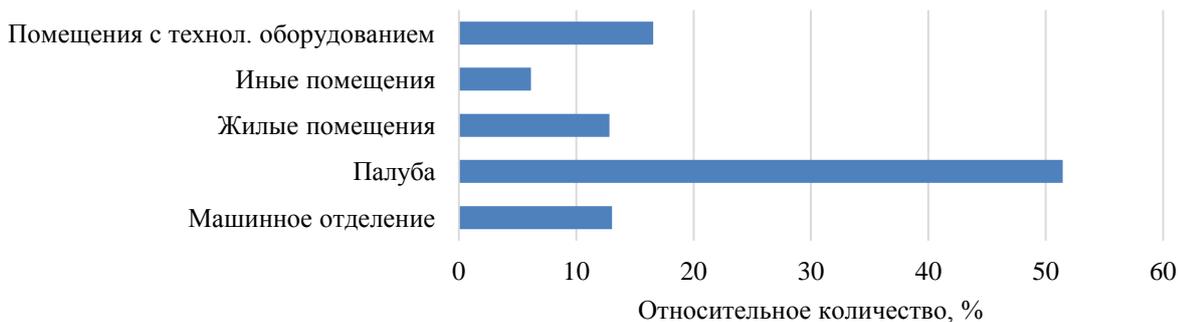


Рис. 8. Распределение однофазных замыканий в зависимости от места их возникновения
Fig. 8. Distribution of single-phase faults depending on the location of their occurrence

В первую очередь замыкания возникали в кабельном оборудовании (40,3 %); большое количество замыканий происходило в бытовом оборудовании (29,3 %) и электрических машинах (16,8 %). Распределение случаев однофазных замыканий в судовом оборудовании представлено на рис. 9.

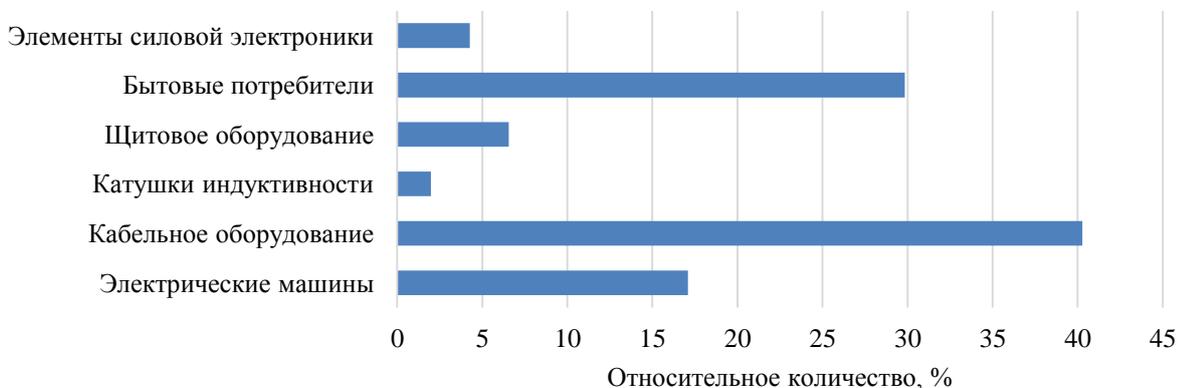


Рис. 9. Распределение однофазных замыканий по видам повреждаемого электрооборудования
Fig. 9. Distribution of single-phase faults by type of damaged electrical equipment

По оценкам экспертов, наименее вероятно возникновение повреждений в низковольтных судовых электросистемах устойчивой дуги (4,16 % отмеченных случаев). Наибольшее число замыканий (29 %) произошло через переходное сопротивление, величина которого варьировалась от нескольких Ом до нескольких кОм. Около трети однофазных замыканий происходило в виде неустойчивой дуги, искрения, неустойчивого контакта фазы с корпусом (27,8 %). Распределение сопоставляемых видов однофазных замыканий показано на рис. 10.

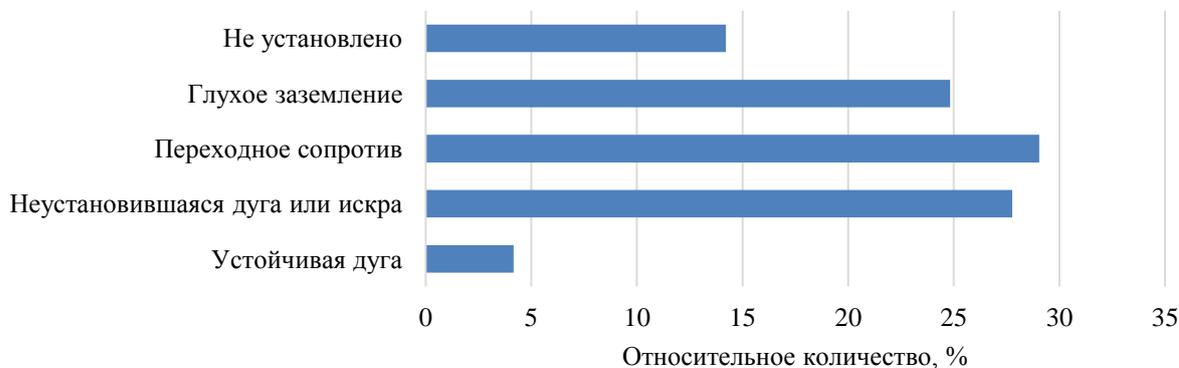


Рис. 10. Распределение однофазных замыканий по их видам
Fig. 10. Distribution of single-phase faults by their types

Последствия однофазных замыканий ограничиваются текущим ремонтом электрооборудования (53 %), направленным на восстановление его работоспособности, однако среди возможных последствий нельзя исключить и возникновение пожаров и взрывов (около 1,8 % случаев однофазных замыканий); нарушение электропитания ответственных потребителей (7,4 %); потерю питания судна (7,2 %). Распределение последствий возникших отказов приведено на рис. 11.



Рис. 11. Распределение однофазных замыканий по их последствиям
Fig. 11. Distribution of single-phase faults by their consequences

Проведенные исследования позволили выявить участки изоляции судовой электроэнергетической системы, которые наиболее подвержены повреждениям, способным развиться в однофазные замыкания. Впервые проведено сопоставление по количеству возникновений различных видов однофазных повреждений изоляции в низковольтных судовых электросетях, а также дана оценка их периодичности и длительности.

Заключение

Безопасность современного флота во многом определяется состоянием судового электрооборудования. Повышение безопасности технически оснащенных судов достигается посредством совершенствования технических мероприятий, направленных на своевременное выявление дефектов судового электрооборудования, а также на снижение тяжести последствий аварий. Значительная часть повреждений электрооборудования сопровождается однофазными замыканиями на корпус.

Полученные в ходе проведенного опроса сведения об этом виде замыкания в низковольтных судовых электросетях позволили выявить следующие закономерности:

- вероятность однофазных замыканий достаточно высока, их возникновение может происходить с периодичностью несколько раз в месяц;
- длительность замыканий (время от момента возникновения до момента устранения) может достигать нескольких суток;
- изоляция электрооборудования, располагающегося на палубе, наиболее подвержена повреждениям в сравнении с остальными элементами судовой электросистемы;
- основными механизмами повреждения изоляции судового электрооборудования являются увлажнение и различные виды старения;
- однофазные замыкания наиболее часто происходят при повреждениях изоляции кабельного оборудования и сопровождаются искрением, неустойчивыми дуговыми процессами или протеканием тока через переходное сопротивление;
- около 2 % замыканий в судовых электросетях способны привести к возникновению пожаров и взрывов, а около 7 % – к обесточиванию судна.

На основании проведенных статистических исследований выявлено, что наиболее актуальным направлением повышения безопасности судовых электрических сетей является снижение тяжести последствий в условиях протекания дуговых и искровых процессов, возникающих в условиях повреждения кабельной изоляции.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Борисов В. М., Борисов С. В. Методика сбора информации для оценки экспериментальной надежности компрессорных и холодильных машин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 10. С. 222–225. EDN: OZHBEX.
- Бубнова А. Ю., Мельников С. Л. Сравнительный анализ социологических методов исследования аудитории // Научный журнал Дискурс. 2018. № 5. С. 87–101. EDN: UQMBIW.
- Власов А. Б., Буев С. А. Анализ надежности электрооборудования судов рыболовецких компаний Северо-Запада // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16. № 4. С. 663–671. EDN: RRVIUB.
- Власов А. Б., Буев С. А. Поиск новых методов диагностики текущего технического состояния кабельной сети судна // Балтийский морской форум : материалы IX Междунар. Балтийского морского форума, 4–9 октября 2021 г. В 6 т. Т. 2. Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии / сост. Н. А. Кострикова. Калининград : Изд-во БГАРФ, 2021. С. 163–168.
- Глазюк Д. К., Щербань З. А. Анализ аварийности морского флота РФ в период 2016–2021 гг. // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. № 2. С. 49–55. EDN: ZPKCOY.
- Даулеткериев А. Р. Методы социологического исследования // Труды Грозненского государственного нефтяного технического университета им. академика М. Д. Миллионщикова. 2009. № 9. С. 304–308. EDN: RDRSDV.
- Жук А. П., Мизюркин М. А. Современная структура флота рыбной промышленности Приморского края // Рыбное хозяйство. 2015. № 3. С. 50–55. EDN: UGDDIT.
- Кажекин И. Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4–4(46). С. 83–87. EDN: XKAZRD.
- Каракаев А. Б., Луканин А. В. Проблемы исследования электрокоммуникаций и обеспечения устойчивости кораблей и судов к авариям // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 2(64). С. 67–70. EDN: NYBZPB.
- Кузнецов С. Е., Бурков А. Ф. Анализ отказов судовых электроприводов // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 3(65). С. 49–54. EDN: OIVICB.
- Кузнецов С. Е., Лёмин Л. А., Росляков Р. О. Анализ отказов судовых кабелей // Судостроение. 1996. № 1. С. 33–34.
- Омельченко Д. О., Федосеев К. Р. Анализ аварийности судового оборудования на рыболовецких судах типа БАТМ // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф. (18–21 октября 2022 г.) / отв. за вып. О. А. Белов. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2022. С. 18–22. EDN: GPNQBE.
- Осипов Г. В., Андреев Э. П. Методы измерения в социологии. М. : Наука, 1977. 183 с.

- Острейковский В. М., Ратников В. И. О повышении уровня электропожаробезопасности на судах отрасли // Рыбное хозяйство. 2007. № 5. С. 114–115. EDN: JKHВEX.
- Подобед В. А., Панкратов А. А. Анализ пожаров на судах рыбопромыслового флота Северного бассейна // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 728–732. EDN: RBWEYВ.
- Скороходов Д. А. Анализ информационных параметров пожарной безопасности на судах // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 2. С. 195–207. EDN: RZYJWT.
- Соболенко А. Н., Турищев И. П., Гомзяков М. В., Москаленко О. В. Анализ технических отказов на промышленных судах в Дальневосточном регионе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2019. № 3. С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-3-48-55>. EDN: YUMRJX.
- Ahn Y.-J., Yu Y.-U., Kim J.-K. Accident cause factor of fires and explosions in tankers using fault tree analysis // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, Iss. 8. Article number: 844.
- Baalisampang T., Abbassi R., Garaniya V., Khan F. [et al.]. Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation // Ocean Engineering. 2018. Vol. 158. P. 350–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.022>.
- Bespalko S. J., Fagan H. F., Sindt A. D., Sprung J. L. [et al.]. Variation of ship fire and ship collision frequencies with ocean location // International Journal of Radioactive Materials Transport. 1998. Vol. 9, Iss. 2. P. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.1179/rmt.1998.9.2.93>.
- Jadin M. S., Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography // Infrared Physics & Technology. 2012. Vol. 55, Iss. 4. P. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>.
- Krmek I., Kos S., Brčić D. Analytical research of the container ships cargo area fires in the period from 2010 to 2020 // Naše more. 2022. Vol. 69, N 1. P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.17818/nm/2022/1.8>.
- Kwiecińska B. Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams // Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. 2015. Vol. 44(116). P. 187–191. DOI: 10.17402/075.
- Prousalidis J., Styvaktakis E., Kanellos F., Perros S. [et al.]. Electric power supply quality in ship systems: An overview // International Journal of Ocean Systems Management. 2008. Vol. 1, Iss. 1. P. 68–83. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijosm.2008.017782>.
- Yu C., Qi L., Sun J., Jiang C. [et al.]. Fault diagnosis technology for ship electrical power system // Energies. 2022. Vol. 15, Iss. 4. Article number: 1287. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15041287>.

References

- Borisov, V. M., Borisov, S. V. 2012. Methodology for collecting information for assessing the experimental reliability of compressor and refrigeration machines. *Herald of Technological University*, 15(10), pp. 222–225. EDN: OZHBEX. (In Russ.)
- Bubnova, A. Yu., Melnikov, S. L. 2018. Comparative analysis of sociological methods of audience research. *Nauchnyi Zhurnal Diskurs*, 5, pp. 87–101. EDN: UQMBIW. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Buev, S. A. 2013. Analysis of the reliability of electrical equipment of ships of fishing companies of the North-West. *Vestnik of MSTU*, 16(4), pp. 663–671. EDN: RRVIUB. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Buev, S. A. 2021. Search for new methods for diagnosing the current technical condition of a ship's cable network. Proceedings of conf. *Baltic Maritime Forum*. In 6 Vol. Vol. 2. Marine engineering and technology. Maritime industry safety. Kaliningrad, pp. 163–168. (In Russ.)
- Glazyuk, D. K., Shcherban, Z. A. 2022. Analysis of the accident rate of the Russian maritime fleet in the period of 2016–2021. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, 2, pp. 49–55. EDN: ZPKCOY. (In Russ.)
- Dauletkeriev, A. R. 2009. Methods of sociological research. *Trudy Groznenskogo Gosudarstvennogo Neftyanogo Tekhnicheskogo Universiteta im. Akademika M. D. Millionshchikova*, 9, pp. 304–308. EDN: RDRSDV. (In Russ.)
- Zhuk, A. P., Mizyurkin, M. A. 2015. Modern structure of the fishing industry fleet of the Primorsky Territory. *Fisheries*, 3, pp. 50–55. EDN: UGDDIT. (In Russ.)
- Kazhekin, I. E. 2019. Description of processes during single-phase arc faults in low-voltage ship electrical networks with a compensated neutral. *Marine Intellectual Technologies*, 4–4(46), pp. 83–87. EDN: XKAZRD. (In Russ.)
- Karakaev, A. B., Lukanin, A. V. 2011. Problems of researching electrical communications and ensuring the resistance of ships and vessels to accidents. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, 2(64), pp. 67–70. EDN: NYBZPB. (In Russ.)
- Kuznetsov, S. E., Burkov, A. F. 2011. Analysis of failures of ship electric drives. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, 3(65), pp. 49–54. EDN: OIVICB. (In Russ.)
- Kuznetsov, S. E., Lemin, L. A., Roslyakov, R. O. 1996. Analysis of failures of ship cables. *Shipbuilding*, 1, pp. 33–34. (In Russ.)

- Omelchenko, D. O., Fedoseev, K. R. 2022. Analysis of the accident rate of ship equipment on fishing vessels of the BATM type. Proceedings of Intern. conf. *Technical operation of water transport: Problems and development paths*, 18–21 October, 2022. Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 18–22. EDN: GPNQBE. (In Russ.)
- Osipov, G. V., Andreev, E. P. 1977. Methods of measurement in sociology. Moscow. (In Russ.)
- Ostreykovsky, V. M., Ratnikov, V. I. 2007. On increasing the level of electrical fire safety on industry vessels. *Fisheries*, 5, pp. 114–115. EDN: JKBEX. (In Russ.)
- Podobed, V. A., Pankratov, A. A. 2011. Analysis of fires on ships of the fishing fleet of the Northern Basin. *Vestnik of MSTU*, 14(4), pp. 728–732. EDN: RBWEYB. (In Russ.)
- Skorokhodov, D. A. 2018. Analysis of information parameters of fire safety on ships. *Transport Automation Research*, 4(2), pp. 195–207. EDN: RZYJWT. (In Russ.)
- Sobolenko, A. N., Turishchev, I. P., Gomzyakov, M. P., Moskalenko, O. V. 2019. Analysis of technical failures on fishing vessels in the Far East. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. SERIES: Marine Engineering and Technologies*, 3, pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-3-48-55>. EDN: YUMRJX. (In Russ.)
- Ahn, Y.-J., Yu, Y.-U., Kim, J.-K. 2021. Accident cause factor of fires and explosions in tankers using fault tree analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8). Article number: 844.
- Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F. et al. 2018. Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. *Ocean Engineering*, 158, pp. 350–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.022>.
- Bespalko, S. J., Fagan, H. F., Sindt, A. D., Sprung, J. L. et al. 1998. Variation of ship fire and ship collision frequencies with ocean location. *International Journal of Radioactive Materials Transport*, 9(2), pp. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.1179/rmt.1998.9.2.93>.
- Jadin, M. S., Taib, S. 2012. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 55(4), pp. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>.
- Krmek, I., Kos, S., Brčić, D. 2022. Analytical research of the container ships cargo area fires in the period from 2010 to 2020. *Naše more*, 69(1), pp. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.17818/nm/2022/1.8>.
- Kwiecińska, B. 2015. Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 44(116), pp. 187–191. DOI: 10.17402/075.
- Prousalidis, J., Styvaktakis, E., Kanellos, F., Perros, S. et al. 2008. Electric power supply quality in ship systems: An overview. *International Journal of Ocean Systems Management*, 1(1), pp. 68–83. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijosm.2008.017782>.
- Yu, C., Qi, L., Sun, J., Jiang, C. et al. 2022. Fault diagnosis technology for ship electrical power system. *Energies*, 15(4). Article number: 1287. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15041287>.

Сведения об авторах

Кажекин Илья Евгеньевич – Советский пр-т, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: kazhekin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

Пуя Е. Kazhekin – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: kazhekin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

Харитонов Максим Сергеевич – Советский пр-т, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: mskharitonov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8185-8820>

Maxim S. Kharitonov – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: mskharitonov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8185-8820>

УДК 621.313.84

Сравнение конструкций синхронных машин со встроенным трансформатором момента для возобновляемой энергетики

Е. В. Конюшенко*, И. Рахманов, О. Н. Молоканов

*Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт",
г. Москва, Россия;

e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.09.2023;

получена
после доработки
23.10.2023;

принята
к публикации
02.11.2023

Ключевые слова:

синхронный генератор,
трансформатор момента,
постоянные магниты,
прямой привод,
низкоскоростные
машины,
магнитомягкие вставки

Повышение удельного момента электрических машин является актуальной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем, одна из таких систем – ветроэнергетическая установка. Нахождение оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента актуально для дальнейшего развития ветроэнергетики. Цель исследования состоит в определении оптимальной конструкции генератора со встроенным трансформатором момента для ветроэнергетических установок, что является решением проблемы создания низкоскоростных, высокомоментных и относительно компактных электрических генераторов и даст возможность отказаться от зубчатой передачи. В работе рассматриваются две конструкции синхронного генератора прямого привода со встроенным трансформатором момента с двумя и тремя воздушными зазорами. Расчет производится в программном комплексе Comsol Multiphysics, основанном на методе конечных элементов. Основные критерии для сравнения: выходная мощность генератора, максимальный момент тихоходного ротора, к которому подключается ветроколесо, максимальный момент на единицу объема генератора и максимальный момент на массу постоянных магнитов. По результатам расчета сделан вывод, что синхронный генератор с двумя воздушными зазорами имеет больший момент на единицу объема и момент на массу постоянных магнитов, т. е. при одинаковой мощности генераторов расходы на активные материалы будут меньше. При равных габаритных параметрах такой тип имеет большую выходную мощность по сравнению с синхронным генератором прямого привода и синхронным генератором с тремя воздушными зазорами.

Для цитирования

Конюшенко Е. В. и др. Сравнение конструкций синхронных машин со встроенным трансформатором момента для возобновляемой энергетики. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 441–448. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-441-448>.

Comparison of designs of synchronous machines with integrated torque transformer for renewable energy

Elizaveta V. Koniushenko*, Ilias Rahmanov, Oleg N. Molokanov

*National Research University "Moscow Power Energy Institute", Moscow, Russia;

e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Article info

Received
08.09.2023;

received
in revised form
23.10.2023;

accepted
02.11.2023

Key words:

synchronous generator,
torque transformer,
permanent magnets,
direct drive,
low-speed machines,
soft magnetic inserts

Abstract

Increasing the specific torque of electric machines is an urgent problem for a number of low-speed power electromechanical systems, one of such systems is a wind power plant. Determining the optimal design of a synchronous generator with a built-in torque transformer is important for the further development of wind power. The purpose of the research is to determine the optimal design of a generator with a built-in torque transformer for wind power plants, which is a solution to the problem of creating low-speed, high-torque and relatively compact electric generators, and will make it possible to abandon the gear drive. The paper examines two designs of a direct drive synchronous generator with a built-in torque transformer with two and three air gaps. The calculation is performed using the Comsol Multiphysics software based on the finite element method. The main criteria for comparison are the generator's output power, the maximum torque of the low-speed rotor connected to the wind turbine, the maximum torque per unit volume of the generator, and the maximum torque per unit mass of the permanent magnets. Based on the calculation results, it has been concluded that a synchronous generator with two air gaps has a higher torque per unit volume and torque per mass of permanent magnets, i. e. with the same power, the expenses on active materials will be lower. This type of generator has a higher output power compared to both the direct-drive synchronous generator and the synchronous generator with three air gaps, with the same dimensional parameters.

For citation

Koniushenko, E. V. et al. 2023. Comparison of designs of synchronous machines with integrated torque transformer for renewable energy. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 441–448. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-441-448>.

Введение

Надежность ветроэнергетических установок (ВЭУ) напрямую связана с характеристиками механической части этих установок, эффективностью автоматизированных систем управления и выбором типа генератора. При проектировании электрогенераторов основной задачей является оптимальное отношение их стоимости и энергетической эффективности.

Особенностью электрогенераторов, которые используются в ВЭУ, является высокий коэффициент полезного действия (КПД) выработки электроэнергии на низкой скорости вращения ротора (*Cooke et al., 2017*). Повышение удельного момента электрических машин является актуальной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем (*Qu et al., 2013*). Наиболее распространенный способ преобразования низкоскоростного вращения ветроколеса в электроэнергию – использование системы электрогенератора с промежуточным звеном, которым в основном является механический мультипликатор (*Li et al., 2019*). При применении низкоскоростных машин с промежуточным звеном массогабаритные параметры ветроагрегата имеют большее значение относительно системы прямого привода (*Wang et al., 2018; Cheng et al., 2020*), также механический мультипликатор является основной причиной простоя оборудования ВЭУ в связи с низкой надежностью, а частота его отказов растет с увеличением мощности генератора (*Li et al., 2019*).

В системе с прямым приводом с увеличением мощности ВЭУ увеличиваются массогабаритные показатели электрического генератора, что вызывает трудности с транспортировкой и монтажом (*Liu et al., 2017; Zhu et al., 2019*).

В 2008 г. возникла идея объединения магнитных систем магнитного редуктора и электрической машины (*Atallah et al., 2008*), так называемая электрическая машина псевдопрямого привода. При этом выделяют две группы подобных машин – с двумя и тремя воздушными зазорами, их исследованию посвящено мало работ и нет подробных данных о технико-экономических характеристиках относительно генераторов прямого привода. Соединение магнитным путем магнитного мультипликатора и синхронного генератора позволяет не применять зубчатую передачу и способно повысить КПД (*Atallah et al., 2008*), а также увеличить надежность системы за счет отсутствия механического зацепления.

Обе группы устройств объединяет относительно высокая сложность магнитной системы – у них два ротора, один из которых не подсоединяется к валу и служит для бесконтактного преобразования момента, кроме этого, параметры магнитных систем находятся во взаимном влиянии и должны быть четко согласованы между собой. При этом для данных машин является нормой насыщение некоторых элементов конструкции, что делает неэффективными аналитические подходы к расчету магнитных систем. Исследования электрических машин с тремя воздушными зазорами в основном выполнены применительно к электротранспорту (*Rasmussen et al., 2009; 2013; Frandsen et al., 2015a; б; Frandsen et al., 2013*), лишь недавно опубликована статья в области ветроэнергетики, рассматривающая генератор малой мощности – порядка 3 кВт (*Kjaer et al., 2020*).

Часть исследований электрических машин с двумя воздушными зазорами изучает двигатели (*Dragan et al., 2019; Bouheraoua et al., 2013; 2015*). Авторы (*Bouheraoua et al., 2013*) опубликовали работу, посвященную расчету аналитической модели, которая не учитывает насыщение стали, что критично для данного типа машин и, как следствие, такая модель обладает низкой точностью.

Проблема создания мощных и компактных электрических машин вызвана существующими принципиальными ограничениями тепловых и электромагнитных нагрузок в традиционных электрических машинах. При естественном способе охлаждения эти ограничения определяются предельными физическими свойствами традиционных электротехнических материалов. Поэтому для решения обозначенной проблемы многие исследователи рассматривают использование материалов, обладающих принципиально более высокими свойствами, например, объемных сверхпроводников и сверхпроводящих обмоток, что требует наличия дополнительных криогенных систем. По данным опубликованного отчета (*Abrahamsen et al., 2017*) генератор со встроенным трансформатором момента оказался выгоднее по технико-экономическим показателям, чем сверхпроводящий генератор. В выводе по отчету отмечено, что это связано с высокой стоимостью сверхпроводящих обмоток и низкой критической плотностью тока (*Abrahamsen et al., 2017*). В упомянутом отчете, как и в немногих статьях, мало информации о конкретных размерах, методиках проектирования магнитных систем, способах анализа и методиках расчета стоимости.

Наиболее перспективными для применения такого типа электрических машин являются регионы с экстремальными погодными условиями, в которых обозначенные проблемы мультипликаторов усиливаются многократно – из-за низкой температуры масло густеет и теряет свои свойства, металл зубчатых колес становится хрупким, что в сочетании с высокими динамическими нагрузками из-за порывов ветра увеличивает вероятность аварии.

Основная цель исследования состоит в решении проблемы создания низкоскоростных, высокомоментных и относительно компактных электрических генераторов, что позволит отказаться от зубчатой передачи без значительного увеличения массогабаритных показателей электрической машины и ее стоимости. Сравнительный анализ двух конструкций синхронного генератора прямого привода при одинаковых

массогабаритных параметрах дает возможность исследовать эффективность и надежность системы генерации электроэнергии в составе ветровой электростанции.

Материалы и методы

Синхронный генератор с магнитным редуктором, изображенный на рис. 1, состоит из нескольких основных компонентов: статор, тихоходный и быстроходный ротор. Статор состоит из кольцевого магнитопровода с закрепленными на внутренней поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами. Быстроходный ротор также является кольцевым магнитопроводом с закрепленными на внешней поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами. Тихоходный ротор состоит из сегментов, выполненных из магнитомягкого материала.

В работе рассмотрены две конструкции генератора со встроенным трансформатором момента – с двумя воздушными зазорами (рис. 1, а) и с тремя воздушными зазорами (рис. 1, б).

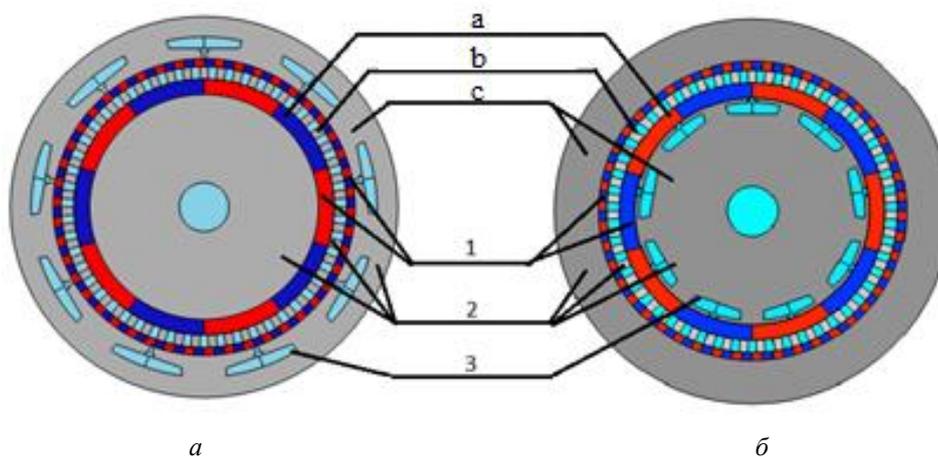


Рис. 1. Синхронный генератор со встроенным трансформатором момента:

а – конструкция синхронной машины с двумя воздушными зазорами,

б – конструкция синхронной машины с тремя воздушными зазорами:

1 – постоянные магниты, 2 – электротехническая сталь, 3 – обмотка,

а – быстроходный ротор, б – тихоходный ротор, с – статор

Fig. 1. Synchronous generator with an integrated torque transformer:

а – design of a synchronous machine with two air gaps,

б – design of a synchronous machine with three air gaps:

1 – permanent magnets, 2 – electrical steel, 3 – winding,

а – high-speed rotor, б – low-speed rotor, с – stator

Принцип работы синхронного генератора со встроенным трансформатором момента связан с модуляцией магнитного поля в воздушных зазорах между роторами и статором. Наличие магнитомягких вставок (модулятора) изменяет гармонический состав магнитного поля, вызываемого постоянными магнитами, что создает условия для устойчивого взаимодействия роторов. Магнитное колесо с меньшим количеством постоянных магнитов (ПМ) является быстроходным ротором, а колесо, модулирующее магнитное поле, является тихоходным ротором, к которому подключается ветроколесо. Неподвижная часть машины, на которой располагаются обмотки, называется статором.

Этот процесс взаимодействия делает генератор синхронным, и соотношение частот вращения магнитного поля статора и быстроходного ротора обратно пропорционально числу пар полюсов на них. Количество магнитомягких вставок тихоходного ротора определяется по формуле

$$n_r = p_s + p_r, \quad (1)$$

где p_s – число пар полюсов ПМ статора, p_r – число пар полюсов ПМ быстроходного ротора, n_r – количество сегментов тихоходного ротора.

Для сравнения конструкций генераторов были приняты одинаковые габаритные параметры магнитной системы: внешний диаметр электрических машин составляет 1 м, длина генератора – 1,5 м, ширина воздушных зазоров – 1 мм, количество пар полюсов ПМ быстроходного ротора – 5 и статора – 46, количество магнитомягких вставок тихоходного ротора составляет 51 сегмент, плотность тока в обмотке – 6 А/мм².

Постоянные магниты статора и роторов намагничены радиально. Основные отличия синхронных генераторов заключаются в количестве воздушных зазоров и в расположении обмоток статора. Трансформатор момента создан на основе коаксиальной магнитной передачи.

Расчет производится на основе метода конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics. Моделирование магнитных систем выполнено с помощью метода конечных элементов в 2D в статическом режиме работы со следующими допущениями:

- не учитывались краевые эффекты;
- магнитные свойства электротехнической стали задавались при помощи нелинейной кривой намагничивания;
- не учитывались магнитные потери на гистерезис и индуцированные токи;
- свойства постоянных магнитов задавались через остаточную магнитную индукцию и магнитную проницаемость.

При моделировании генераторы разделяются на три характерные области и уравнения (2–4) конкретизируются для каждой из них (рис. 1): область 1 – ПМ чередующейся полярности ($J = 0$); область 2 – магнитопровод из электротехнической стали ($B_r = 0, J = 0$); область 3 – обмотка, выполненная из меди ($B_r = 0$).

Расчетные уравнения в общем виде записываются на основе уравнений Максвелла в дифференциальной форме

$$\nabla \cdot B = 0; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = J; \quad (3)$$

$$B = \mu_0 \mu_r (H)H + B_r, \quad (4)$$

где B – вектор магнитной индукции, Тл; J – вектор плотности тока, А/мм²; B_r – вектор остаточной магнитной индукции, Тл; H – вектор напряженности магнитного поля, А/м; μ_0 – магнитная постоянная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость, которая зависит от модуля вектора напряженности магнитного поля H .

Граничные условия в общем виде могут быть представлены формулами

$$n \cdot (B_1 - B_2) = 0; \quad (5)$$

$$n \cdot (H_1 - H_2) = J; \quad (6)$$

$$n \cdot (B_{\text{вн}}) = 0, \quad (7)$$

где $B_1, B_2, B_{\text{вн}}$ – векторы магнитной индукции на границе смежных областей и на внешней границе модели, Тл; H_1, H_2 – векторы напряженности магнитного поля на границе смежных областей, А/м.

Материал постоянных магнитов выбран марки N42. Упрощенная схема обмотки: ...AA|C'C'|BB|A'A'|CC|B'B'... (рис. 2).

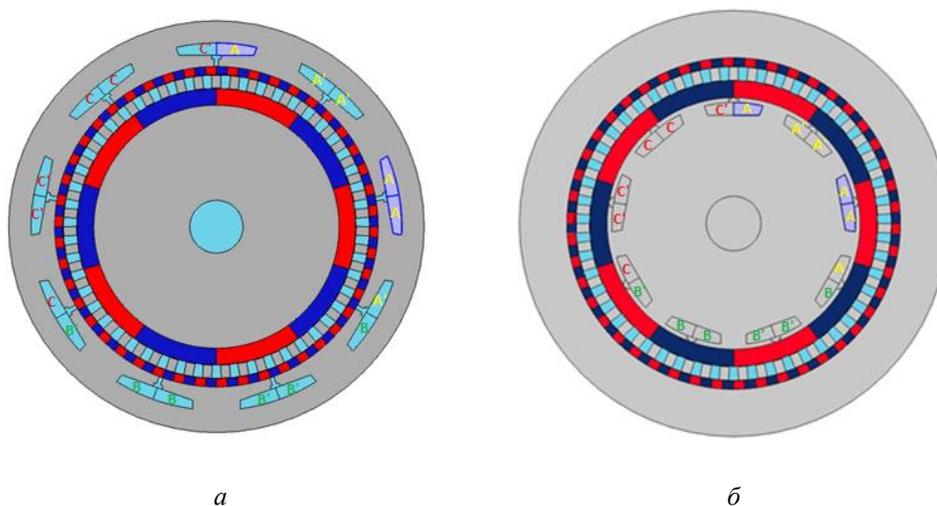


Рис. 2. Схема обмоток: *a* – конструкция синхронной машины с двумя воздушными зазорами, *б* – конструкция синхронной машины с тремя воздушными зазорами

Fig. 2. Winding diagram: *a* – design of a synchronous machine with two air gaps, *b* – design of a synchronous machine with three air gaps

Передаточное отношение трансформатора момента рассчитывается по формуле (8) и составляет 11,2

$$i = \frac{p_s}{p_r} + 1, \quad (8)$$

где p_s – число пар полюсов ПМ статора, p_r – число пар полюсов ПМ быстрого ротора, i – передаточное отношение.

Материал магнитопровода статора и роторов задается в соответствии с характеристикой намагничивания стали 2411. Расчет проводится в программном обеспечении Comsol Multiphysics с помощью встроенной физики Rotating Machinery, Magnetic.

В разделе Rotating Machinery, Magnetic задаются подразделы Ampère's Law, Force calculation, Continuity и Coil.

Подраздел Ampère's Law задается для каждого материала отдельно и в нем выбираются соответствующие элементы конструкции.

В подразделе Ampère's Law выбираются постоянные магниты: в одном подразделе выбираются постоянные магниты одной полярности, а в другом подразделе – противоположной полярности соответственно. В данном случае в подпункте Constitutive Relation B-H выбирается Remanent Flux Density, в строке r задается "1" для магнитов одной полярности и "-1" для магнитов противоположной полярности.

В разделе Force Calculation задаются вращающиеся части генератора и присваиваются названия сил в каждом разделе для дальнейшего расчета.

Плотность тока в фазах обмотки задается следующим образом:

$$\text{в фазе } A: J_z = J \text{ A/мм}^2,$$

$$A': J_z = -J \text{ A/мм}^2,$$

$$B: J_z = -J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$B': J_z = J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$C: J_z = -J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$C': J_z = J \text{ A/мм}^2.$$

Для задания токов в обмотке статоре добавляются разделы Coil для каждой фазы. В каждом из разделов необходимо задать ток фаз A, A', B, B', C, C' соответственно. Фазы выбираются согласно приведенной выше последовательности чередования фаз в обмотке статора.

В разделе Definitions добавляем подраздел Moving Mesh для области, которая вращается в процессе расчета. Для этого в Moving Mesh добавляем Rotating Domain, а затем в Domain Selection выбираются все элементы вращающейся части электрической машины. В Rotating Angle задается значение угла, на который будет происходить вращение.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты расчета амплитудного момента тихоходного ротора (M_{\max}), удельного момента на массу постоянных магнитов (M_m), рассчитанного по формуле (9), а также удельного момента на единицу объема, занимаемого машиной (M_v), рассчитанного по формуле (10) для двух конструкций синхронного генератора со встроенным трансформатором момента

$$M_m = \frac{M}{m_{\text{ПМ}}}; \quad (9)$$

$$M_v = \frac{M}{V}, \quad (10)$$

где M_v – момент на единицу объема, кН·м/м³; M_m – момент на массу ПМ, Н·м/кг; M – момент на тихоходном роторе, Н·м; i – передаточное отношение; V – объем машины, м³; $m_{\text{ПМ}}$ – масса ПМ, кг.

Таблица. Сравнение конструкций синхронного генератора со встроенным трансформатором момента
Table. Comparison of designs of a synchronous generator with a built-in torque transformer

С двумя воздушными зазорами			С тремя воздушными зазорами		
M_{\max} , кН·м	M_m , Н·м/кг	M_v , кН·м/м ³	M_{\max} , кН·м	M_m , Н·м/кг	M_v , кН·м/м ³
3,55	2,50	4,38	2,57	1,81	3,18

На рис. 3–4 представлены картины распределения линий магнитного потока в синхронных генераторах.

Из рис. 3–4 видно, что в системе с двумя воздушными зазорами линии магнитного поля расположены гуще и, соответственно, магнитное поле в данном исполнении сильнее. Также если обратить внимание на насыщение электротехнической стали, можно заметить, что в системе с тремя зазорами сталь менее насыщена и материал недоиспользуется, следовательно, срок окупаемости машины увеличивается.

Для сравнения конструкций генераторов рассчитаем по формуле (11) выходную мощность. Так как расчет проводился в 2D и краевые эффекты не были учтены, то возьмем запас момента 30 %. Типичная номинальная частота вращения ветрового колеса ветроагрегата мощностью 100 кВт – 50 об/мин (*Chen et al., 2005*)

$$P = \frac{M_{\max} \cdot \omega}{1,3}, \quad (11)$$

где P – выходная мощность генератора, Вт; M_{\max} – амплитудный момент тихоходного ротора, Н·м; ω – номинальная частота вращения, об/мин.

По полученным данным видно, что выходная мощность при одинаковых массогабаритных показателях больше у генератора с двумя воздушными зазорами и составляет 136,54 кВт, у генератора с тремя воздушными зазорами она составляет 98,85 кВт.

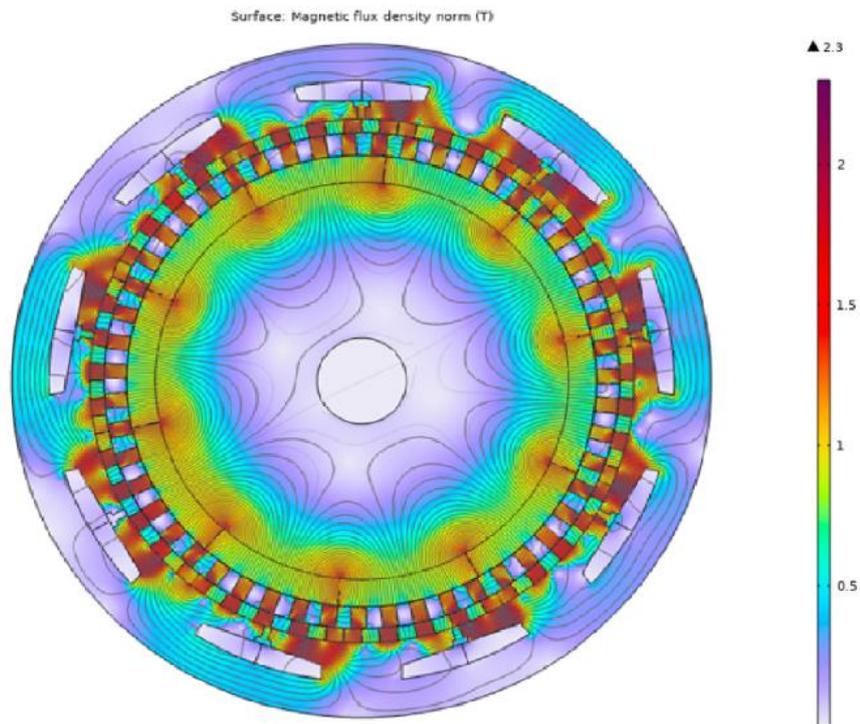


Рис. 3. Распределение линий магнитного потока для конструкции синхронной машины с двумя воздушными зазорами
Fig. 3. Distribution of magnetic flux lines for the design of a synchronous machine with two air gaps

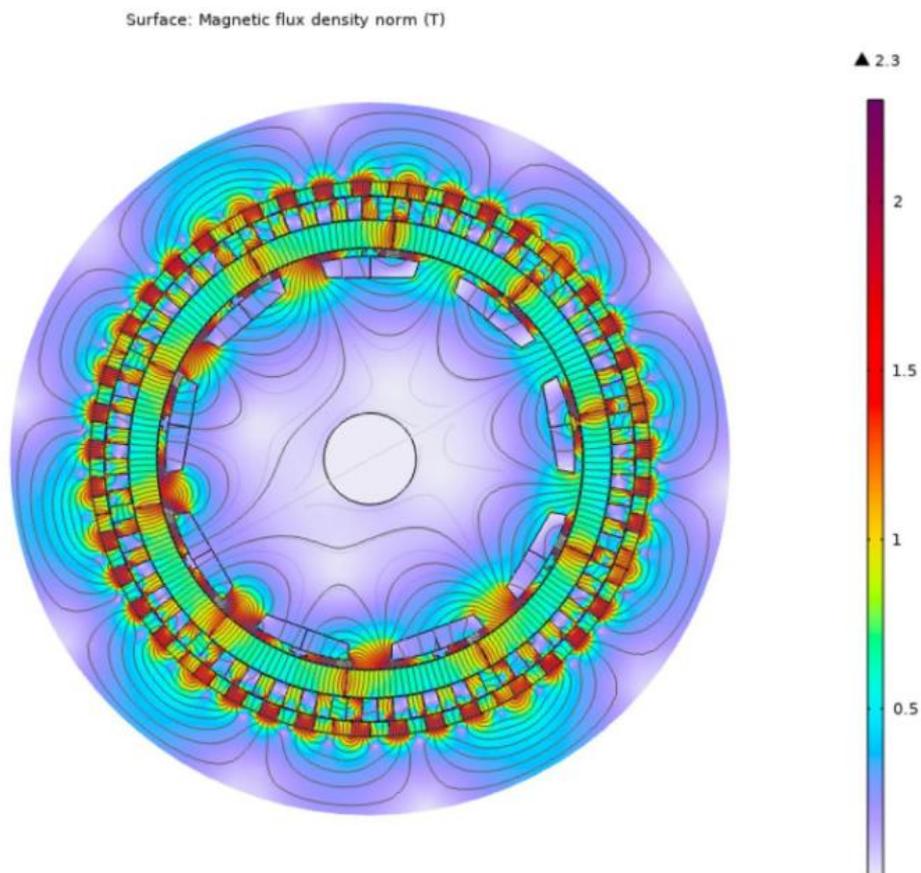


Рис. 4. Распределение линий магнитного потока для конструкции синхронной машины с тремя воздушными зазорами
Fig. 4. Distribution of magnetic flux lines for the design of a synchronous machine with three air gaps

По результатам расчета при уменьшенных массогабаритных показателях удалось получить большую выходную мощность (136,54 кВт) и высокий удельный момент на единицу объема генератора относительно системы прямого привода, в которых генератор, рассчитанный на мощность 100 кВт, имеет внешний диаметр статора 1,2 м и удельный момент на единицу объема генератора $30 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ (Grauers, 1996). Расчет момента показал, что в ВЭУ наиболее выгодно применять генераторы со встроенным трансформатором момента с двумя воздушными зазорами.

Заключение

Повышение удельного момента электрических машин является насущной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем. ВЭУ – одна из таких систем и определение оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента является актуальным исследованием для дальнейшего развития ветроэнергетики. Для получения выводов по оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента массогабаритные параметры двух рассматриваемых конструкций были приняты одинаковыми.

В работе рассматривались и сравнивались две конструкции синхронной машины со встроенным трансформатором момента, магнитный поток в которых создается постоянными магнитами, намагниченными радиально.

В генераторе с тремя воздушными зазорами наличие дополнительного воздушного зазора требует внесения в конструкцию генератора узла крепления ПМ, что осложняет процесс изготовления электрической машины, а также требует обеспечения более высокой точности центрирования тихоходного ротора.

Генератор с двумя воздушными зазорами имеет больший момент на единицу объема и момент на массу ПМ, т. е. при равных мощностях расходы на активные материалы будут меньше, что положительно скажется на сроке окупаемости ветроагрегата, при этом в таком генераторе обмотки статора располагаются на внешней части машины, что удобнее для их обслуживания и создает более благоприятные условия для охлаждения машины.

Аналитическое исследование конструкции электрической машины показало, что магнитное поле в системе с двумя воздушными зазорами имеет более высокую напряженность по сравнению с системой с тремя воздушными зазорами и использование электротехнической стали в конструкции с двумя воздушными зазорами более эффективно.

По результатам исследования можно сделать вывод, что генератор с двумя воздушными зазорами обладает более перспективной конструкцией по сравнению с генератором с тремя воздушными зазорами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта "Синхронный генератор со встроенным трансформатором момента для ветроагрегата арктического исполнения" при поддержке гранта Национального исследовательского университета "Московский энергетический институт" (НИУ "МЭИ") на реализацию программы научных исследований "Приоритет 2030: Технологии будущего" в 2022–2024 гг.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Abrahamsen, A. B., Henk, D. L. 2017. Final assessment of superconducting (SC) and Pseudo Direct Drive (PDD) generator performance indicators (PI's) : Report. [S. l.] : [S. n.], 51 p.
- Atallah, K., Calverley, S., Clark, R., Rens, J. et al. 2008. A new PM machine topology for low-speed, high-torque drives. 18th International Conference on Electrical Machines. Vilamoura, Portugal, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2008.4799909>.
- Bouheraoua, M., Wang, J., Atallah, K. 2013. Design and implementation of an observer-based state feedback controller for a pseudo direct drive. *IET Electric Power Applications*, 7(8), pp. 627–663. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0088>.
- Bouheraoua, M., Wang, J., Atallah, K. 2015. Slip recovery and prevention in pseudo direct drive permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), pp. 2291–2299. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2375387>.
- Chen, Y., Pillay, P., Khan, A. 2005. PM wind generator topologies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(6), pp. 1619–1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2005.858261>.
- Cheng, Y., Qu, R., Gao, Y., Wang, S. et al. 2020. Comparison of electromagnetic performance of 10-MW HTS double-stator flux modulation wind generators with different topologies. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), pp. 1–7. Article Number: 5202307. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2020.2975153>.
- Cooke, G., Atallah, K. 2017. "Pseudo" direct drive electrical machines with alternative winding configurations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), pp. 1–8. Article Number: 8111608. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2703662>.

- Dragan, R. S., Clark, R. E., Hussain, E. K., Atallah, K. et al. 2019. Magnetically geared pseudo direct drive for safety critical applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), pp. 1239–1249. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2873511>.
- Frandsen, T. V. et al. 2013. Motor integrated permanent magnet gear in a battery electrical vehicle. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA, pp. 2170–2177. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce.2013.6646975>.
- Frandsen, T. V. et al. 2015a. Motor integrated permanent magnet gear in a battery electrical vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), pp. 1516–1525. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2360016>.
- Frandsen, T. V., Rasmussen, P. O. 2015b. Slip torque investigation and magnetic redesign of motor integrated permanent magnet gear. 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pattaya, Thailand, pp. 929–935. DOI: <https://doi.org/10.1109/icems.2015.7385168>.
- Grauers, A. 1996. Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology (Technical Report No. 292).
- Kjaer, A. B., Korsgaard, S., Nielsen, S. S., Demsa, L. et al. 2020. Design, fabrication, test, and benchmark of a magnetically geared permanent magnet generator for wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), pp. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2019.2951998>.
- Li, K., Modaresahmadi, S., Williams, W. B., Bird, J. Z. et al. 2019. Electromagnetic analysis and experimental testing of a flux focusing wind turbine magnetic gearbox. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(3), pp. 1512–1521. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2019.2911966>.
- Liu, D., Polinder, H., Abrahamsen, A. B., Ferreira, J. A. 2017. Potential of partially superconducting generators for large direct-drive wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 27(5), pp. 1–11. Article Number: 5203711. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2707661>.
- Qu, R., Liu, Y., Wang, J. 2013. Review of superconducting generator topologies for direct-drive wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3). Article Number: 5201108. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2013.2241387>.
- Rasmussen, P. O., Frandsen, T. V., Jensen, K. K., Jessen, K. 2013. Experimental evaluation of a motor-integrated permanent-magnet gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(2), pp. 850–859. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2242423>.
- Rasmussen, P. O., Mortensen, H. H., Matzen, T. N., Jahns, T. M. et al. 2009. Motor integrated permanent magnet gear with a wide torque-speed range. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA, USA, pp. 1510–1518. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce.2009.5316280>.
- Wang, Q., Qin, X., Pfister, P.-D. 2018. A Vernier pseudo-direct-drive permanent-magnet machine. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Alexandroupoli, Greece, pp. 2023–2029. DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2018.8507174>.
- Zhu, X., Cheng, M. 2019. Design and analysis of 10 MW Class HTS exciting double stator direct-drive wind generator with stationary seal. *IEEE Access*, 7, pp. 51129–51139. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2911298>.

Сведения об авторах

Конюшенко Елизавета Владимировна – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", аспирант; e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Elizaveta V. Koniushenko – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", PhD Student; e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Рахманов Ильяс – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", аспирант; e-mail: RakhmanovI@mpei.ru

Ilias Rahmanov – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", PhD Student; e-mail: RakhmanovI@mpei.ru

Молоканов Олег Николаевич – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", канд. техн. наук; e-mail: Molokanovon@gmail.com

Oleg N. Molokanov – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", Cand. Sci. (Engineering); e-mail: Molokanovon@gmail.com

УДК 621.3.078

Система векторного управления автономным электроприводом

Т. Э. Муртазин*, А. А. Шевченко, В. Г. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия;

e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.09.2023;

получена
после доработки
21.09.2023;

принята к публикации
22.09.2023

Ключевые слова:

векторное управление,
имитационное
моделирование,
синхронный
электропривод,
система автономного
электропитания,
частотное
регулирование

Изучение и разработка автономных систем электропривода являются актуальными, поскольку такие системы широко распространены, особенно в отраслях морского и речного флота. Предложена имитационная модель автономного частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением и контуром активной мощности электродвигателя. Приведены результаты моделирования. Совершенствование системы управления направлено на увеличение экономичности, эффективности и надежности автономных электроприводов. Реализация контура активной мощности позволяет эффективно ограничивать потребляемую из генератора мощность, защищая от ее бросков, приводящих к останову дизель-генераторной установки. Регулирование активной мощности на валу более целесообразно для гребных электродвигателей по сравнению с регулированием скорости вращения вала. Создание единой системы управления автономным электроприводом позволяет учитывать взаимное влияние параметров электродвигателя и дизель-генераторной установки, в том числе для более эффективного регулирования напряжения и частоты установки с целью поддержания качества производимой электроэнергии на допустимом уровне. Объединение в единую систему позволит в дальнейшем интегрировать нейронные сети в качестве адаптивных нейросетевых регуляторов и систем-ассистентов. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя, а также качество энергетических параметров системы электропитания. Полученные результаты дают возможность сформировать требования к синхронным машинам, к полупроводниковым элементам силовой части и преобразователям. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

Для цитирования

Муртазин Т. Э. и др. Система векторного управления автономным электроприводом. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 449–456. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456>.

Vector control system for autonomous electric drive

Timur E. Murtazin*, Artem A. Shevchenko, Vladimir G. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Article info

Received
01.09.2023;

received
in revised form
21.09.2023;

accepted
22.09.2023

Key words:

vector control,
simulation modeling,
synchronous
electric drive,
autonomous power
supply system,
frequency control

Abstract

The study and development of autonomous electric drive systems are relevant, since currently such systems are widespread especially in the marine and river fleet industries. A simulation model of an autonomous frequency-controlled synchronous electric drive with vector control and active power circuit of an electric motor has been proposed. Simulation results have been presented. The improvement of the control system is aimed at increasing the efficiency and reliability of autonomous electric drives. The implementation of the active power circuit allows one to effectively limit the power consumed from the generator, protecting it from surges that lead to the shutdown of the diesel generator set. The regulation of the active power on the shaft is more appropriate for electric propeller drives than the regulation of the shaft rotation speed. The creation of a unified control system for an autonomous electric drive makes it possible to take into account the mutual influence of parameters of the diesel generator set and the electric motor, including more efficient regulation of the voltage and frequency of the generator in order to maintain the quality of electricity produced at an acceptable level. The integration into a single system will further integrate neural networks as adaptive neural network regulators and Virtual Assistant systems. Modern simulation software makes it possible at the design stage to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of the electric motor, as well as the quality of energy parameters of the power supply system. Based on the results obtained, it is possible to form requirements for synchronous machines, for semiconductor elements of the power part and converters. The simulation results confirm the correctness of the adjustment of the control circuits and allow us to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

For citation

Murtazin, T. E. et al. 2023. Vector control system for autonomous electric drive. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 449–456. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456>.

Введение

Автономные системы электроприводов находят применение там, где невозможно организовать электроснабжение от основной сети общего назначения, а именно: удаленные сельскохозяйственные предприятия, суда различных отраслей морского и речного флотов, удаленные насосные станции и др. Ввиду ряда преимуществ, таких как экономичность и быстрый ввод в эксплуатацию, наибольшее распространение на сегодняшний день получили установки типа дизель-генератор – двигатель переменного тока (Алешков и др., 2009; Григорьев и др., 2014). Вопросы снижения потребления топлива дизельным двигателем, а также повышения эффективности и надежности электропривода не перестают быть актуальными. При организации электроснабжения потребителей от дизель-генератора, помимо главного электропривода, особенно остро встают вопросы о поддержании надлежащего качества электроэнергии и бесперебойности эксплуатации (Соколовский, 2006; Тихомиров и др., 2010; Михеев, 2016; Терехов и др., 2005).

В статье рассматриваются вопросы имитационного математического моделирования единой системы управления автономным частотно-регулируемым синхронным электроприводом с контуром активной мощности и стабилизацией напряжения генератора.

Материалы и методы

ГОСТ 32144-2013¹ устанавливает общие требования к предельно-допустимым длительным отклонениям величины и частоты питающего напряжения: $\pm 2\%$ от номинального значения для частоты и $\pm 10\%$ от номинального значения для амплитуды. Вместе с тем кратковременный скачок частоты допускается в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения.

Также необходимо учитывать, что превышение потребляемой из генератора мощности свыше 105–110 % от номинального уровня может привести к перегрузке агрегата, снижению срока эксплуатации из-за длительной работы на предельных режимах, существенному расходу топлива. При этом из-за большого превышения может произойти останов дизельного двигателя. Таким образом, система управления должна поддерживать скорость вращения дизельного двигателя и напряжение на обмотке возбуждения на номинальном значении для поддержания частоты и амплитуды выходного напряжения соответственно. Для ограничения и регулирования потребляемой электроприводом мощности предлагается использование векторного управления синхронным электродвигателем с контуром мощности. Возможности векторного управления позволяют вычислять момент без применения сложных систем датчиков (Фролов и др., 2018; Калачев, 2013). Для этого необходимо знать лишь потокосцепление ротора, которое остается постоянным для синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе, и значение проекции тока статора на ось q , которое определяется путем координатных преобразований сигналов с датчиков тока статора. Иными словами, при помощи датчиков тока и положения можно вычислить активную мощность на валу и сигнал обратной связи на регулятор мощности.

Составление имитационной модели и моделирование будет производиться в ПО Matlab Simulink (Дьяконов, 2008; 2012). Параметры синхронного генератора и синхронного двигателя с постоянными магнитами сведены в таблице. Мощность дизельного двигателя равна 7 000 кВт.

Таблица. Параметры электрических машин
Table. Parameters of electric machines

Синхронный генератор		Синхронный двигатель	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальная мощность, S , ВА	6 500 000	Номинальная мощность, S , ВА	5 150 000
Номинальное линейное напряжение, U_n , В	6 300	Номинальное линейное напряжение, U_n , В	6 300
Номинальная частота напряжения, f , Гц	50	Номинальная частота питающего напряжения, f , Гц	50
Число пар полюсов, p	2	Тип возбуждения	постоянные магниты
Номинальная скорость, n , об/мин	1 500	Число пар полюсов, p	5
Тип ротора	явнополюсный	Форма обратной ЭДС	синусоидальная
Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,0164	Тип ротора	неявнополюсный

¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М., 2014.

Индуктивное сопротивление $X_{d'}$, о.е.	1,856	Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,093
Индуктивное сопротивление $X_{d''}$, о.е.	0,242	Индуктивность фазы статора L_s , Гн	0,002
Индуктивное сопротивление $X_{q''}$, о.е.	0,168	Момент инерции ротора, J , кг·м ²	3 781
Индуктивное сопротивление $X_{q'}$, о.е.	1,375		
Индуктивное сопротивление X_q'' , о.е.	0,195		
Индуктивное сопротивление X_l , о.е.	0,13		

На основе представленных параметров и выше обозначенных особенностей системы управления разработана математическая имитационная модель (рис. 1).

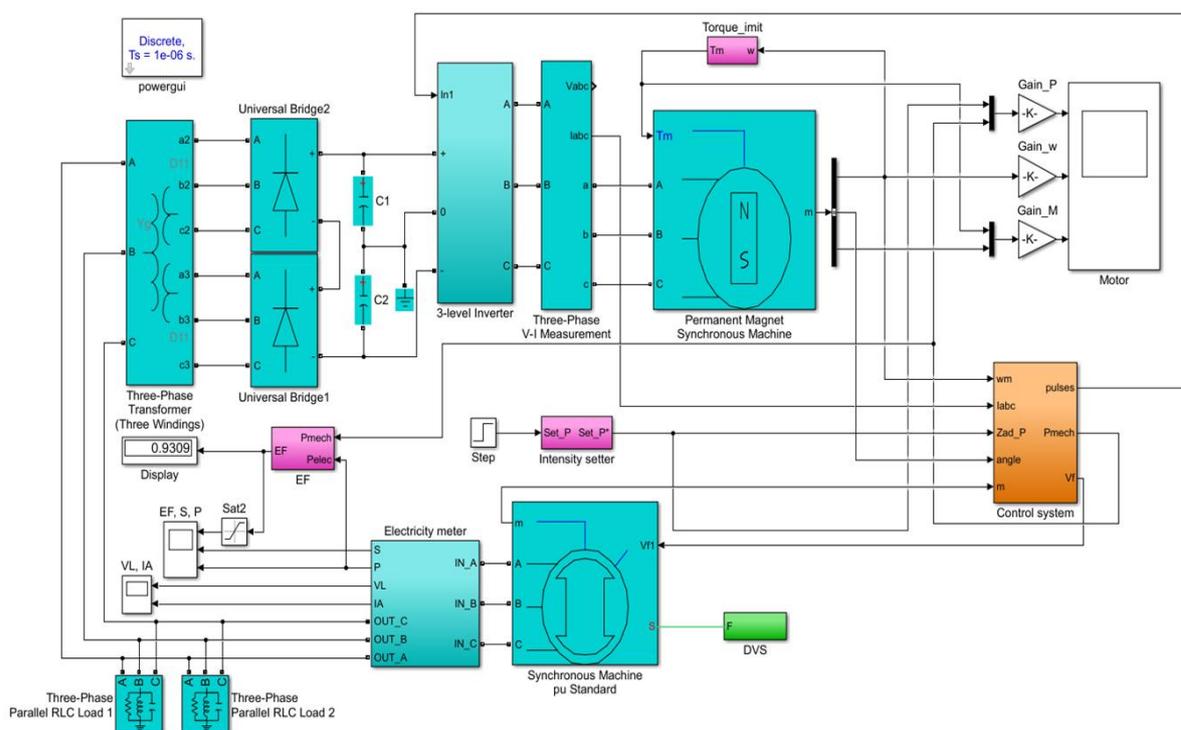


Рис. 1. Модель автономной системы синхронного электропривода
 Fig. 1. Model of an autonomous synchronous electric drive system

Блок 3-level Inverter, построенный на базе IGBT транзисторов, получает питание от синхронного генератора Synchronous Machine pu Standard через выпрямители Universal Bridge, которые подключены к обмоткам понижающего трансформатора с расщепленной обмоткой. Затем через блок измерений Three-Phase V-I Measurement напряжение поступает на двигатель. Блок Electricity meter рассчитывает потребляемую из генератора полную и активную мощность, а также действующие значения потребляемого напряжения и тока.

С помощью элемента Bus selector и осциллографа Motor будем наблюдать за сигналами двигателя. Блок Torque simulation имитирует на валу двигателя центробежную нагрузку. Блок EF рассчитывает КПД электропривода и выводит значение на элемент Display. Механическая мощность на вход синхронного генератора приходит с блока DVS, в котором реализована система стабилизации скорости двигателя с ПИ-регулятором (рис. 2).

На рис. 3 представлена внутренняя структура блока Control system.

Блок Excitation System совершает регулирование и стабилизацию напряжения синхронного генератора путем воздействия на напряжение обмотки возбуждения.

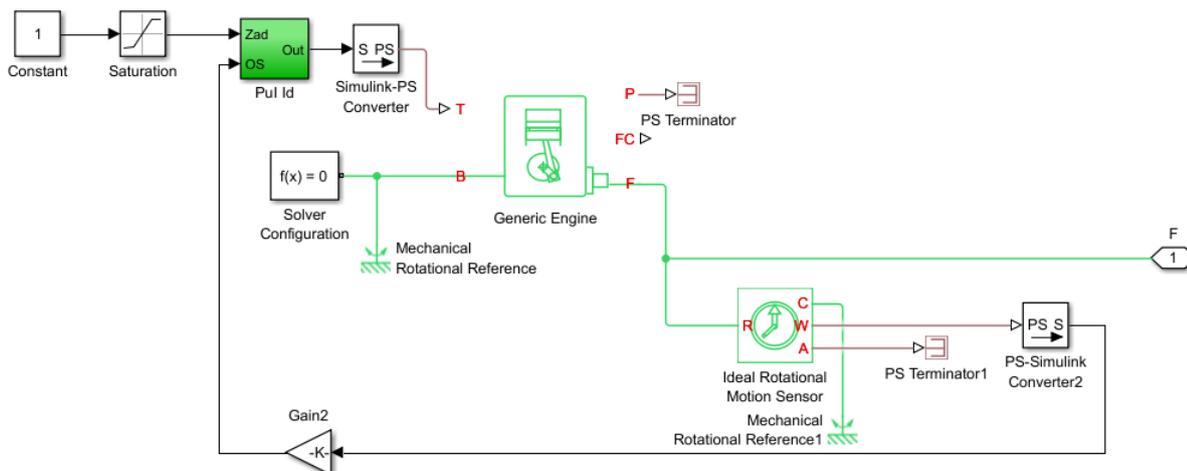


Рис. 2. Структура системы стабилизации скорости дизельного двигателя
Fig. 2. Structure of the diesel engine speed stabilization system

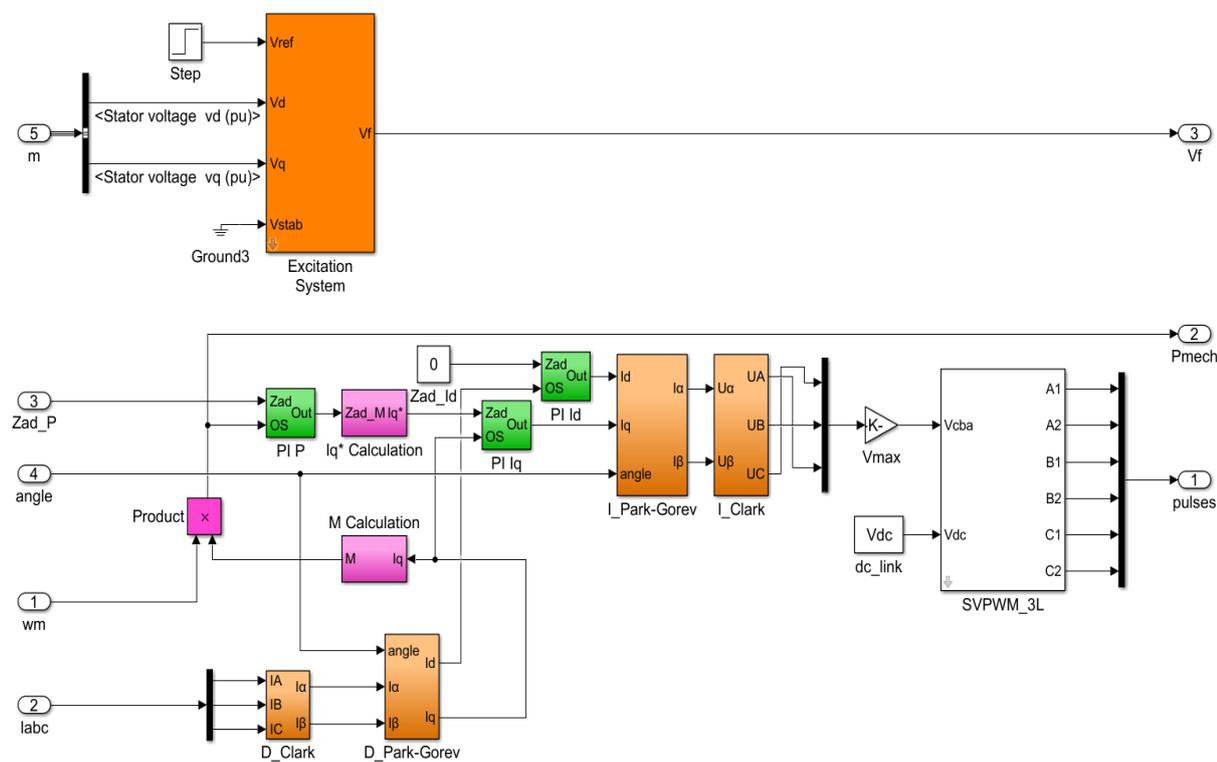


Рис. 3. Структура системы управления
Fig. 3. Structure of the control system

Блоки D_Clark, D_Park-Gorev, I_Park-Gorev и I_Clark осуществляют координатные преобразования. Блок Iq* Calculation производит вычисление задания на ток по оси q. Блоки Filter Id и Filter Iq предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси d и q соответственно от высокочастотных искажений. Блоки PI Id и PI Iq являются ПИ-регуляторами токов Id и Iq соответственно. Блок PI P – ПИ-регулятор активной мощности. Блок M Calculation вычисляет момент на валу электродвигателя. Элемент Product вычисляет механическую мощность на валу путем перемножения скорости вращения вала двигателя на электромагнитный момент.

Система управления формирует сигналы напряжения UA, UB и UC. Для реализации данных векторов использован блок ШИМ SVPWM_3L, который на основе этих сигналов подает импульсы частотой 2 кГц на затворы транзисторов инвертора.

Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур активной мощности. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, то можно использовать методы подбора.

При помощи метода Циглера – Никольса² определяем коэффициенты регуляторов токов и мощности. Номинальные параметры: механическая мощность на валу двигателя – 4 650 000 Вт, скорость вращения – 62,83 рад/с, момент двигателя – 74 000 Нм, напряжение – 6 300 В, ток двигателя – 470 А, полная мощность двигателя – 5 150 000 ВА.

Результаты и обсуждение

Результатом моделирования являются временные диаграммы переходных процессов системы при пуске электродвигателя на центробежную нагрузку с заданием 100 % мощности (рис. 4–6).

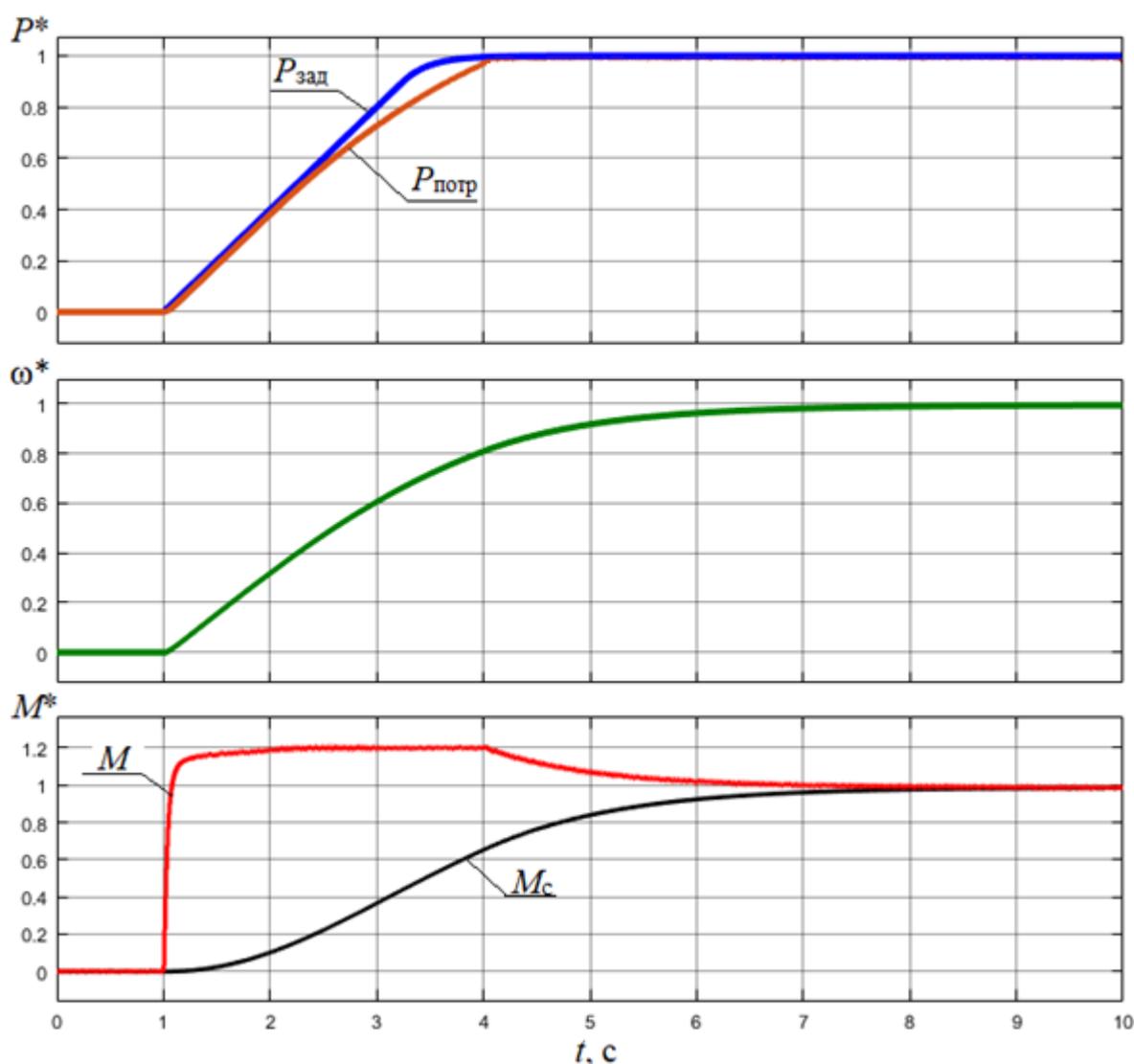


Рис. 4. Переходные процессы синхронного электродвигателя при пуске
Fig. 4. Transients of a synchronous electric motor at start-up

² Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера – Никольса: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 "Электроника и нанoeлектроника" и 201000 "Биотехнические системы и технологии" / сост. О. С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.

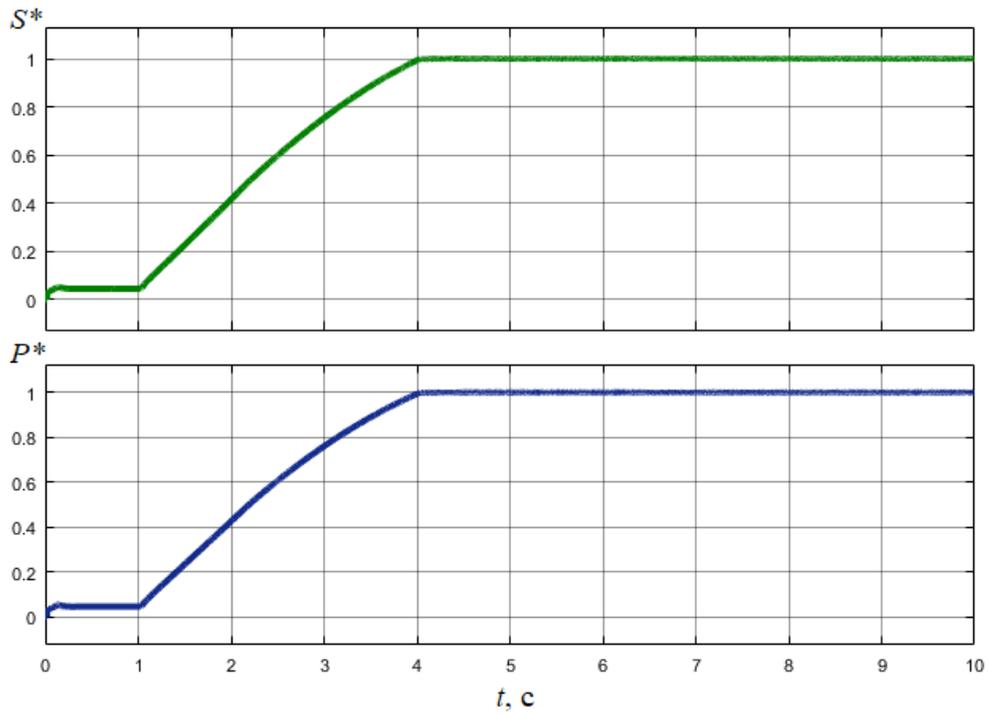


Рис. 5. Переходные процессы энергетических параметров при пуске двигателя
Fig. 5. Transients of energy parameters during motor start-up

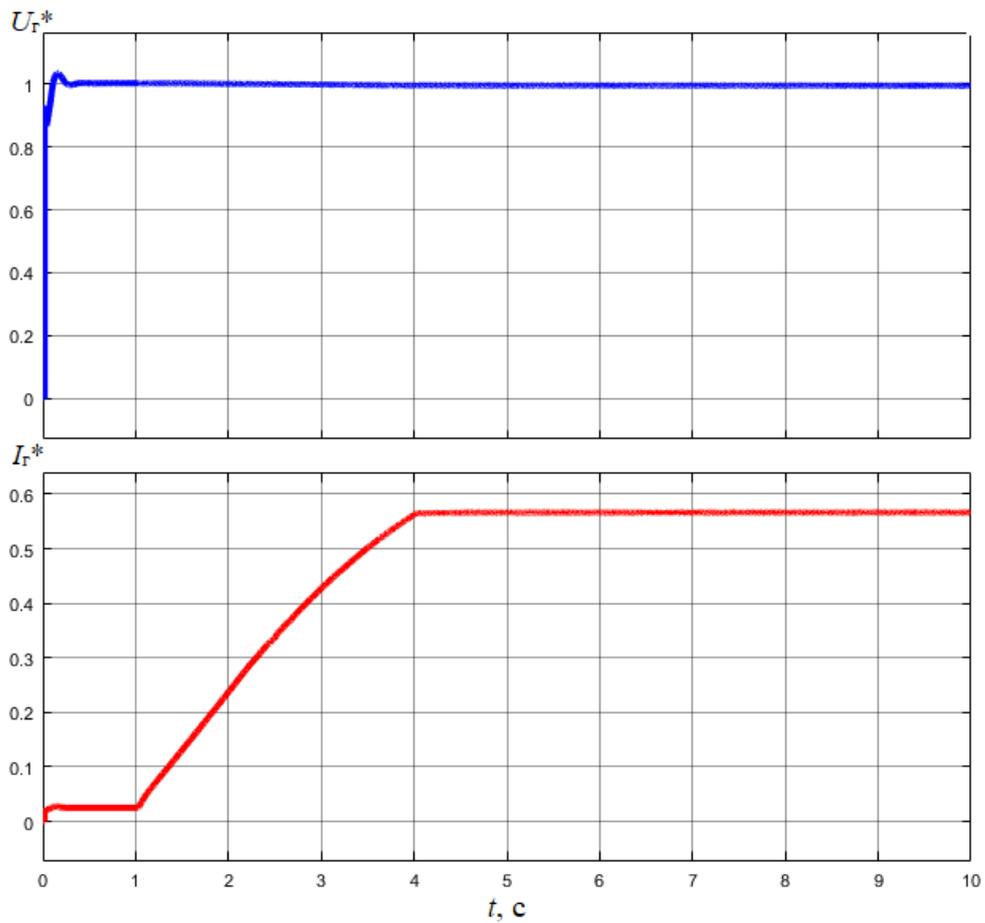


Рис. 6. Переходные процессы синхронного генератора при пуске двигателя
Fig. 6. Transients of the synchronous generator during motor start-up

Из рисунков видно, что активная мощность на валу двигателя с практически отсутствующей динамической ошибкой плавно выходит на установившееся значение без скачков и перерегулирования. Начальный наброс момента электродвигателя практически не повлиял на работу генератора и качество производимой электроэнергии. Потребляемая из генератора мощность также без скачков вышла на установившееся значение, не превышая ограничения в 105 %. По показаниям дисплея видно, что КПД электропривода в установившемся режиме составляет 93,09 %.

Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант автономной системы частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением отвечает заявленным требованиям к энергетическим, механическим и электрическим параметрам. Использование контура активной мощности позволило исключить скачки потребляемой мощности в пусковых режимах, тем самым обеспечив бесперебойность работы и повысив живучесть дизель-генераторной установки.

В дальнейшем планируется интегрировать в предложенную единую систему управления нейронные сети в качестве адаптивных нейросетевых регуляторов и систем-ассистентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алешков О. А., Малоземов А. А. Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе // Ползуновский вестник. 2009. № 1–2. С. 199–207. EDN: KZCOZD.
- Григорьев А. В., Колесниченко В. Ю. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. № 6(28). С. 39–43. EDN: TDOCER.
- Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2012. 768 с.
- Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2008. 784 с.
- Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 72 с. URL: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf.
- Михеев Е. А. Частотное регулирование электропривода // Символ науки. 2016. № 11–3(23). С. 124–126. EDN: XBWXDR.
- Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М. : Академия, 2006. 265 с.
- Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М. : Academia, 2005. 304 с.
- Тихомиров В. А., Титов В. Г., Хватов С. В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2010. № 4(83). С. 190–204. EDN: NUXRFV.
- Фролов В. Я., Жилиготовов Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92>. EDN: QKTHBV.

References

- Aleshkov, O. A., Malozemov, A. A. 2009. Improving the fuel efficiency of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode of a primary diesel engine in its composition. *Polzunovskiy Vestnik*, 1–2, pp. 199–207. EDN: KZCOZD. (In Russ.)
- Grigoriev, A. V., Kolesnichenko, V. Yu. 2014. Improving the efficiency of operation of marine diesel power plants. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova*, 6(28). С. 39–43. EDN: TDOCER. (In Russ.)
- Diakonov, V. P. 2012. MATLAB. Complete tutorial. Moscow. (In Russ.)
- Diakonov, V. P. 2008. Simulink 5/6/7: Self-help. Moscow. (In Russ.)
- Kalachev, Yu. N. 2013. Vector regulation (notes of practice). Moscow. URL: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf. (In Russ.)
- Mikheev, E. A. 2016. Frequency regulation of electric drive. *Symbol of Science*, 11–3(23), pp. 124–126. EDN: XBWXDR. (In Russ.)
- Sokolovsky, G. G. 2006. Alternating current electric drives with frequency control. Moscow. (In Russ.)

- Terekhov, V. M., Osipov, O. I. 2005. Control systems of electric drives. Moscow. (In Russ.)
- Tikhomirov, V. A., Titov, V. G., Khvatov, S. V. 2010. Technical and economic aspects of the use of regulated DC and AC drives. *Transactions of NNSTU n. a. R. E. Alekseev*, 4(83), pp. 190–204. EDN: NUXRFV. (In Russ.)
- Frolov, V. Ya., Zhilgotov, R. I. 2018. Development of a sensor-free vector control system for a synchronous motor with permanent magnets in Matlab Simulink. *Journal of Mining Institute*, 229, pp. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92>. EDN: QKTHBV. (In Russ.)

Сведения об авторах

Муртазин Тимур Эмильевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, аспирант;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Timur E. Murtazin – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, PhD Student;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Шевченко Артем Алексеевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, аспирант;
e-mail: shevchenko2023@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6909-9609>

Artem A. Shevchenko – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, PhD Student;
e-mail: shevchenko2023@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6909-9609>

Титов Владимир Георгиевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, д-р техн. наук,
профессор; e-mail: eos@nntu.ru

Vladimir G. Titov – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: eos@nntu.ru

УДК 621.316.15

Метод расчета места однофазного замыкания на землю на фидере древовидной структуры по ограниченной информации о распределении напряжений нулевой последовательности

А. И. Федотов, Г. В. Вагапов*, Р. Э. Абдуллазянов, Е. А. Федотов
*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: vagapov@list.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.09.2023;

получена
после доработки
25.09.2023;

принята к публикации
26.09.2023

Ключевые слова:

однофазные замыкания
на землю,
воздушная линия,
напряжение нулевой
последовательности,
измерительный
трансформатор
напряжения,
параметры аварийного
режима,
алгоритм расчета

Ограничение зоны топографического поиска места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) воздушных линий электропередачи (ВЛ) в электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–10–35 кВ является одной из ключевых задач в области повышения надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей электроэнергетики. Вовремя не устраненное ОЗЗ может привести к выходу из строя электрооборудования. В засушливый период токи замыкания могут инициировать низовой пожар, что требует превентивного отключения линий электропередачи с последующим экономическим ущербом для электроснабжающих организаций. В статье предлагается использование параметров аварийного режима, а именно напряжений нулевой последовательности, в целях определения расчетным образом мест повреждения. Необходимость дополнительной установки на конечных подстанциях измерительных трансформаторов напряжения (ТН) сопряжена с финансовыми затратами. В связи с этим рассматривается возможность их ограниченного применения. Показано, что в этом случае может быть локализован аварийный участок с точностью до отпайки, если на ней отсутствуют измерительные ТН. Для расчетов места ОЗЗ используется математическая модель линий с распределенными параметрами. В качестве полезных рассматриваются сигналы на высших гармониках (ВГ), которые генерируются в электрической сети дугowymi замыканиями. Натурные эксперименты показывают наличие ВГ и при электрических контактах проводов с металлоконструкциями. Высокая частота сигнала обуславливает значимое изменение напряжения по длине линии, что повышает точность расчетов. Применение напряжений нулевой последовательности способствует отстройке от влияния нагрузки подстанций. Разработан алгоритм выполнения расчетов по определению места/участка с ОЗЗ на фидере древовидной структуры.

Для цитирования

Федотов А. И. и др. Метод расчета места ОЗЗ на фидере древовидной структуры по ограниченной информации о распределении напряжений нулевой последовательности. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 457–471. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-457-471>.

The single phase-to-ground fault location calculation method based on limited information on the distribution of zero-sequence voltages on the tree-structured feeder

Alexander I. Fedotov, Georgii V. Vagapov*, Rustem E. Abdullazyanov, Evgeny A. Fedotov
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: vagapov@list.ru

Article info

Received
08.09.2023;

received
in revised form
25.09.2023;

accepted
26.09.2023

Key words:

single phase-to-ground
faults,
overhead line,
zero sequence voltage,
measuring voltage
transformer,
emergency mode
parameters,
calculation algorithm

For citation

Abstract

One of the key goals in the overhead power lines at the isolated neutral system 6–10–35 kV is topographic search area limitation for a single phase-to-ground (SPG) fault. This will ensure reliability improvement warranty and continuity of power supply. No fault founded in time can lead to failure of electrical equipment. Faults can initiate a ground fire in dry-weather period, which requires preventive shutdown of power lines with subsequent economic damage to power supply organizations. The paper proposes the use of emergency mode parameters, namely, zero-sequence voltages, in order to determine the faults locations in a calculated way. The need for additional installation of measuring voltage transformers at terminal substations is associated with some financial costs. In this regard, the possibility of their limited use is being considered. It has been shown that in this case the emergency section can be localized with accuracy down to the tap if there are no measuring voltage transformers on it. To calculate the SPG location, a mathematical model of lines with distributed parameters has been used. Signals at higher harmonics (HH) generated in the electrical network by arc faults, are considered useful. Full-scale experiments show the HH presence also during electrical contacts of wires with metal structures. The high frequency of the signal causes a significant change in voltage along the length of the line, which increases the accuracy of calculations. The use of zero sequence voltages promotes detuning from the influence of substation load. An algorithm has been developed for performing calculations to determine the location/area with a ground protection zone on a tree-structure feeder.

Fedotov, A. I. et al. 2023. The single phase-to-ground fault location calculation method based on limited information on the distribution of zero-sequence voltages on the tree-structured feeder. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 457–471. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-457-471>.

Введение

Проблема расчетного определения места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях с изолированной нейтралью хорошо известна (Нудельман и др., 1997; Олейник и др., 2002; Шалин и др., 2002; 2005; Ширковец и др., 2008; 2018; Сарин и др., 2008; Качесов и др., 2010; Горюнов и др., 2011; Попов и др., 2018; Валов и др., 2019; Chang et al., 2022; Paul, 2017). Она решается в основном по четырем крупным научным направлениям. Во-первых, это использование различных зондирующих сигналов, анализ отклика исследуемой системы на которые предоставляет информацию о месте повреждения (Минуллин и др., 2003; Семёнов и др., 2019; Касимов, 2019; Федотов и др., 2023; Jia et al., 2018). Во-вторых, это установка различных датчиков с системами дистанционной передачи информации, которые отслеживают режимы работы участков электропередачи¹ (Хузяшев, 2008; Киржацких, 2022). По результатам измерений может быть выделен аварийный участок, ограниченный точками установки датчиков, либо в некоторых случаях спрогнозировано место ОЗЗ на данном участке. В-третьих, это использование аварийных параметров режима, связанных с расстоянием до ОЗЗ, в том числе и за счет принудительного увеличения тока замыкания (Шалин и др., 2000; Абдуллазянов, 2013; Fedotov et al., 2016; 2017; Нагай и др., 2017; Федотов и др., 2022; Xin et al., 2021). Тогда хорошо работают методы, апробированные применительно к сетям с эффективным заземлением нейтрали, где величина аварийного тока непосредственно зависит от расстояния до места замыкания. Поскольку измерения производятся в центре питания (ЦП), в результате будут получены несколько возможных точек с ОЗЗ на фидере древовидной структуры, что уже можно считать хорошим результатом в сравнении с полным отсутствием информации о предполагаемом месте повреждения. И наконец, использование информации с потребительских подстанций о параметрах аварийного режима, которая в совокупности полученных измерений способна указать либо на потенциальные участки с ОЗЗ, либо конкретизировать его место (Ваганов и др., 2014; Fedotov et al., 2019; Федотов и др., 2019; 2020). Возможно, например, и комплексное сочетание перечисленных направлений, когда показания датчиков используются в различных математических моделях электропередач, связывающих их показания с местом ОЗЗ или же с весьма ограниченным участком ВЛ.

Не останавливаясь подробно на всех перечисленных подходах, которые имеют как достоинства, так и недостатки, что присуще любому методу, и оставаясь в рамках четвертого направления, покажем, что посредством относительно небольших затрат на дополнительное электрооборудование, можно в значительной мере ускорить обнаружение места ОЗЗ, существенно ограничив зону топографического его поиска. Для этого предлагается на нескольких удаленных подстанциях 10/0,4 кВ установка с высокой их стороны измерительных трансформаторов напряжения с вторичной обмоткой нулевой последовательности (ТННП). Передача в ЦП величины напряжения НП, осуществляющуюся через интеллектуальные приборы учета электроэнергии, позволит получить информацию, на основе которой можно выполнять расчеты по определению места ОЗЗ. Достоинства параметров НП заключаются в том, что на них не влияет величина нагрузки на подстанциях. И если их абсолютная величина еще зависит от значения переходного сопротивления, то относительные величины целиком обуславливаются только погонными сопротивлениями ВЛ и, что самое важное, топологией схемы фидера.

Теоретические основы метода использования напряжений НП

Для определения закономерности изменения тока и напряжения ВГ в зависимости от удаленности места измерения от точки поперечной несимметрии рассмотрим схему (рис. 1), где к фазе "А" ВЛ подключен гармонический источник $e(n)$ n -й высшей гармоники.

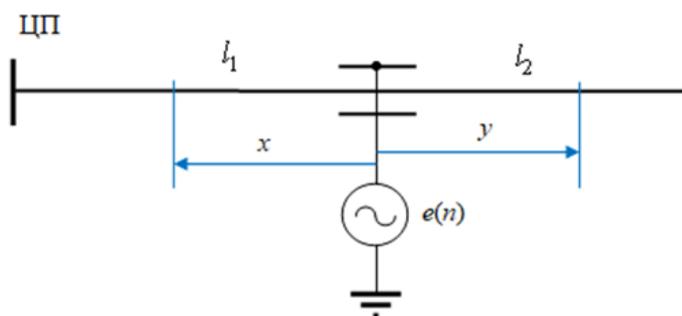


Рис. 1. Линия электропередачи с подключенным гармоническим источником

Fig. 1. Power line with connected harmonic source

¹ Индикаторы короткого замыкания ИКЗ // Официальный сайт компании "Антракс". URL: <https://antraks.ru/produksiya/indikatory-avarijnogo-protssesa-ikz> (дата обращения: 24.09.2021).

Для участка воздушной линии с распределенными параметрами используем известные уравнения между токами и напряжениями (Рыжов, 2007), справедливые для любой последовательности симметричных составляющих. Запишем связь параметров режима для начального участка ВЛ

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\beta x) & -jz_c \sin(n\beta x) \\ -j\frac{1}{z_c} \sin(n\beta x) & \cos(n\beta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где \dot{U}_x и \dot{I}_x – напряжение и ток на расстоянии x от начала ВЛ, \dot{U} и \dot{I} – напряжение в узле, принятом за начало ВЛ, и отходящий ток. За начало ВЛ принимается точка поперечной несимметрии.

Применительно к прямой и обратной последовательностям (ПП и ОП) параметров режима в системе уравнений (1) следует принять

$$\dot{U} = \dot{U}^{(1,2)} \text{ и } \dot{I} = \dot{I}_1^{(1,2)}. \quad (2)$$

Тогда

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x^{(1,2)} \\ \dot{I}_x^{(1,2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\beta x) & -jz_c \sin(n\beta x) \\ -j\frac{1}{z_c} \sin(n\beta x) & \cos(n\beta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1,2)} \\ \dot{I}_1^{(1,2)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из схемы замещения (рис. 2), видно, что

$$\dot{I}_1^{(1,2)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(1,2)}}{\dot{z}_1^{(1,2)} + \dot{z}_2^{(1,2)}}, \quad \dot{I}_2^{(1)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_1^{(1,2)}}{\dot{z}_1^{(1,2)} + \dot{z}_2^{(1,2)}}, \quad (4)$$

где $\dot{z}_1^{(1,2)}$ и $\dot{z}_2^{(1,2)}$ – сопротивления левой и правой частей схемы по ПП и ОП.

На схеме (рис. 2) нижние индексы соответствуют начальному (1) и конечному (2) участкам ВЛ, верхние индексы (1, 2, 0) соответствуют параметрам ПП, ОП и НП; $\dot{z}_k^{(1,2)}$ – внутреннее сопротивление источника питания; $\dot{z}_n^{(1,2)}$ – сопротивление нагрузки на конце ВЛ; $\dot{E}(n)$ – ЭДС n -й гармоники в месте ОЗЗ (учитывает переходное сопротивление); $L_{1,2}^{(1,2,0)}$ – четырехполюсники схем замещения участков ВЛ.

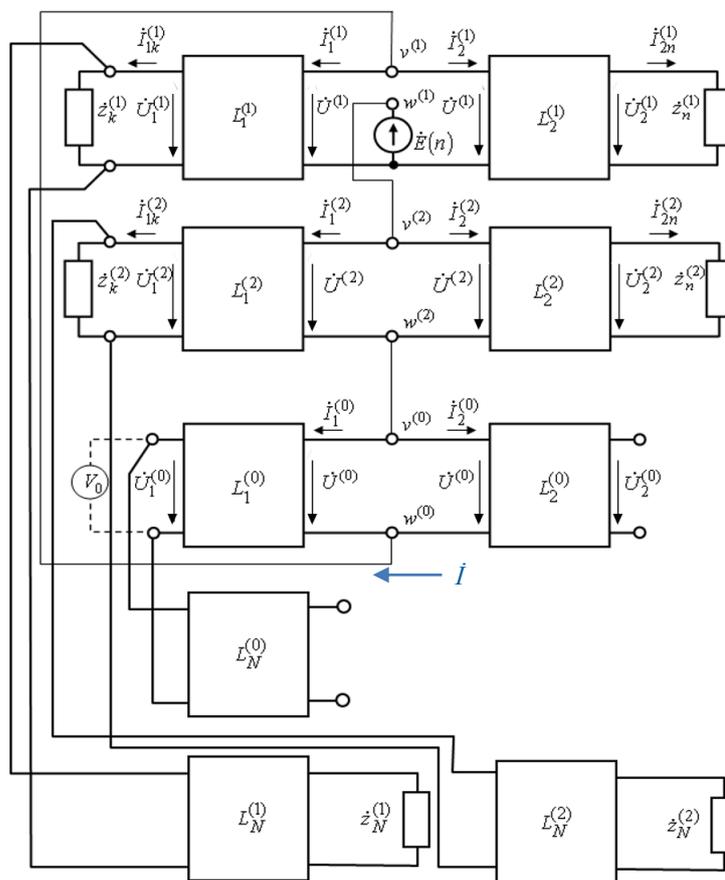


Рис. 2. Схема замещения фидера в режиме ОЗЗ с учетом всех присоединений
 Fig. 2. Feeder equivalent circuit in the SPG mode taking into account all connections

Подставляя соотношения (4) в выражения (3), приводим их к следующему виду, опуская верхний индекс "2":

$$\dot{U}_x^{(1)} = \cos(n\beta x)\dot{U}^{(1)} - jz_c \sin(n\beta x)\dot{I}_1^{(1)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(1)}}{\dot{z}_1^{(1)} + \dot{z}_2^{(1)}} \left\{ \cos(n\beta x)z_1^{(1)} - jz_c \sin(n\beta x) \right\}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_x^{(1)} = -j \frac{1}{z_c} \sin(n\beta x)\dot{U}^{(1)} + \cos(n\beta x)\dot{I}_1^{(1)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(1)}}{\dot{z}_1^{(1)} + \dot{z}_2^{(1)}} \left\{ -j \sin(n\beta x) \frac{z_1^{(1)}}{z_c} + \cos(n\beta x) \right\}, \quad (6)$$

где

$$\dot{z}_1^{(1)} = jz_c \frac{nx_k + z_c \operatorname{tg}(n\beta l_1)}{z_c - nx_k \operatorname{tg}(n\beta l_1)}, \quad \dot{z}_2^{(1)} = z_c \frac{\dot{z}_n^{(1)} + jz_c \operatorname{tg}(n\beta l_2)}{z_c + j\dot{z}_n^{(1)} \operatorname{tg}(n\beta l_2)}. \quad (7)$$

Для наглядности рассмотрим предельный случай, когда линию питает источник бесконечной мощности, т. е. $\dot{z}_k^{(1,2)} = 0$, а нагрузка на конце ВЛ отсутствует, т. е. $\dot{z}_n^{(1,2)} \rightarrow \infty$. Тогда имеем

$$\dot{U}_x^{(1)} = \dot{I} \frac{-jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_2)}{jz_c \operatorname{tg}(n\beta l_1) - jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_2)} \left\{ \cos(n\beta x) jz_c \operatorname{tg}(n\beta l_1) - jz_c \sin(n\beta x) \right\} = jz_c \dot{I} \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l_1)} \sin[n\beta(l_1 - x)], \quad (8)$$

$$\dot{I}_x^{(1)} = \dot{I} \frac{\cos(n\beta l_1) \cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \left\{ \sin(n\beta x) \operatorname{tg}(n\beta l_1) + \cos(n\beta x) \right\} = \dot{I} \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \cos[n\beta(l_1 - x)]. \quad (9)$$

Связь переменных по НП имеет аналогичный вид

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x^{(0)} \\ \dot{I}_x^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\beta^{(0)} x) & -jz_c \sin(n\beta^{(0)} x) \\ -j \frac{1}{z_c} \sin(n\beta^{(0)} x) & \cos(n\beta^{(0)} x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}^{(0)} \\ \dot{I}_1^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Из схемы замещения по НП (рис. 2) аналогично следует

$$\dot{I}_1^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}}, \quad \dot{I}_2^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_1^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}}, \quad (11)$$

однако результирующие сопротивления НП отличаются от сопротивлений (8) для ПП/ОП

$$\dot{z}_1^{(0)} = -jz_c^{(0)} \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)} l_1), \quad \dot{z}_2^{(0)} = -jz_c^{(0)} \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)} l_2). \quad (12)$$

Как и для параметров режима ПП/ОП, получаем

$$\dot{U}_x^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}} \left\{ \cos(n\beta^{(0)} x) z_1^{(0)} - jz_c^{(0)} \sin(n\beta^{(0)} x) \right\}, \quad (13)$$

$$\dot{I}_x^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}} \left\{ -j \sin(n\beta^{(0)} x) \frac{z_1^{(0)}}{z_c^{(0)}} + \cos(n\beta^{(0)} x) \right\}. \quad (14)$$

В предельном случае

$$\dot{U}_x^{(0)} = -jz_c^{(0)} \dot{I} \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_2)}{\sin(n\beta^{(0)} l)} \cos[n\beta^{(0)}(l_1 - x)], \quad (15)$$

$$\dot{I}_x^{(0)} = \dot{I} \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_2)}{\sin(n\beta^{(0)} l)} \sin[n\beta^{(0)}(l_1 - x)]. \quad (16)$$

Таким образом, формулы (13–16) позволяют описать закономерности изменения токов и напряжения и тока НП на участке "шины ЦП – точка поперечной несимметрии". Для второго участка электропередачи (рис. 1) записываем аналогичные по виду выражения:

$$\dot{U}_y^{(1)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(1)}}{\dot{z}_1^{(1)} + \dot{z}_2^{(1)}} \left\{ \cos(n\beta y) z_2^{(1)} - jz_c \sin(n\beta y) \right\}, \quad (17)$$

$$\dot{I}_y^{(1)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_2^{(1)}}{\dot{z}_1^{(1)} + \dot{z}_2^{(1)}} \left\{ -j \sin(n\beta y) \frac{\dot{z}_1^{(1)}}{z_c} + \cos(n\beta y) \right\}, \quad (18)$$

$$\dot{U}_y^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_1^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}} \left\{ \cos(n\beta^{(0)} y) z_2^{(0)} - jz_c^{(0)} \sin(n\beta^{(0)} y) \right\}, \quad (19)$$

$$\dot{I}_y^{(0)} = \dot{I} \frac{\dot{z}_1^{(0)}}{\dot{z}_1^{(0)} + \dot{z}_2^{(0)}} \left\{ -j \sin(n\beta^{(0)} y) \frac{\dot{z}_2^{(0)}}{z_c^{(0)}} + \cos(n\beta^{(0)} y) \right\}. \quad (20)$$

В предельном случае

$$\dot{U}_y^{(1,2)} = jz_c i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \cos[n\beta(l_2 - l)], \quad (21)$$

$$i_y^{(1,2)} = i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \sin[n\beta(l_2 - l)], \quad (22)$$

$$\dot{U}_y^{(0)} = -jz_c^{(0)} i \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_1)}{\sin(n\beta^{(0)} l)} \cos[n\beta^{(0)}(l_2 - l)], \quad (23)$$

$$i_y^{(0)} = i \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_1)}{\sin(n\beta^{(0)} l)} \sin[n\beta^{(0)}(l_2 - y)]. \quad (24)$$

Как следует из полученных выражений, в предельном случае для описания закона изменения вдоль ВЛ токов и напряжений ВГ достаточно знания только амплитуды гармонической функции. В общем случае изменение упомянутых параметров также происходит по законам тригонометрических функций, но из приведенных формул следует, что на закон распределения влияет сопротивление $z_2^{(0)}$.

На конкретном примере покажем, по каким причинам предпочтительнее использовать напряжения НП. Принимаем электропередачу длиной 30 км с проводами АС-95 длиной 30 км; волновые сопротивления для ПП и НП $z_c = 347,8$ Ом и $z_c^{(0)} = 974$ Ом; коэффициент изменения фазы для ПП и НП соответственно $\beta = 0,0010659$ 1/км и $\beta^{(0)} = 0,0013325$ 1/км; питающая электрическая сеть бесконечной мощности, на конце ВЛ разомкнута. Имитационное моделирование однофазной поперечной несимметрии на расстоянии 7,5 и 22,5 км от шин ЦП показало соответственно следующие значения "резонансных" гармоник: $n_1 = 39$, $n_2 = 60$ и $n_1 = 29$, $n_2 = 69$ (рис. 3).

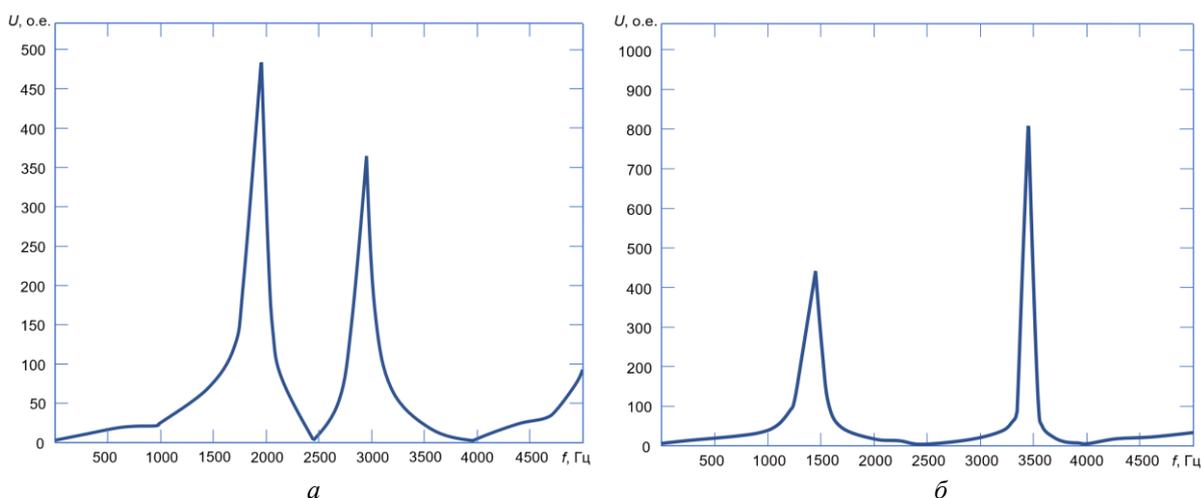


Рис. 3. Частотная характеристика ВЛ, однофазный источник ВГ размещен от шин ЦП на расстоянии 7,5 км (а) и 22,5 км (б)
 Fig. 3. Frequency response of overhead lines, single-phase NH source located from PSC buses at the distance of 7.5 km (a) and 22.5 km (b)

Как показано в ряде публикаций (Абдуллазянов, 2013; Fedotov et al., 2016; 2017), некоторые, так называемые "резонансные", ВГ усиливаются в ВЛ и их удобно использовать для расчетов, так как они превышают уровень ВГ, обусловленных нелинейностями элементов электроснабжения. В связи с этим их использование для расчетов предпочтительнее. По результатам моделирования построены графики распределения напряжений и токов ПП и НП по длине ВЛ (рис. 4). Разное направление токов ПП по отношению к месту несимметрии объясняется противоположными знаками входных сопротивлений при одинаковых знаках тригонометрических функций на расчетной гармонике. Использование более высокой частоты $n_2 = 69$ практически не сказалось на характере изменения напряжения ПП, но изменило график напряжения НП вследствие изменения его фазы (рис. 5).

Анализ графиков показывает, что напряжения НП могут служить устойчивым индикатором положения места поперечной несимметрии на ВЛ: напряжения НП снижаются по мере приближения от начала и от конца ВЛ к месту несимметрии. В то же время использование напряжений ПП чревато появлением большей погрешности при расчете точки поперечной несимметрии, так как вблизи этой точки, как видно из графиков (рис. 4), наклоны кривых практически одинаковые. В результате небольшая неточность в исходной информации вызовет значительную погрешность в результатах. Приведенный пример подтверждает целесообразность

использования именно напряжений НП для расчета места ОЗЗ, которое определяется на основе обобщенной схемы (рис. 6).

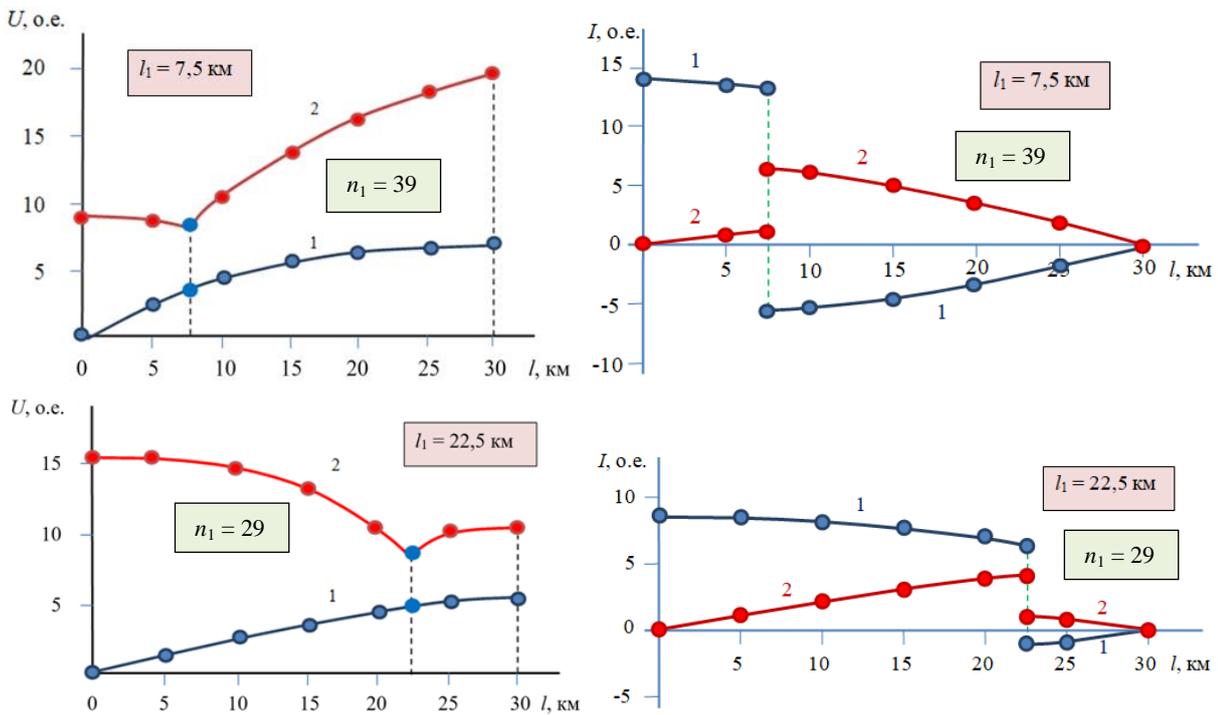


Рис. 4. Изменение напряжений и токов вдоль линии электропередачи при ОЗЗ:

1 – прямая последовательность; 2 – нулевая последовательность

Fig. 4. Voltage and current changes along the power line at the SPG:

1 – direct sequence (DS); 2 – zero sequence (ZS)

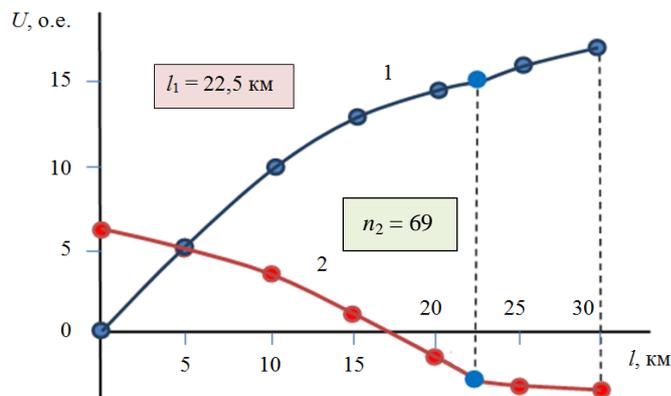


Рис. 5. Изменение напряжений ПП (1) и НП (2) на второй "резонансной" частоте (масштабирующий коэффициент 0,1)

Fig. 5. Voltage variation of DS (1), and ZS (2) at the second "resonant" frequency (scaling factor 0.1)

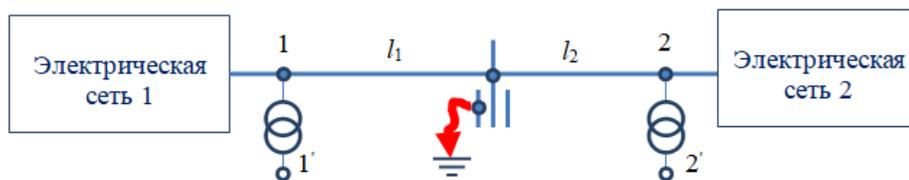


Рис. 6. Обобщенная схема фидера с выделенным участком с ОЗЗ

Fig. 6. Generalized scheme of the feeder with a dedicated section with an SPG

Для выделенного участка между узлами 1 и 2, где известны токи и напряжения (алгоритм их расчета будет представлен ниже), составим схему замещения (рис. 7) и рассмотрим особенности использования полученных выше закономерностей изменения параметров режима ВЛ в зависимости от точки наблюдения применительно к используемым системам мониторинга напряжений НП. Из схемы замещения (рис. 7) видно, что на токи $\dot{I}_{11}^{(1,2)}$ и $\dot{I}_{21}^{(1,2)}$, связанные с местом поперечной несимметрии, влияют сопротивления нагрузки, тогда как токи $\dot{I}_{11}^{(0)}$ и $\dot{I}_{21}^{(0)}$ от них не зависят. Отметим, что в начале каждого фидера токи и напряжения НП, как правило, измеряются, а на конце фидера ток НП равен нулю. Когда известен участок фидера с поперечной несимметрией (рис. 6) и рассчитаны токи и напряжения НП по его концам, справедливы следующие уравнения, позволяющие определить расстояние до места ОЗЗ:

– напряжение в месте ОЗЗ, определяемое по параметрам режима слева от места поперечной несимметрии (рис. 7)

$$\dot{U}^{(0)} = \cos(n\beta^{(0)}l_1)\dot{U}_1^{(0)} + jz_c^{(0)} \sin(n\beta^{(0)}l_1)\dot{I}_{12}^{(0)}, \quad (25)$$

– напряжение в месте ОЗЗ, определяемое по параметрам режима справа от места поперечной несимметрии (рис. 7)

$$\dot{U}^{(0)} = \cos(n\beta^{(0)}l_2)\dot{U}_2^{(0)} + jz_c^{(0)} \sin(n\beta^{(0)}l_2)\dot{I}_{22}^{(0)}. \quad (26)$$

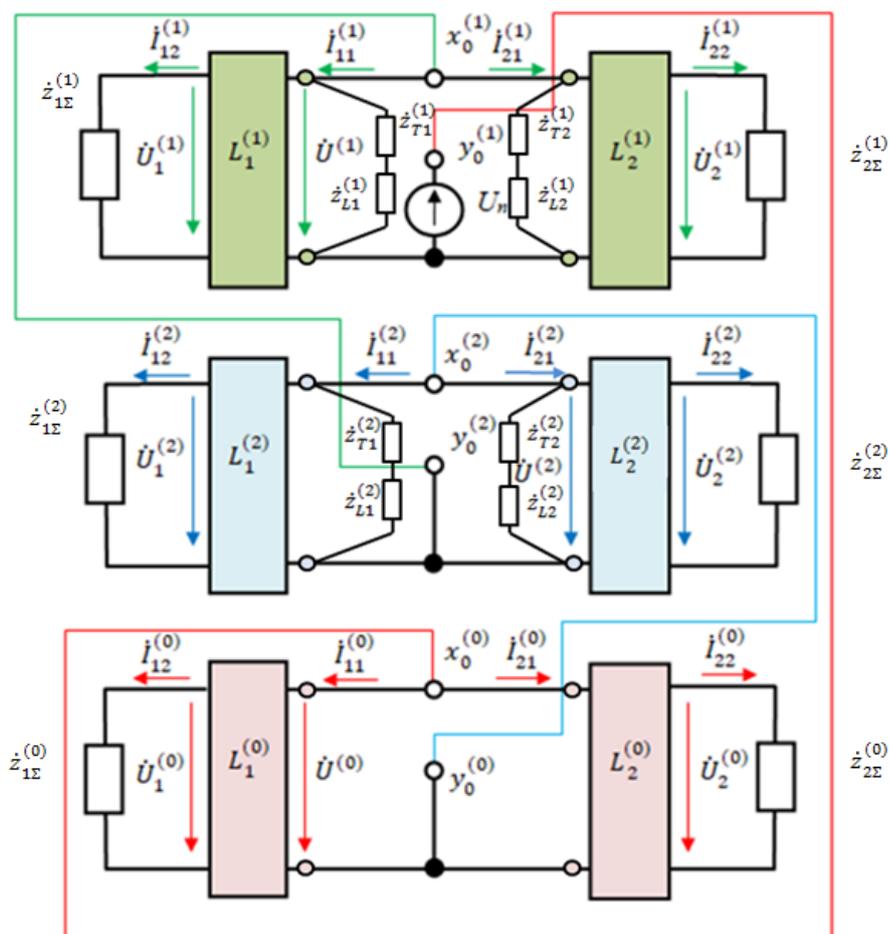


Рис. 7. Схема замещения выделенного участка фидера
 Fig. 7. Equivalent circuit of the dedicated feeder section

Поскольку расстояние между точками 1 и 2 известно, уравнения (25) и (26) могут быть решены относительно неизвестного расстояния l_1 от точки 1 до места ОЗЗ (рис. 6), если измерены или предварительно каким-либо образом рассчитаны токи и напряжения НП по концам электропередачи. Для приведенного выше численного примера имеем: $\dot{I}_{12}^{(0)} = 0$ и $\dot{I}_{22}^{(0)} = 0$, поскольку в данном случае для токов НП отсутствуют пути их замыкания через концы ВЛ. Тогда справедливо следующее уравнение:

$$\cos(n\beta^{(0)}l_1)\dot{U}_1^{(0)} = \cos[n\beta^{(0)}(l-l_1)]\dot{U}_2^{(0)}. \quad (27)$$

Для $n_1 = 39$ в численных значениях (рис. 4) имеем следующее уравнение:

$$8,22 \cos(39 \cdot 0,0013325 \cdot l_1) = 19,5 \cdot \cos[39 \cdot 0,0013325(30 - l_1)]. \quad (28)$$

Его решение: $l_1 = 7,49 \text{ км} \approx 7,5 \text{ км}$.

Проверим использование более высокой частоты $n_2 = 69$ для второй точки ОЗЗ. В численных значениях (рис. 5) имеем следующее уравнение:

$$58,3 \cos(69 \cdot 0,0013325 \cdot l_1) = -36,1 \cos[69 \cdot 0,0013325(30 - l_1)]. \quad (29)$$

Его решение: $l_1 = 22,49 \text{ км} \approx 22,5 \text{ км}$.

Таким образом, чтобы рассчитать расстояние до места ОЗЗ, для реального фидера древовидной структуры с отпайками предварительной задачей является приведение схемы к виду (рис. 6), где известны токи и напряжения НП по концам участка электропередачи с наличием поперечной несимметрии, а также гарантировать, что именно на данном участке имеет место авария. Покажем, что эта задача решается одновременно, для наглядности на примере электропередачи с одной отпайкой, причем измеряется напряжение НП только на двух концах электропередачи (рис. 8).

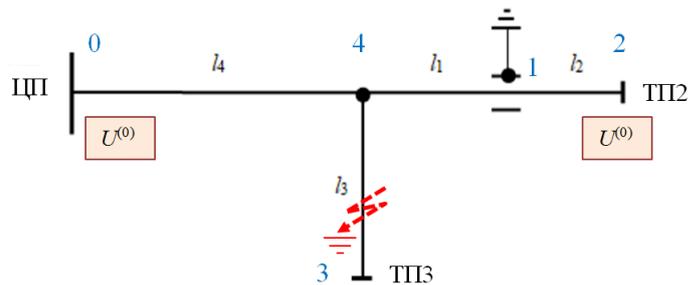


Рис. 8. Структурная схема фидера с отпайкой
Fig. 8. Structural diagram of the feeder with a branch

Полагаем, что ОЗЗ находится на участке 4–2, но заранее неизвестно, где именно оно произошло. В качественном виде распределение напряжений ПП и НП вдоль электропередачи (рис. 9) сохраняет закономерность, выявленную ранее (рис. 5).

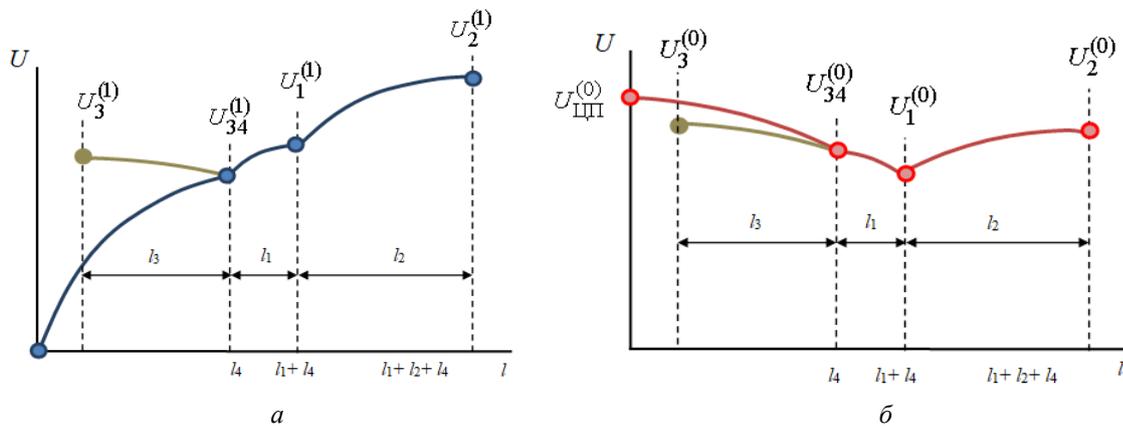


Рис. 9. Распределение напряжений ПП (а) и НП (б) вдоль линий электропередачи
Fig. 9. Distribution of voltages of DS (a) and ZS (б) along power lines

Алгоритм определения на фидере места с ОЗЗ стартует с выбора аварийного участка электропередачи. Допустим, что ОЗЗ имеет место на отпайке от узла 4 к узлу 3 (рис. 8). Тогда в узле 4 должно выполняться равенство напряжений НП, которые могут быть рассчитаны на основе обобщенной схемы (рис. 6) и соответствующей ей схемы замещения (рис. 7)

– со стороны ЦП

$$U_4^{(0)} = \cos(n\beta l_4) U_{\text{ЦП}}^{(0)}, \quad (30)$$

– со стороны узла 2

$$U_4^{(0)} = \cos(n\beta l_{2-4}) U_2^{(0)}. \quad (31)$$

Если напряжения $U_4^{(0)}$ по формулам (30) и (31) совпадают в пределах точности исходной информации, то ОЗЗ находится на отпайке. И при отсутствии в ее конце измерительных ТННП более точные результаты получить невозможно. Если же напряжения не равны, то вычисления продолжаются. Поскольку напряжение $U_2^{(0)}$ меньше, чем напряжение $U_{щп}^{(0)}$ (рис. 9), ОЗЗ ближе к узлу 2, чем к узлу 0. Тогда предполагаем, что ОЗЗ имеет место на участке электропередачи 4–2. По напряжению (30) находим токи в линиях 4–0 и 4–3

$$i_{4-0}^{(0)} = \frac{\dot{U}_4^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_4)}{z_c^{(0)}}, i_{4-3}^{(0)} = \frac{\dot{U}_4^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_3)}{z_c^{(0)}}. \quad (32)$$

В линию 4–2 поступает ток

$$\dot{I}_{4-2}^{(0)} = -(\dot{I}_{4-0}^{(0)} + \dot{I}_{4-3}^{(0)}). \quad (33)$$

Запишем напряжение НП $U_x^{(0)}$ на расстоянии x от узла 4 в направлении узла 2

$$\dot{U}_x^{(0)} = \dot{U}_4^{(0)} \cos(n\beta^{(0)}x) - jz_c^{(0)} \dot{I}_{4-2}^{(0)} \sin(n\beta^{(0)}x). \quad (34)$$

Запишем напряжение НП $U_y^{(0)}$ на расстоянии y от узла 2 в направлении узла 4

$$\dot{U}_y^{(0)} = \dot{U}_2^{(0)} \cos(n\beta^{(0)}y). \quad (35)$$

Место ОЗЗ удовлетворяет условиям

$$\dot{U}_x^{(0)} = \dot{U}_y^{(0)}, x + y = l_{2-4}. \quad (36)$$

Если тем не менее условие (36) не выполняется, то место ОЗЗ следует аналогично рассчитывать, полагая его на участке 0–4.

Из описанного метода расчета места ОЗЗ следует, что он может быть обобщен на случай фидера древовидной структуры (рис. 10), где отпайки показаны стрелками. Магистраль выделена условно по признаку наличия на ее конце ТННП.

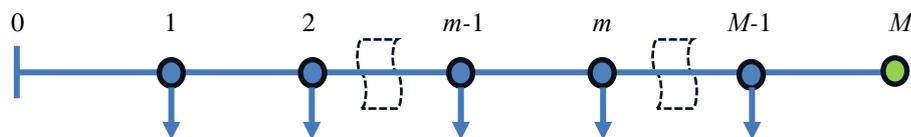


Рис. 10. Схема фидера "магистраль с отпайками"
 Fig. 10. "Trunk with branches" feeder scheme

Как и выше, вначале предполагаем, что ОЗЗ находится на одной из отпайек, допустим, что это отпайка в узле m (рис. 10). Предварительно рассчитываются результирующие сопротивления каждой отпайки. Данная процедура понятна и может быть выполнена разными способами. Здесь же отметим, что в ее основе должна лежать математическая модель линии с распределенными параметрами. Алгоритм проверки заключается в следующем. Расчет напряжений в узлах присоединения к магистрали отпайек ведется с двух сторон – от узла 0 и от узла M . Технология расчета повторяет описанную выше на примере простой схемы (рис. 8). По напряжению НП в узле 0 находятся напряжение в узле 1 и ток в конце ВЛ, поступающий в узел 1. Поскольку уже рассчитано сопротивление отпайки в узле 1, по известному сопротивлению и напряжению находится ток отпайки. Алгебраическое суммирование токов с учетом их направлений позволяет определить ток в начале следующего участка ВЛ (между узлами 1–2). Зная ток и напряжение НП в начале этого участка, можно определить ток и напряжение НП в его конце. Точно такой же алгоритм реализуется с конца линии. В конечном счете находятся напряжения в узле m по данным слева и справа от него. Если они равны в пределах заданной погрешности расчета, то ОЗЗ либо на отпайке, либо вблизи. Если это не так, то проверяется отпайка $m-1$. И так далее. Если на потенциально аварийной отпайке также выполняется измерение напряжения НП на одной из конечных подстанций, то по отношению к ней выстраивается схема новой магистрали, подобная использованной ранее (рис. 10), и уже для нее ведутся аналогичные расчеты. В том случае, когда проверка напряжений НП в узлах магистрали (рис. 10) не подтвердила наличие ОЗЗ ни на одной из отпайек, выполняется проверка участков магистрали. На аварийном участке по его концам значения напряжений, рассчитанные слева и справа, взаимно отличаются по величине, как это проиллюстрировано ниже (рис. 11).

Рассмотрим для примера фидер древовидной структуры (рис. 12). Допустим, в ЦП зафиксировано ОЗЗ, которое в действительности произошло на ВЛ 6. Запускается процедура определения места ОЗЗ. По парам измерений напряжения НП в узлах $\{0; 4\}$, $\{0; 7\}$, $\{0; 10\}$ формируются магистрали и отпайки.

По паре {0; 4} будет установлено, что ОЗЗ не на магистрали, а на отпайке узла 2 или вблизи него, так как необходимо принять во внимание неточность исходной информации (значения волновых параметров ВЛ, влияние несимметричного расположения проводов, провис проводов).

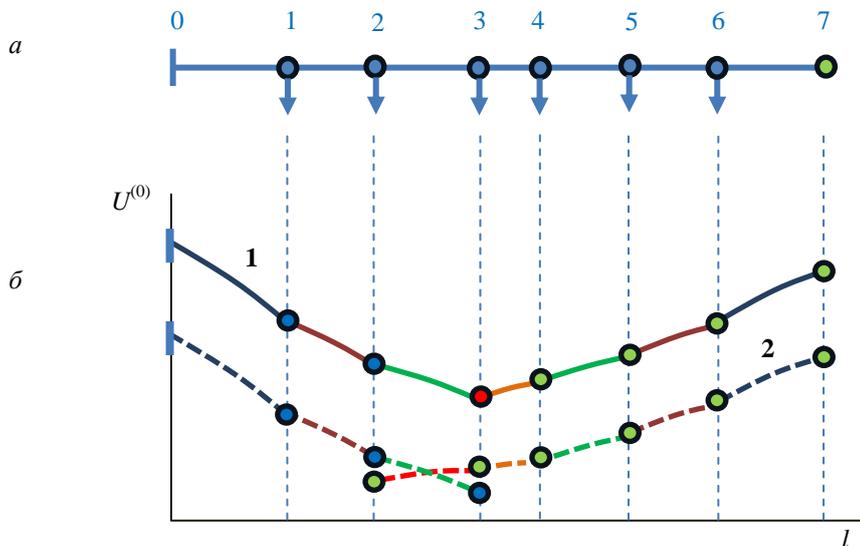


Рис. 11. Определение отпайки с ОЗЗ (1) или участка на магистрали с ОЗЗ (2):
 а – принципиальная схема фидера; б – расчетные значения напряжений в узлах
 Fig. 11. Determination of the branch with SPG (1) or the section on the highway with SPG (2):
 а – schematic diagram of the feeder; б – calculated values of stresses in the nodes

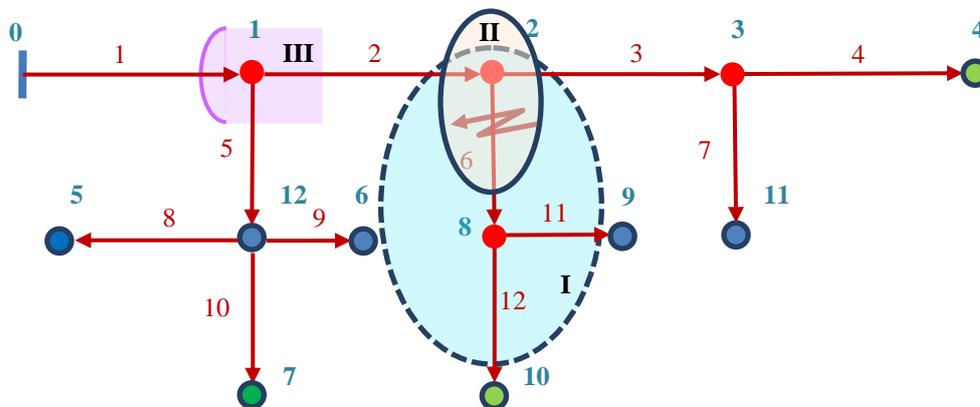


Рис. 12. Расчетные зоны ОЗЗ по парам измерений напряжения НП:
 I – зона пары {0; 4}, II – зона пары {0; 10}, III – зона пары {0; 7}
 Fig. 12. Estimated SPG zones by pairs of voltage measurements of ZS:
 I – couple zone {0; 4}, II – couple zone {0; 10}, III – couple zone {0; 7}

В результате формируется зона топографического поиска I. По паре измерений {0; 10} устанавливается, что ОЗЗ находится на участке 6 магистрали или вблизи узла 2 на участках 2 и 3 магистрали, чему соответствует зона II. Пара измерений {0; 7} в данном случае не продуктивна, она определяет зону поиска III, которая захватывает весь фидер, за исключением части его участка 1. Как видно (рис. 12), для данного случая границы зоны поиска будут определяться зоной II.

Результаты и обсуждение

Использование высших гармоник сигнала обусловлено достижением приемлемой точности результатов, которая на практике может быть оценена на уровне 0,5 км и менее, если ОЗЗ находится на наблюдаемой магистрали. Увеличение частоты сигнала способствует росту потерь напряжения и, соответственно, повышению точности расчетов. Обработка осциллограмм режима ОЗЗ, записанных в действующих электрических сетях (рис. 13), показала, что высшие гармоники проявляются в токах аварийного фидера даже при больших

значениях переходных сопротивлений, когда не срабатывает штатная релейная защита (Федотов и др., 2022).

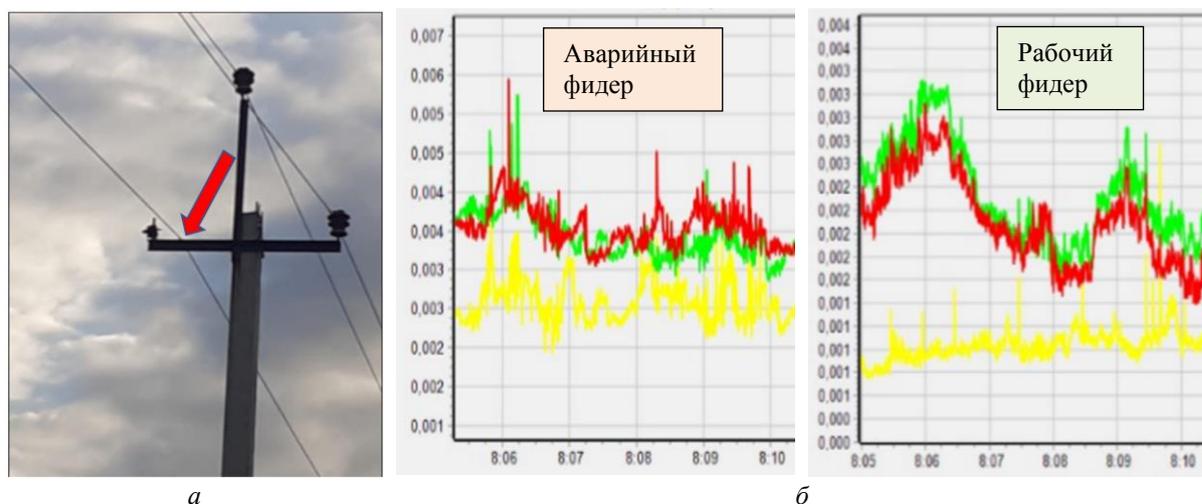


Рис. 13. ОЗЗ на траверсе опоры (а); коэффициенты гармонических искажений фазных токов (б)
Fig. 13. SPG to the traverse of the support (a); coefficients of harmonic distortion of phase currents (b)

Улучшение точности достижимо, если использовать самообучающуюся систему мониторинга и диагностики состояния ВЛ, которая будет вносить поправки в параметры математической модели ВЛ по данным натурных наблюдений аварийных режимов. По напряжениям НП место ОЗЗ может быть установлено однозначно (в пределах погрешности задания исходных данных), если оно расположено на магистрали, по концам которой выполняются измерения напряжения НП. В том случае, когда ОЗЗ происходит на отпайке, где отсутствуют измерения напряжения НП, его место рассчитывается с точностью до отпайки.

Выбор мест установки ограниченного количества измерительных ТННП должен диктоваться условиями прохождения трассы фидера. Очевидно, что в первую очередь должны быть наблюдаемыми труднодоступные и удаленные участки электропередачи. Передача информации в ЦП может быть реализована через интеллектуальные приборы учета электроэнергии.

Результирующие сопротивления отпайек на нескольких частотах могут быть рассчитаны заранее. Внесение поправок потребуется в случаях выведения ВЛ в ремонт или включения реклоузеров, выполняющих функцию организации схем резервного питания. Каждый фидер рассчитывается индивидуально. Их взаимное влияние по нулевой последовательности учитывается косвенно через значения токов НП в начале анализируемого фидера, которые измеряются либо по сигналам с трансформаторов тока НП, либо по фазным токам путем их цифрового суммирования.

Заключение

Описанная выше методика определения места/участка с ОЗЗ на фидере древовидной структуры достаточно простая для ее практической реализации. Требующиеся при этом дополнительные финансовые расходы идут в первую очередь на измерительные трансформаторы напряжения. Интеллектуальные приборы учета электроэнергии, которые по программам энергосбережения внедряются независимо от обеспечения надежного электроснабжения, позволяют обрабатывать сигнал на месте и передавать данные в ЦП. При отсутствии требуемого функционала обработки сигнала необходима замена приборов или же их дополнение соответствующим цифровым модулем. Программная часть системы мониторинга и диагностики устанавливается на сервере в ЦП. Менее затратная на высоковольтное электрооборудование система мониторинга ОЗЗ по стороне 0,4 кВ в принципе позволяет идентифицировать как поврежденный участок фидера, так и конкретное место повреждения, что подтверждается схемами замещения ПП/ОП (рис. 7). При этом обязательным условием является точное отслеживание фаз токов и напряжений используемых высших гармоник, что требует применения специальных методов (Антонов, 2018). На величине напряжений также сказывается влияние нагрузки как источника ВГ. Для практического сопоставления эффективности применения ТННП и информации на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций в условиях неполноты охвата фидера системой мониторинга и диагностики ОЗЗ в текущем году в АО "Сетевая компания" (г. Казань) с участием авторов статьи запущен соответствующий пилотный проект на одном из воздушных фидеров 10 кВ. Результаты ожидаются в 2024 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Р. Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Казань, 2013. 24 с.
- Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов. Теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. Чебоксары : Изд-во Чувашского ун-та, 2018. 333 с.
- Вагапов Г. В., Амосов А. М., Чернова Н. В., Абдуллин Л. И. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 4. С. 89–92. EDN: SXGDTF.
- Валов В. Н., Ширковец А. И., Лиске А. Г., Телегин А. В. Режим заземления нейтрали в задаче автоматизации распределения электроэнергии и построения интеллектуальных сетей // Энергетик. 2019. № 10. С. 20–25. EDN: BSGJQT.
- Горюнов В. А., Ширковец А. И., Петров В. С. Способы повышения эффективности современных защит от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 2(3). С. 30–35. EDN: PVBHNB.
- Касимов В. А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13. Казань, 2019. 48 с.
- Качесов В. Е., Кврившвили Л. В. Распознавание однофазных замыканий на землю в распределительных сетях // Электричество. 2010. № 12. С. 8–18. EDN: MWCDGT.
- Киржацких Е. Р. Дифференциальный метод и устройство контроля возникновения однофазного замыкания на землю и определения его местоположения в воздушных электрических сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.2.8. Казань, 2022. 16 с.
- Мишулин Р. Г., Закамский Е. В., Андреев В. В. Исследование условий отражения импульсных сигналов в распределительных сетях с древовидной топологией // Электротехника. 2003. № 10. С. 39–44. EDN: MPQDKN.
- Нагай В. И., Нагай И. В., Сарры С. В., Киреев П. С. [и др.]. Информационные признаки аварийного режима в высоковольтных электроустановках при наличии переходного сопротивления электрической дуги // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 6. С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2017-6-84-90>. EDN: ZWJFLR.
- Нудельман Г. С., Халилов Ф. Х., Евдокунин Г. А. [и др.]. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6–35 кВ. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений // под ред. Ф. Х. Халилова [и др.]. СПб. : Петербургский энерг. ин-т повышения квалификации Министерства топлива и энергетики РФ. 1997. 216 с.
- Олейник С. И., Сафарбаков А. А. Защита от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ с компенсированной нейтралью, реагирующая на активную составляющую // Электрические станции. 2002. № 3. С. 60–62.
- Попов И. А., Качесов В. Е. Диагностика и мониторинг сети 10 кВ подстанции Барышевская // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр., г. Новосибирск, 03–07 декабря 2018 г. : в 9 ч. Новосибирск, 2018. Ч. 4. С. 176–180.
- Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М. : МЭИ, 2007. 488 с.
- Сарин Л. И., Ильиных М. В., Ширковец А. И., Буянов Э. В. [и др.]. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали // Энергоэксперт. 2008. № 1. С. 56–64.
- Семёнов Д. А., Диомидов А. В. Определение места возникновения замыканий на землю в воздушных сетях 6–35 кВ волновым методом двусторонних измерений // Энергетик. № 10. 2019. С. 16–19. EDN: CFZGMI.
- Федотов А. И., Абдуллазянов А. Ф., Хабибуллин М. Н. [и др.]. Экспериментальное исследование возможности выделения режима однофазного замыкания на землю в сети 6–10 кВ интеллектуальной системой учета электроэнергии // Вестник Чувашского университета. 2020. № 3. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2020-3-5-15>. EDN: XODVXR.
- Федотов А. И., Абдуллазянов Р. Э., Вагапов Г. В., Абдуллазянов А. Ф. Многопараметрический электротехнический комплекс онлайн-мониторинга однофазных замыканий на землю фидеров древовидной структуры систем электроснабжения с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ // Промышленная энергетика. 2022. № 8. С. 2–11. DOI: 10.34831/EP.2022.37.79.001. EDN: LPJNRF.
- Федотов А. И., Андреев Н. К., Вагапов Г. В., Абдуллазянов А. Ф. Тестирование фидеров древовидной структуры 6–10 кВ для определения места ОЗЗ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1(57). С. 80–92. EDN: GDCBDL.
- Федотов А. И., Макаров В. Г., Абдуллазянов Р. Э., Вагапов Г. В. [и др.]. Спектральный состав токов и напряжений воздушной распределительной электрической сети с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю и его использование для определения мест повреждения // Известия

- высших учебных заведений. *Электромеханика*. 2019. Т. 62, № 2. С. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2019-2-72-84>. EDN: SOHANN.
- Хузяшев Р. Г., Кузьмин И. Л. Разработка программно-аппаратного комплекса, реализующего алгоритм определения места повреждения в ЛЭП с изолированной нейтралью // *Энергетика Татарстана*. 2008. № 1(9). С. 97–99. EDN: KWGRNB.
- Шалин А. И. Защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ. Пример расчета уставок // *Новости электротехники*. 2005. № 4(34). С. 52–55.
- Шалин А. И., Политов Е. Н. Защита от замыканий на землю, реагирующая на сопротивление и проводимость цепей нулевой последовательности // *Электроэнергетика : сб. науч. трудов. Ч. 1*. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. С. 74–84.
- Шалин А. И., Щеглов А. И. Концепция релейной защиты от замыканий на землю в сетях 35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью // *Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ : доклады науч.-техн. конф.* Новосибирск : ГЦРО, 2000. С. 149–160.
- Ширковец А. И., Телегин А. В., Валов В. Н., Хадыев И. Г. Эффективная защита от однофазных замыканий и их локализация в распределительной сети с помощью низкоомных резисторов // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2018. № 4. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2018-4-5-15>. EDN: XVLYPB.
- Ширковец А., Сарин Л., Ильиных М., Подъячев В. [и др.]. Резистивное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ с СПЭ-кабелями. Подходы к выбору резисторов и принципам построения защиты от ОЗЗ // *Новости электротехники*. 2008. № 2(50). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2008/50/14.php>.
- Chang Y., Tang J., Li Y., Xiong B. [et al.]. A novel single-phase-to-ground fault location method based on phase current differences in power distribution systems // *4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. Beijing, China, 2022. P. 1196–1201. DOI: <https://doi.org/10.1109/spies55999.2022.10082394>.
- Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., Grackova L. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance // *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, Latvia, 2016. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/rtucon.2016.7763116>.
- Fedotov A., Vagapov G., Grackova L. Monitoring of overhead power lines and detection of damages // *10th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2019)*, September 16–18, 2019. Stará Lesná, Slovak Republic, 2019. P. 284–288.
- Fedotov A., Vagapov G., Chernova N. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6–10–35 kV level voltage // *9th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2017)*, September 12–14. Stará Lesná, Slovak Republic, 2017. P. 384–388.
- Jia Q., Dong X., Shi S., He X. Non-communication protection for single-phase-to-ground fault feeder in neutral non-effectively grounded distribution system // *Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Portland, OR, USA, 2018. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586136>.
- Paul D. Phasor diagram of a single-phase-ground fault current in a high-resistance grounded power system // *53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. Niagara Falls, ON, Canada, 2017. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icps.2017.7945108>.
- Xin S., Li Y., Li T., Lu Y. Single phase ground fault locating method of multi-branch wind farm collector lines // *2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*. Chengdu, China, 2021. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ciycee53554.2021.9676887>.

References

- Abdullazyanov, R. E. 2013. Determining the location of damage in distribution electrical networks with a voltage of 6–35 kV according to their frequency characteristics. Abstract of Ph.D. dissertation. Kazan. (In Russ.)
- Antonov, V. I. 2018. Adaptive structural analysis of electrical signals: Theory and its applications in intelligent electric power engineering. Cheboksary. (In Russ.)
- Vagapov, G. V., Amosov, A. M., Chernova, N. V., Abdullin, L. I. 2014. Experimental research of the manifestation of higher voltage harmonics on the 0.4 kV side of consumer substations as a method of early diagnosis of single-phase ground faults in power grids with isolated neutral. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 4, pp. 89–92. EDN: SXGDTF. (In Russ.)
- Valov, V. N., Shirkovets, A. I., Telegin, A. V. 2019. Neutral grounding mode in the task of automation of electricity distribution and construction of smart grids. *Energetik*, 10, pp. 20–25. EDN: BSGJQT. (In Russ.)
- Goryunov, V. A., Shirkovets, A. I., Petrov, V. S. 2011. Ways to improve the efficiency of modern ground fault protection. *Relay protection and automation*, 2(3), pp. 30–35. EDN: PBHDHB. (In Russ.)
- Kasimov, V. A. 2019. Method of location monitoring of ice formation and damage on overhead power lines and hardware and software systems for its implementation. Abstract of Ph.D. dissertation. Kazan. (In Russ.)

- Kachesov, V. E., Kvrivishvili, L. V. 2010. Recognition of single-phase ground faults in distribution power grids. *Elektrichestvo*, 12, pp. 8–18. EDN: MWCDGT. (In Russ.)
- Kirzhatskikh, E. R. 2022. Differential method and device for monitoring the occurrence of a single-phase earth fault and determining its location in 6–10 kV overhead electrical networks with an isolated neutral. Abstract of Ph.D. dissertation. Kazan. (In Russ.)
- Minullin, R. G., Zakamsky, E. V., Andreev, V. V. 2003. Research of conditions of reflection of pulse signals in distribution power grids with tree topology. *Elektrotehnika*, 10, pp. 39–44. EDN: MPQDKN. (In Russ.)
- Nagai, V. I., Nagai, I. V., Sarry, S. V., Kireev, P. S. et al. 2017. Information signs of an emergency mode in high-voltage electrical installations in the presence of a transient resistance of an electric arc. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 60(6), pp. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2017-6-84-90>. EDN: ZWJFLR. (In Russ.)
- Nudelman, G. S., Khalilov, F. H., Evdokunin, G. A. et al. 1997. Selective ground fault protection of 6–35 kV distribution power grids. Protection of 6–35 kV power grids from overvoltage. Ed. F. H. Khalilov. St. Petersburg. (In Russ.)
- Oleinik, S. I., Safarbakov, A. A. 2002. Earth fault protection in 6–35 kV networks with compensated neutral, reacting to the active component. *Electrical stations*, 3, pp. 60–62. (In Russ.)
- Popov, I. A., Kachesov, V. E. 2018. Diagnostics and monitoring of the 10 kV power grids with the Baryshevskaya substation. In *The science. Technologies. Innovations: a collection of scientific papers in 9 parts*. Novosibirsk, pp. 177–181. (In Russ.)
- Ryzhov, Yu. P. 2007. Long-range ultra-high voltage transmission power lines. Moscow. (In Russ.)
- Sarin, L. I., Ilyinykh, M. V., Shirkovets, A. I., Buyanov, E. V. 2008. Analysis of the results of monitoring processes with single-phase ground faults in a 6 kV power grid with arc-extinguishing reactors and neutral resistors. *Energoexpert*, 1, pp. 56–64. (In Russ.)
- Semenov, D. A., Diomidov, A. V. 2019. Determination of the location of ground faults in 6–35 kV overhead power grids by the wave method of two-way measurements. *Energetik*, 10, pp. 16–19. EDN: CFZGMI. (In Russ.)
- Fedotov, A. I., Abdullazyanov, A. F., Khabibullin, M. N. et al. 2020. Experimental research of the possibility of allocating a single-phase earth fault mode in a 6–10 kV network by an intelligent electricity metering system. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 3, pp. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2020-3-5-15>. EDN: XODBXR. (In Russ.)
- Fedotov, A. I., Abdullazyanov, R. E., Vagapov, G. V., Abdullazyanov, A. F. 2022. Multiparametric electrotechnical complex of online monitoring of single-phase ground faults of feeders of a tree structure of power supply systems with an isolated neutral voltage of 6–35 kV. *Industrial Power Engineering*, 8, pp. 2–11. DOI: 10.34831/EP.2022.37.79.001. EDN: LPJNRF. (In Russ.)
- Fedotov, A. I., Andreev, N. K., Vagapov, G. V., Abdullazyanov, A. F. 2023. Testing of feeders of a tree structure of 6–10 kV to determine the location of the SPGF. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 15(1(57)), pp. 80–92. EDN: GDCBDL. (In Russ.)
- Fedotov, A. I., Makarov, V. G., Abdullazyanov, R. E., Vagapov, G. V. et al. 2019. Spectral composition of currents and voltages of an air distribution electrical power grids with an isolated neutral in single-phase ground faults and its use for determining damage places. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 62(2), pp. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2019-2-72-84>. EDN: SOHAHH. (In Russ.)
- Khuzyashev, R. G., Kuzmin, I. L. 2008. Development of hardware and software complex implementing an algorithm for determining the location of damage in a power line with an isolated neutral. *Power Industry of Tatarstan*, 1(9), pp. 97–99. EDN: KWGRNB. (In Russ.)
- Shalin, A. I. 2005. Ground faults in 6–35 kV power grids. Example of calculation of setpoints. *Novosti Elektrotehniki*, 4(34), pp. 52–55. (In Russ.)
- Shalin, A. I., Politov, E. N. 2002. Ground fault protection, reacting to the resistance and conductivity of zero-sequence circuits. In coll. articles *Electric power industry*, part 1. Novosibirsk, pp. 74–84. (In Russ.)
- Shalin, A. I., Shcheglov, A. I. 2000. The concept of relay protection against ground faults in 35 kV power grids with resistively grounded neutral. In coll. articles *Grounding modes of neutral networks 3–6–10–35 kV*. Novosibirsk, pp. 149–160. (In Russ.)
- Shirkovets, A. I., Telegin, A. V., Valov, V. N., Khadyev, I. G. 2018. Effective protection against single-phase ground faults and their localization in the distribution power grids using low-resistance resistors. *Energy Safety and Energy Economy*, 4, pp. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2018-4-5-15>. EDN: XVLYPB. (In Russ.)
- Shirkovets, A., Sarin, L., Ilyinykh, M., Pod'yachev, V. et al. 2008. Resistive grounding of neutral in 6–35 kV grids with cross-linked polyethylene cables. Approaches to the selection of resistors and the principles of constructing protection against SPGF. *Novosti Elektrotehniki*, 2(50). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2008/50/14.php>. (In Russ.)
- Chang, Y., Tang, J., Li Y., Xiong, B. et al. 2022. A novel single-phase-to-ground fault location method based on phase current differences in power distribution systems. 4th International Conference on Smart Power &

- Internet Energy Systems (SPIES). Beijing, China, pp. 1196–1201. DOI: <https://doi.org/10.1109/spies55999.2022.10082394>.
- Fedotov, A., Abdullazyanov, R., Vagapov, G., Grackova, L. 2016. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/rtucon.2016.7763116>.
- Fedotov, A., Vagapov, G., Grackova, L. 2019. Monitoring of overhead power lines and detection of damages. 10th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2019), September 16–18, 2019. Stará Lesná, Slovak Republic, pp. 284–288.
- Fedotov, A., Vagapov, G., Chernova, N. 2017. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6–10–35 kV level voltage. 9th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2017), September 12–14, 2017. Stará Lesná, Slovak Republic, pp. 384–388.
- Jia, Q., Dong, X., Shi, S., He, X. 2018. Non-communication protection for single-phase-to-ground fault feeder in neutral non-effectively grounded distribution system. Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586136>.
- Paul, D. 2017. Phasor diagram of a single-phase-ground fault current in a high-resistance grounded power system. 53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Niagara Falls, ON, Canada, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icps.2017.7945108>.
- Xin, S., Li, Y., Li, T., Lu, Y. 2021. Single phase ground fault locating method of multi-branch wind farm collector lines. 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Chengdu, China, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ciycee53554.2021.9676887>.

Сведения об авторах

Федотов Александр Иванович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: fed.ai@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>

Alexander I. Fedotov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: fed.ai@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>

Вагапов Георгий Валериянович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, доцент;
e-mail: vagapov@list.ru

Georgii V. Vagapov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: vagapov@list.ru

Абдуллазянов Рустем Эдвардович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: abdull@inbox.ru

Rustem E. Abdullazyanov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: abdull@inbox.ru

Федотов Евгений Александрович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: evfedotov2008@mail.ru

Evgeny A. Fedotov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: evfedotov2008@mail.ru

УДК 629.58
УДК 004.8

Нейронные сети как инструмент совершенствования математической модели движения судна

С. В. Пашенцев

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: serpass15@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1512-341X>

Информация о статье

Реферат

Поступила в редакцию 17.05.2023;

получена после доработки 10.08.2023;

принята к публикации 14.08.2023

Ключевые слова:

математическая модель движения судна, компьютерные испытания модели, нейронные сети, качество модели

Использование аппарата нейронных сетей открывает большие возможности для исследования математических моделей движения судна. Коррекция с помощью сети идентифицированных параметров выбранной модели должна быть максимально адекватной результатам стандартных натурных испытаний, определенных резолюцией ИМО. Рассмотрена математическая модель в перемещениях, содержащая 16 параметров, определяющих гидродинамические усилия, действующие на корпус судна и рулевой орган, и являющаяся источником набора данных для обучения сети путем случайного варьирования параметров и последующего компьютерного испытания. Стандартным маневром выбрана установившаяся циркуляция с фиксацией маневренных элементов: диаметра, линейной скорости, угла дрейфа и угловой скорости поворота. Улучшение качества модели состояло в изменении ее параметров и минимизации средних квадратических погрешностей значений маневренных элементов, полученных при испытаниях. Для этих целей выстроена нейронная сеть с 16 входами (параметры модели) и четырьмя выходами (маневренные элементы для установившейся циркуляции). Массив данных для обучения сети получен с помощью программы, разработанной авторами и предназначенной для расчета параметров и проведения маневренных испытаний. В качестве объекта испытаний выбран танкер водоизмещением 30 000 т. Рассмотрены различные варианты архитектуры сети и инструменты работы с нею; использованы программная среда Statistica Neural Nets (SNN) и пакет ANN в среде SciLab; даны сравнительные оценки результатов работы с этими инструментами.

Для цитирования

Пашенцев С. В. Нейронные сети как инструмент совершенствования математической модели движения судна. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 472–488. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-472-488>.

Neural networks as a tool for improving the mathematical model of ship motion

Sergey V. Pashentsev

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: serpass15@yahoo.com

Article info

Received 17.05.2023;

received in revised 10.08.2023;

accepted 14.08.2023

Key words:

mathematical model of ship motion, computer model testing, neural networks, model quality

Abstract

Using neural networks opens up great opportunities for studying mathematical models of ship motion. Correction by a network of identified parameters of the selected model should be as adequate as possible to the results of standard full-scale tests defined by the IMO Resolution N 137 of 2002. A mathematical model in displacements is considered, containing 16 parameters that determine the hydrodynamic forces acting on the ship's hull and steering gear, and is the source of a data set for training the network by randomly varying the parameters and subsequent computer testing. The standard maneuver is a steady-state circulation with fixation of the maneuvering elements: diameter, linear velocity, drift angle and angular velocity of rotation. Improving the quality of the model has consisted of changing its parameters and minimizing the mean square errors of the values of the maneuvering elements obtained during testing. For these purposes, a neural network with 16 inputs (model parameters) and four outputs (maneuvering elements for steady-state circulation) has been built. The data set for training the network was obtained using a program developed by the authors and intended for calculating parameters and conducting maneuver tests. A tanker with a displacement of 30,000 tons was chosen as a test object. Various options for network architecture and tools for working with it have been considered; the Statistica Neural Nets (SNN) software environment and the ANN package in the SciLab environment have been used. Comparative assessments of the results of working with these tools have been given.

For citation

Pashentsev, S. V. 2023. Neural networks as a tool for improving the mathematical model of ship motion. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 472–488. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-472-488>.

Введение

Нейронные сети, как аппарат искусственного интеллекта, применяются для решения множества прикладных задач¹ (*Bishop, 2006; Hagan et al., 2014; Николенко и др., 2018; Хайкин, 2019; Редько, 2022*), таких как распознавание сложных образов; классификация; прогнозирование; решение регрессионных задач. Этот аппарат не используется для анализа сложных многокомпонентных математических моделей движения судов. Некоторое подобие такого подхода было рассмотрено в работах (*Пашенцев и др., 2006; Позняков, 2006*), где обсуждалась проблема влияния вариаций параметров модели на маневренные характеристики, полученные при испытаниях модели. В настоящее время появился и успешно развивается математический аппарат в виде нейронных сетей, который можно использовать для оценки перекрестных влияний параметров модели на маневренные характеристики, генерируемые моделью.

По указанной тематике опубликовано большое количество статей (в том числе в "Вестнике МГТУ") и монографий. Поэтому настоящий материал не нуждается в какой-либо детализации и обсуждении по поводу выбора структуры модели, ее идентификации, модельных испытаний. В настоящей статье рассматривается такая задача для многопараметрической модели движения судна в перемещениях (*Справочник..., 1985*), которая содержит 16 параметров. Соответствующая нейронная сеть будет содержать 16 входов, а ее выходом будет одна маневренная характеристика модели (среди характеристик выбирается любая, например, диаметр установившейся циркуляции D_c). В дальнейшей работе можно менять архитектуру сети с целью получения наиболее точного прогноза, сохраняя число входов (16) и выходов (1). Технология конструирования полной архитектуры сети, т. е. определения числа скрытых слоев и числа нейронов в каждом из них, зависит от программной среды, в которой осуществляется работа с сетью. В ходе исследования использовались пакеты Statistica Neural Networks. Release 4.0E. StatSoft Inc. и ANN (Artificial Neural Nets) в системе программирования SciLab. Главное в процессе работы с сетью – ее обучение, для чего требуется большой массив входных данных, поэтому важно "добыть" этот массив, используя доступные средства. После идентификации математической модели, т. е. определения ее параметров, проводится стандартное испытание модели на циркуляцию с помощью разработанного нами программного комплекса (*Пашенцев, 2018*). С этой целью фиксируются исходный (базовый) набор (16 параметров) и полученный диаметр D_c ; затем специальной подпрограммой, добавленной в комплекс, генерируются вариации базовых параметров; испытывается варьированная модель, фиксируются полученные величины D_c . Данные наборы отправляются в открытый для записи файл, заканчивается запись для установленного числа вариаций; создается файл входных данных (параметров модели и величин D_c), которые и будут массивом для обучения сети.

Материалы и методы

Процедуру, описанную выше, применим для моделирования движения танкера типа "Саратов" водоизмещением 30 000 тонн и определим параметры его модели в перемещениях в грузу, следуя алгоритмам, указанным в работе (*Юдин и др., 2015*). Математическая модель движения состоит из трех дифференциальных уравнений первого порядка относительно продольной скорости судна V_x , поперечной скорости V_y и угловой скорости поворота судна ω относительно вертикальной оси. Для выбранного типа судна с учетом его теоретического чертежа определим набор коэффициентов модели, которые отражают гидродинамические воздействия среды на корпус судна. Полученный базовый набор коэффициентов приведен в табл. 1 с необходимой для решения точностью.

Таблица 1. Коэффициенты математической модели танкера "Саратов" в грузу
Table 1. Coefficients of the mathematical model of the loaded tanker *Saratov*

Cx0	0,05	Cm2	2,531379E-03
Cxz	5,846189E-02	Cm3	2,286795E-02
Cx1	-5,437997E-02	Cm4	1,835252E-03
Cx2	1,346752E-03	CkmOm	7,593681E-02
CyBe	0,1321832	CkmOm1	0,01215519305
Cy2	0,6389132	CkmOm2	6,604177E-02
Cy3	5,970012E-02	Cyra	2,002089
Cm1	4,810237E-02	Cxra	1,0

¹ Введение в искусственные нейронные сети. 2019. 16 с. URL : <https://machinelearningmastery.ru/introduction-to-artificial-neural-networks-ann-1aea15775ef9/> (Обращение 26.05.23).

Испытания типа "Циркуляция" с этими значениями параметров при начальной скорости 16 узлов и кладкой руля 35° дали значение $D_c = 246,9$ м. Чтобы получить массив данных для обучения будущей сети, варьируем базовый набор параметров с помощью подпрограммы VB6 CreateVarModel() (рис. 1). В подпрограмме случайным образом варьируются все базовые параметры модели с амплитудой варьирования, составляющей 20 % ($aa = 20$).

```
Public Sub CreateVarModel()
Randomize Timer
' aa – амплитуда вариаций в процентах
If NumbVariants = 0 Then aa = 0 Else aa = 20
With MyModelVar
.Cx0= MyModel_00.Cx0 * (1 + aa / 100 * (0.5 – Rnd(1)))
' аналогично по всем параметрам модели
MyRule.Cyга = .Cyга * (1 + aa / 100 * (0.5 – Rnd(1)))
End With:
End Sub
```

Рис. 1. Подпрограмма VB6 CreateVarModel
Fig. 1. CreateVarModel VB6 subroutine

С вариантным набором параметров выполняется циркуляция в тех же начальных условиях с фиксацией величины D_c . Каждый набор записывается в файл, откуда затем будут братья данные для обучения сети. Понимая значение числа обучающих данных, для качества обучения формируем массив из 120 наборов, что для первого подхода к регрессионной задаче достаточно. Каждый набор содержит 17 значений (16 параметров модели и выходную величину – диаметр D_c).

На скриншоте главной формы программы испытаний модели (Пашенцев, 2018) (рис. 2) в графическом поле траекторий приведена циркуляция для базовой модели с начальным курсом 60° и циркуляции для варьированных моделей с начальным курсом 0° (они покрыли некоторую площадь акватории). На отдельной дочерней форме (слева) можно наблюдать список параметров модели и их базовые значения (те же, что указаны в табл. 1). На скриншоте формы также содержится другая информация, которая в данном исследовании не рассматривается.

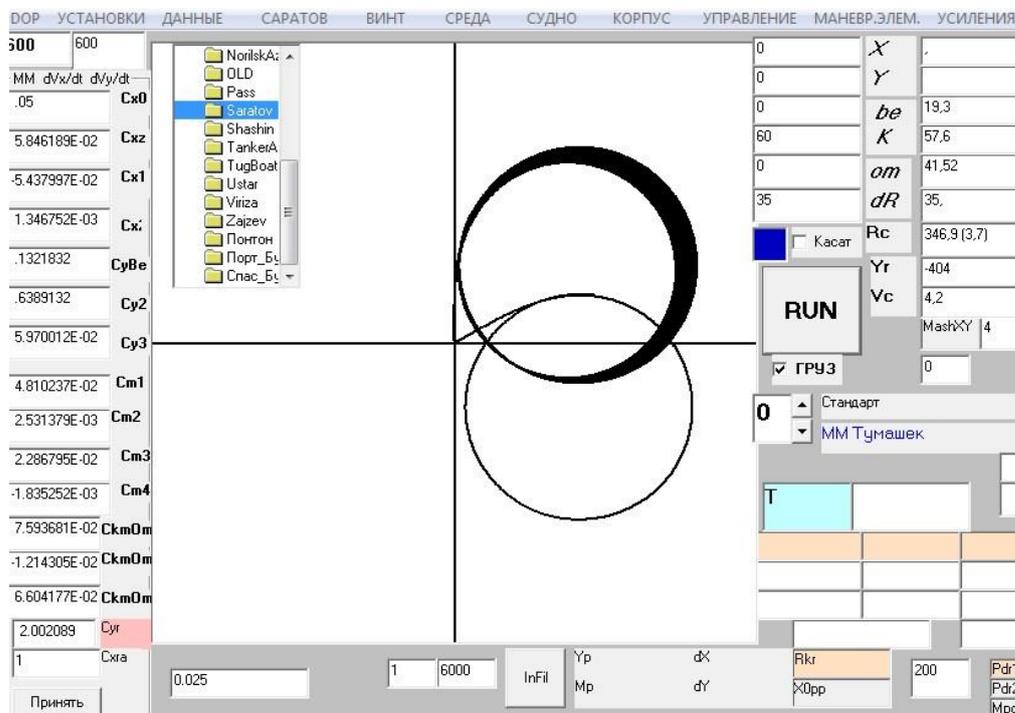


Рис. 2. Результат испытаний моделей с варьированными параметрами по CreateVarModel
Fig. 2. The result of testing models with varied parameters by CreateVarModel

Построение нейронной сети для сформированного набора данных

Получив массив данных для обучения сети, приступим к ее конструированию. Для этого определим конкретные инструменты из большого числа возможностей и выберем два инструмента с учетом удобства пользования ими при сравнении получаемых результатов. Первым используем пакет свободного распространения Statistica Neural Networks. Release 4.0E. StatSoft Inc. (далее – пакет SNN)². Учтем, что научное сообщество, занимающееся математическим моделированием движения судов, не работает с подобными пакетами; все последующие операции опишем максимально подробно, не считая такой подход излишним. Это позволит специалистам использовать пакет для решения задач моделирования движения судна.

Запустив инсталлированную программу, получим приглашение выбрать для работы файл данных, выберем массив данных ModelSaratov_120.txt, получим на мониторе форму, показанную на рис. 3.

Первоначально таблица с данными бесцветна. После заполнения в верхней части текстовых окон Variables и Case значениями 16, 1, 70, 30, 20 части таблицы окрашиваются в разные цвета. Это означает, что из 120 наборов данных первые 16 столбцов будут входами (VAR1–VAR16); 17 столбец – выходом (VAR 17, синий цвет); 70 строк данных используются для обучения; 30 строк – для верификации; 20 – для тестирования (на рис. 3 строки окрашены в разные цвета).

	VAR11	VAR12	VAR13	VAR14	VAR15	VAR16	VAR17
40	-0.001782	0.08099	-0.01106	0.06603	2.064	0.952	342
41	-0.001775	0.07405	-0.01326	0.0615152	2.011	0.925	347
42	-0.001905	0.077647	-0.01178	0.06849	2.139	0.989	337
43	-0.001759	0.08328	-0.01266	0.0617	2.068	0.927	342
44	-0.001786	0.06957	-0.01209	0.06897	2.002	0.937	347
45	-0.001868	0.08172	-0.01254	0.06488	2.078	1.064	341
46	-0.001757	0.08036	-0.01317	0.06813	2.152	1.001	336
47	-0.001784	0.08183	-0.01259	0.06219	2.085	1.011	341
48	-0.001913	0.07794	-0.01106	0.06343	2.134	1.095	337
49	-0.001767	0.07587	-0.01199	0.06237	2.142	1.014	336
50	-0.00176	0.06893	-0.01177	0.07107	2.09	0.987	340
51	-0.001925	0.07324	-0.01242	0.0691441	1.883	1.07	357
93	-0.001794	0.08097	-0.01282	0.0614954	1.874	0.939	358
94	-0.001958	0.07009	-0.01104	0.05957	2.067	1.022	342
95	-0.001813	0.0832	-0.01197	0.07172	2.075	0.941	341
96	-0.001804	0.07649	-0.01164	0.06895	1.864	0.952	359
97	-0.001969	0.08079	-0.01229	0.06702	2.057	1.035	343
98	-0.001962	0.07385	-0.01207	0.06251	2.005	1.008	347
99	-0.001816	0.07178	-0.013	0.06145	2.013	0.927	346
100	-0.001945	0.08308	-0.01147	0.06269	2.062	1.011	342
101	-0.001972	0.0693671	-0.01332	0.06996	1.995	1.021	348
102	-0.001792	0.08178	-0.01213	0.064592	1.939	0.922	352
103	-0.001958	0.07838	-0.01282	0.0684	1.811	0.986	363
104	-0.001812	0.07631	-0.01133	0.06734	1.819	0.905	363
105	-0.001838	0.0703	-0.01313	0.06887	2.074	0.934	342
106	-0.001968	0.07389	-0.01165	0.06264	1.801	0.999	364
107	-0.001788	0.07112	-0.012883	0.07049	2.145	0.9	336
108	-0.001816	0.08007	-0.01236	0.07028	2.158	1.091	335
109	-0.001946	0.0684801	-0.01331	0.06405	1.885	0.956	357
110	-0.001799	0.07411	-0.01176	0.07046	1.815	1.094	363
111	-0.001826	0.0755871	-0.01118	0.06452	2.148	0.904	336

Рис. 3. Данные для обучения сети с распределенными наборами по характеру использования (черный цвет – обучение; красный – верификация; синий – тестирование)

Fig. 3. Data for training network with distributed sets by usage (training – black, verification – red, testing – blue)

² Порядок работы с пакетом STATISTICA Neural Networks, продукты Statistica neural networks. 2020. URL : <https://usercpu.ru/poryadok-raboty-s-paketom-statistica-neural-networks-produkty-statistica-neironnye-seti-statistica-neural/> (Обращение 26.05.23).

Определим архитектуру сети, на которой будут работать эти данные. Для этого сделаем выбор File/New/NetWork, и на мониторе появится дочерняя форма, показанная на рис. 4 (слева), она озаглавлена Create NetWork.

Выберем тип сети – многослойный перцептрон (MultiLayer Perseptron), повторяем число входов (16) и число выходов (1), число слоев (No Layers) (4), после чего справа внизу заполняем размеры скрытых слоев сети: Layer 2 = 8, Layer 3 = 3. Эти цифры обозначают числа нейронов в двух скрытых слоях. После выбора Create (создать) получим графическую схему созданной сети (рис. 4, справа). Выполнив эти процедуры, можно перейти непосредственно к обучению сети.

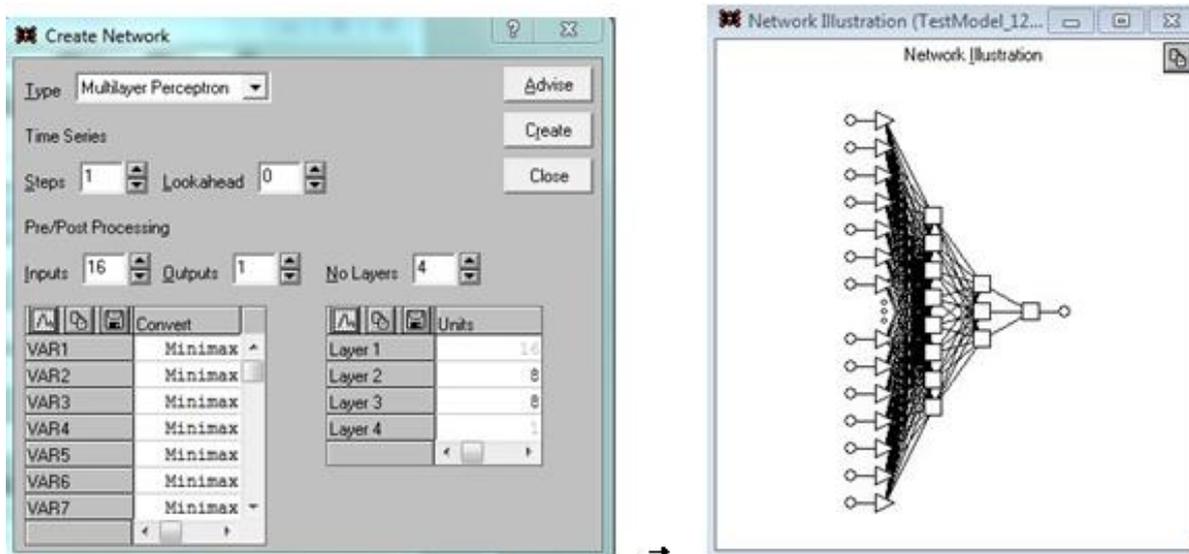


Рис. 4. Процедура создания архитектуры сети (слева) и ее графический вид (справа)
 Fig. 4. The procedure for creating the network architecture (left) and its graphical view (right)

Обучение сети на сформированном наборе данных

В процессе обучения сети производим выбор по цепочке Train/MultiLayer/Back Propagation. В результате на экране появляется дочерняя форма Back Propagation (рис. 5, справа), которая позволяет выбрать параметры процесса обучения.

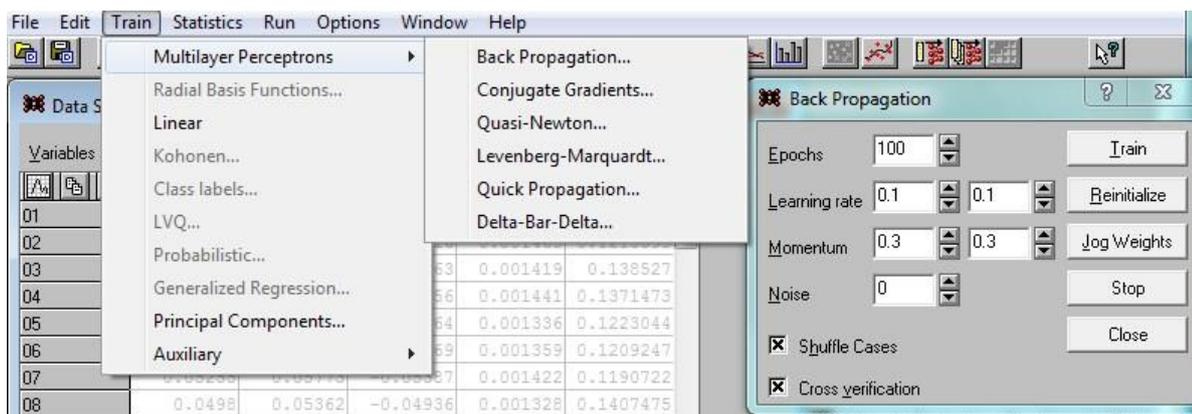


Рис. 5. Включение режима обучения сети и выбора способа совершенствования переходных матриц
 Fig. 5. Enabling the network training mode and choosing a way to improve the transition matrices

Числа эпох (циклов) обучения и скорости обучения выберем равными 1000 и 0.01 соответственно. Остальные параметры оставим пока по умолчанию. Важными для результатов обучения являются переключатели (внизу слева) Shuffle Cases (перемешивание наборов) и Cross verification (перекрестное использование обучающих и верификационных наборов). Перемешивание наборов при обучении повышает надежность последующих прогнозов, полученных с помощью обученной таким образом сети. Определив обучающие параметры, нажимаем кнопку Train и запускаем процесс обучения сети (Bishop, 2006, Николенко и др., 2018).

Часть результатов обучения сети представлена на рис. 6. На скриншоте собраны несколько дочерних форм с интересующими нас данными: форма Back Propagation с установленными эпохами и скоростью обучения (слева сверху); архитектура сети (справа); средние квадратические погрешности (СКП) полученного в ходе обучения результата (в средней части): при применении 1–70 наборов TError = 0.38024; 71–100 наборов – VError = 0.7463. В нижней части рис. 6 показано графическое изображение процесса обучения по эпохам в двух цветах: синий – при использовании обучающих наборов, красный – наборов верификации. В текстовых полях (выше графика и справа) приведены значения тех же погрешностей Error T = 0.5245 и V = 0.8587. Эти значения больше, чем показанные выше, так как здесь они соответствуют конкретному прогону, а вышеприведенные значения указывались как среднее между всеми запущенными ранее прогонами обучения.

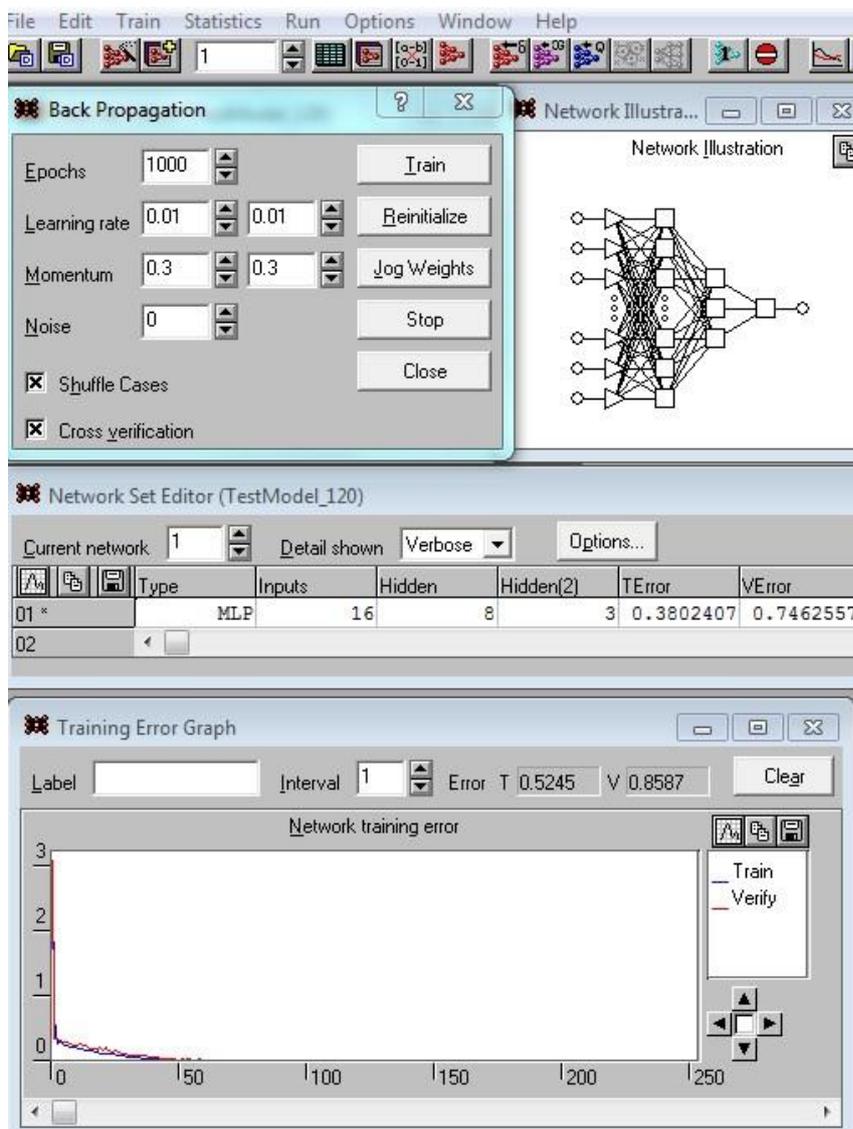


Рис. 6. Часть результатов обучения на трех дочерних формах
Fig. 6. Part of learning outcomes on three child forms

Использование обученной сети для получения выходного результата

Когда сеть обучена, можно использовать ее для решения поставленных задач, таких как задачи регрессии, получения численного результата (прогноза) (задачи классификации, типизации, кластеризации в данном случае не решаются). Для этого сделаем выбор Run/One-off Case; в появившейся на экране форме с тем же названием заполним строку любыми данными, которые необходимо проверить "на результат" (рис. 7). В верхней части скриншота показано появившееся меню, а внизу – форма с линейкой из 16 элементов, которые следует заполнить.

На рис. 7 представлено состояние уже заполненной строки; по ее открытым элементам видно, что указаны значения базового набора данных. Его можно ввести по ячейкам, что займет много времени, поэтому

целесообразно сохранить данные в строке Excel, скопировать ее и вставить в строку формы, изображенной на рис. 7 (действие выполнимо, так как форматы данных в Excel и в нашей строке одинаковы). Затем следует нажать кнопку Run и получить в текстовом поле Output результат $D_c = 347.35$ м, практически совпадающий со значением 346.9, полученным при испытании модели с использованием базового набора ее параметров. Особо отметим, что базовый набор занимал 121-ю строку и не участвовал в обучении сети.

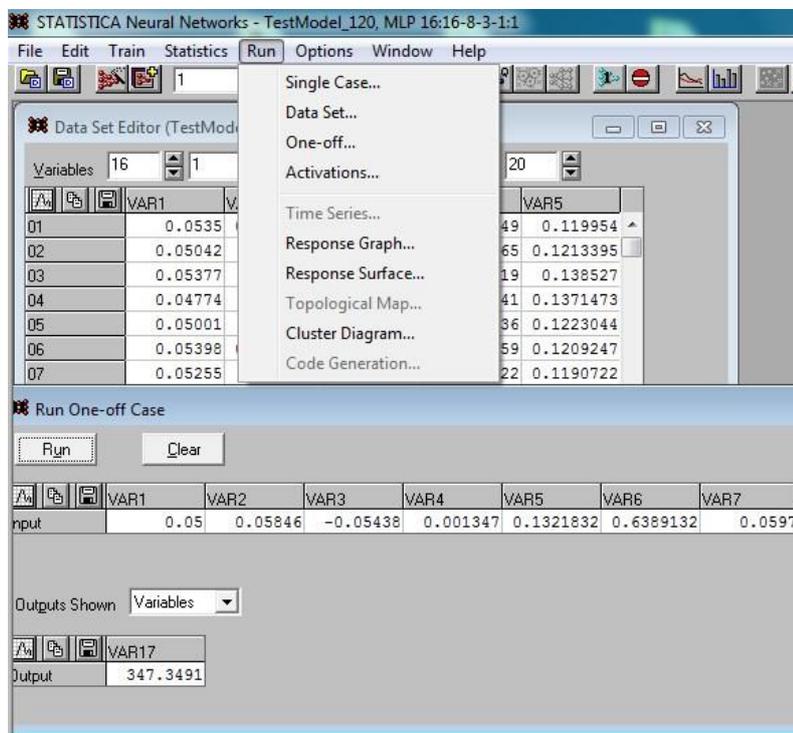


Рис. 7. Проверка работы обученной сети на произвольном наборе входных данных
 Fig. 7. Checking the work of the trained network on an arbitrary set of input data

Упрощенный вариант тестирования – использование любой строки из наборов с 101 по 120, так как они специально планировались для целей тестирования. В этом случае в меню (рис. 7) следует выбрать Single Case и в появившейся форме (рис. 8) в текстовом поле Case No ввести номер набора, который хотим проверить. Наберем номер 111, нажмем кнопку Run и получим результат 335.4 (при целевом значении 336). Ниже показана фактическая погрешность порядка -0.6 . Нажатие кнопки Up\Down рядом с номером набора меняет его номер на единицу и сразу дает значения Output, Target и Error без нажатия Run.

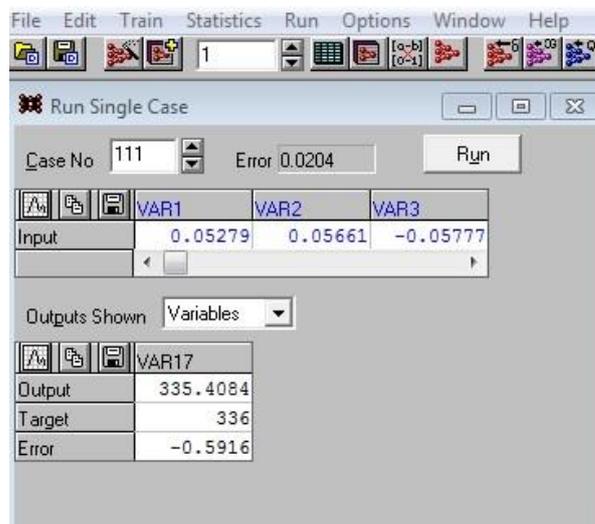


Рис. 8. Проверка работы обученной сети с использованием наборов входных данных 101–120
 Fig. 8. Checking the work of the trained network on a set of input data for testing (sets 101–120)

Результаты и обсуждение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что сеть для поставленной задачи строится без особых усилий и достигаются вполне удовлетворительные результаты по точности прогноза. Результаты целесообразно улучшить посредством вариации действий на различных этапах процесса, но это требует более глубокого погружения в нейросети как самой проблемы, так и конкретной технологии решения. Нейронная сеть фактически вырабатывает матрицы перехода от одного слоя к другому, порядок этих матриц зависит от размера соседних слоев. В нашей сети переход от входа к первому скрытому слою требует создания матрицы размером $M(8 \times 16)$, чтобы при умножении ее справа на вектор-столбец входов $V(16 \times 1)$ получить вектор $V(8 \times 1)$, являющийся вектором входов первого скрытого слоя. Матрица, о которой идет речь, называется весовой. Но реальность несколько сложнее: то, что поступит на вход любого слоя, должно быть обработано нейроном, а не просто пройти через него. Нелинейная функция, которая обрабатывает внутренние входы, называется функцией активации. Данные функции в некотором смысле моделируют работу реальных нейронов; существует набор активационных функций, характеризующихся разной частотой использования. Наиболее часто применяются такие функции, как линейная, сигмоидная, гиперболический тангенс; в некоторых системах программирования можно создавать свои функции активации. В SNN такой возможности нет, поэтому используем тот набор функций, который она предоставляет.

Назначаем функции активации для некоторого слоя выбором Edit\Network, затем в выпадающем списке выбираем нужную функцию (рис. 9). Обратим особое внимание на поле Error function, в котором указана строка Sum-squared, означающая, что система будет использовать для оценки качества обучения сети среднюю квадратическую погрешность, т. е. среднюю сумму квадратов отклонений полученных результатов от целевых значений для данного набора.

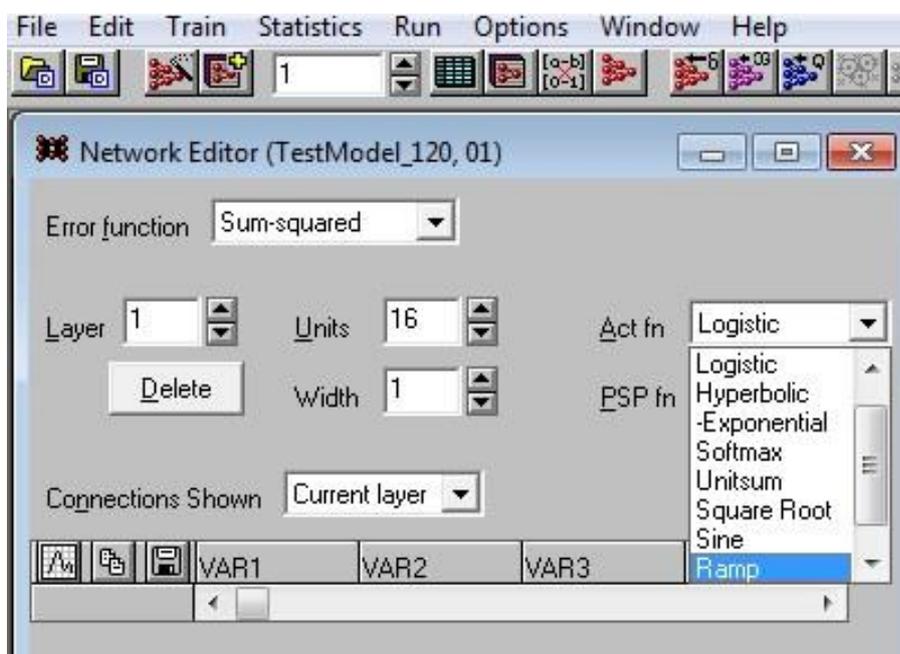


Рис. 9. Выбор функций активации для слоев сети
Fig. 9. Selection of activation functions for network layers

В окне Network Editor выбираем номер слоя в поле Layer – входного слоя 1 (число входов 16). Клик на поле Act fn дает выпадающий список с перечнем возможных десяти функций активации: Linear, Logistic, Hyperbolic, Exponential, Softmax, Unitsum, Square Root, Sine, Ramp, Step. Клик на любой функции определяет выбор ее для нейронов всего слоя. Меняя номера слоев и производя такой выбор, определяем все функции активации нашей сети. В дальнейшем их можно менять, исследуя альтернативные архитектуры и следя за эффектом таких изменений по величине СКП.

Строгие установки о том, какие активации следует назначать по слоям, не предусмотрены; скорее, это эвристическая процедура. Целесообразно сделать несколько вариантов сети и выбрать вариант, дающий лучшие результаты (меньшую СКП). Более того, если разрешить системе SNN создавать набор сетей (Set NetWorks) и при изменении сети соглашаться на его сохранение, то все созданные сети остаются в наборе и система сама выбирает лучшую (Best) из них (рис. 10).

В ходе решения конкретной задачи – предсказания диаметра D_c установившейся циркуляции танкера – были проверены сети, имеющие архитектуру $16 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, при следующих вариантах активационных функций по слоям (табл. 2).

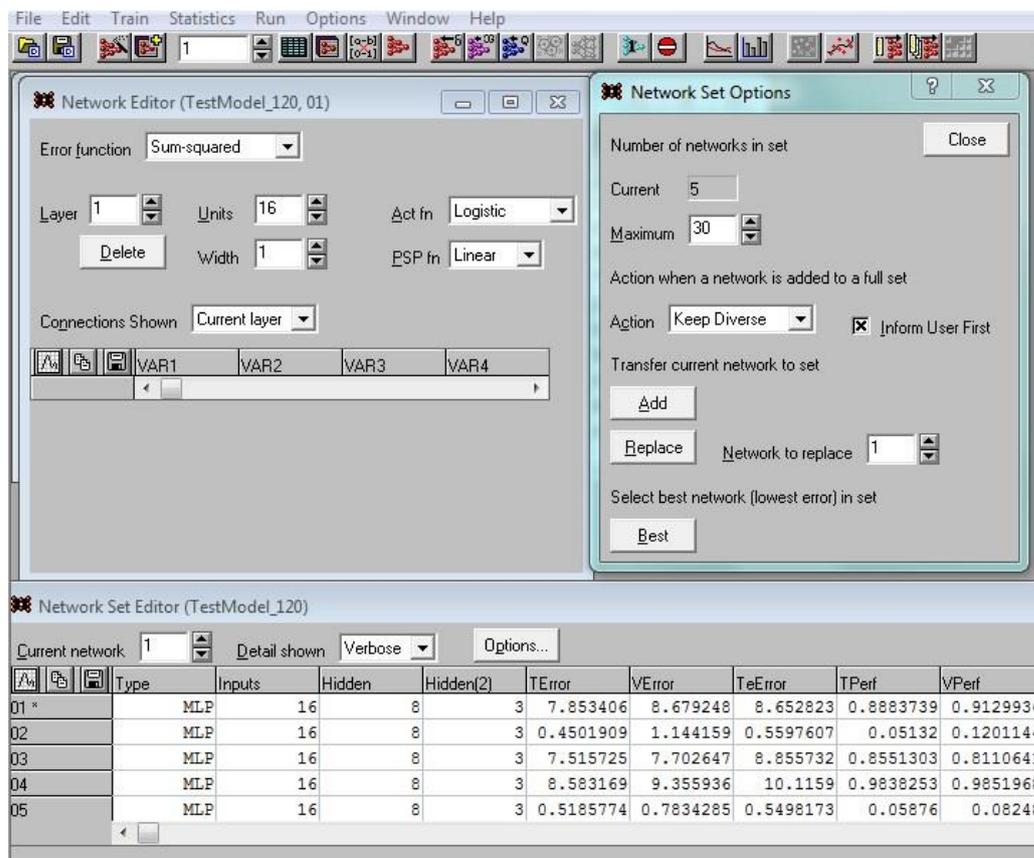


Рис. 10. Создание набора сетей с оценкой точности каждой из них (здесь максимум составляет 30 сетей)

Fig. 10. Creation of a set of networks with an assessment of the accuracy of each (the maximum consists of 30 networks)

Таблица 2. Функции активации по слоям для пяти вариантов сети
Table 2. Activation functions by a layer for five network options

Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	TError	VError
Logistic	Hyperbolic	Exponential	Linear	7,853	8,679
Logistic	Hyperbolic	Linear	Linear	0,450	1,144
Logistic	SoftMax	Logistic	Linear	7,516	7,703
Hyperbolic	Logistic	Exponential	Linear	8,583	9,356
Exponential	Hyperbolic	Logistic	Linear	0,519	0,783

Результаты существенно различаются; они приведены в табл. 2 (столбцы под названиями TError и VError). Эти результаты отражают погрешности, полученные по обучающему и верификационному множествам наборов. Система сама выставила иерархию пяти сетей, дав самый высокий уровень пятой сети. Такая полная информация о сетях набора вызвана выбором режима Verbose (подробно) в поле Detail shown.

В форме выше (справа), которая выпадает при нажатии кнопки Options, можно оперировать объектами сетевого набора – отдельными сетями, например, добавить новую сеть (Add) или удалить старую (Replace).

В системе SNN существует еще одна возможность обработки входных и входных данных, которая носит название пред/постпроцессорная обработка. Все установки, связанные с ней, выполняются в форме, которая вызывается выбором Edit/Pre/Post Processing (рис. 11).

Среди процедур предварительной и конечной обработки данных нас интересует процедура, позволяющая понять, как работает система SNN с этими данными. Речь идет о масштабировании данных, которые

поступают на вход и должны появиться на выходе. Они крайне неоднородны по значениям (положительные и отрицательные значения; числа порядка сотен и значения порядка 10^{-3}) и тем самым затрудняют работу системы. Поэтому система масштабирует данные так, чтобы все новые нормализованные значения попадали, например, в интервал (0, 1). Для этого используются мультипликативные (Scale) и аддитивные (Shift) коэффициенты, которые указаны в соответствующих столбцах таблицы, представленной на рис. 11.

	Convert	Missing	Min/Mean	Max/SD	Shift	Scale
VAR1	Minimax	Mean	0	1	-4.724882	104.325
VAR2	Minimax	Mean	0	1	-4.748573	89.7389
VAR3	Minimax	Mean	0	1	5.525272	92.41905
VAR4	Minimax	Mean	0	1	-4.708957	3882.802
VAR5	Minimax	Mean	0	1	-4.533234	38.07131
VAR6	Minimax	Mean	0	1	-4.548297	7.904195
VAR7	Minimax	Mean	0	1	-4.534201	84.27504
VAR8	Minimax	Mean	0	1	-4.531042	104.6083
VAR9	Minimax	Mean	0	1	-4.568533	2004.028
VAR10	Minimax	Mean	0	1	-19.99703	895.7925
VAR11	Minimax	Mean	0	1	8.81949	4558.114
VAR12	Minimax	Mean	0	1	-4.67635	68.15829
VAR13	Minimax	Mean	0	1	5.875888	441.7098
VAR14	Minimax	Mean	0	1	-4.629763	77.53651
VAR15	Minimax	Mean	0	1	-4.99726	2.739726
VAR16	Minimax	Mean	0	1	-4.635897	5.128205
VAR17	Minimax	Mean	0	1	-11.48276	0.03448

Рис. 11. Пред/постпроцессорная обработка данных
 Fig. 11. Pre/post processing of data

Используем это обстоятельство для решения задачи, которая не предусмотрена системой SNN. Сеть обучалась для выходной переменной, в качестве которой был выбран диаметр установившейся циркуляции D_c . Но в равной мере нас интересуют и другие характеристики установившейся циркуляции: скорость хода V_c , угловая скорость поворота ωC , угол дрейфа βc (возможен прогноз и других характеристик, но пока ограничимся этими тремя). Для их получения следует трижды сменить выходную переменную, для каждой из них снова провести обучение сети и лишь затем получить требуемый прогноз V_c , ωC и βc . Реализуем прогноз иначе: воспользуемся уже существующим прогнозом D_c , который переведем в нормированное значение и с его помощью восстановим прогнозы других переменных в исходном формате (т. е. ненормированном).

В самой системе SNN выполнить указанную задачу невозможно, поэтому прогнозы по D_c для всех 120 наборов данных записываем в виде файла: выбором Run\Data Set получаем выпадающую форму (рис. 12), нажимаем Run и в таблице прогнозных значений для 120 наборов данных выбираем первый столбец обычным обводом. Кликом на выбранной зоне правой кнопкой получаем возможность копирования и затем переноса в блокнот в виде файла. Дальнейшая работа с этими результатами будет происходить в иной вычислительной системе, выберем MathCad15 (далее – MathCad).

В этой среде считываем файл прогнозов D_c и далее работаем с ними; результаты будут показаны на скриншотах из MathCad.

В среде MathCad считываем файл с результатами прогнозов по данным обученной сети с помощью функции чтения READPRN текстового файла TestModel000.txt. Содержимое файла считано в матрицу Mall; в нее включены 121 строка и 20 столбцов, так как к 17 "старым" столбцам мы добавили 3 столбца

дополнительных значений маневренных характеристик V_c , omC и beC . Обычными присвоениями получаем четыре вектор-столбца D_c , V_c , omC , beC (рис. 13).

	VAR17	T. VAR17	E. VAR17	Error
01	357.2298	357	0.2298321	0.007925
02	345.8314	345	0.8314299	0.02867
03	344.2456	345	-0.754424	0.02601
04	356.0916	356	0.09164	0.00316
05	345.6671	346	-0.3329	0.01148
06	356.9742	357	-0.02577	0.0008886
07	355.8675	355	0.867496	0.02991
08	340.5873	340	0.587308	0.020252
09	356.5616	357	-0.4384	0.01512
10	356.3477	356	0.3477068	0.01199
11	345.0156	345	0.01561	0.0005381
12	343.712	344	-0.288	0.009932
13	348.7619	349	-0.2381	0.00821
14	339.6269	340	-0.3731	0.01287
15	344.2838	345	-0.7162	0.0247
16	348.8386	350	-1.161415	0.0400488
17	360.3043	361	-0.6957	0.02399
18	337.9665	339	-1.033462	0.0356366

Рис. 12. Выбор прогнозных значений диаметра D_c
 Fig. 12. Choice of predictive values of the D_c diameter

```
namfil1 := "C:\Users\Admin\Desktop\Mathcad14\НЕЙРО_СЕТЬ\from_SNN_Matr\TestModel000.txt"
```

```
Mall := READPRN(namfil1)           nM := rows(Mall)           nM = 121
```

```
Dc := Mall<16>           omC := Mall<19>           beC := Mall<18>           Vc := Mall<17>
```

Рис. 13. Вектор-столбцы D_c , V_c , omC , beC
 Fig. 13. Column-vectors D_c , V_c , omC , beC

Затем создаем две пользовательские функции для получения нормированного значения переменной и ее денормированного значения – функции $Norm(dc,mi,ma)$ и $deNorm(dcN,mi,ma)$, в которых mi и ma означают максимальное и минимальное значения некоторого множества. Эти значения для векторов легко найти, используя функции MathCad $min()$ и $max()$, применив их к векторам D_c , V_c , omC , beC . Приведем их значения для понимания дальнейших действий (табл. 3).

Таблица 3. Минимальные и максимальные значения для четырех маневренных элементов на циркуляции
 Table 3. Minimum and maximum values for four maneuverable elements on the circulation

Значение	D_c , м	V_c , м/с	omC , град/мин	beC , град
Min	332	4,137	40,088	18,454
Max	364	4,252	42,783	20,091

Далее из матрицы с данными с целью проверки идеи возьмем произвольно 7-ю строку со значениями этой четверки характеристик 351; 4,205; 41,176 и 19,11. Они были обработаны указанным образом: найдено

нормированное значение D_c , названное $N_{dc} = 0,594$. С его помощью и функции $deNorm$ определены в MathCad прогнозные значения $beC = 19,426$; $vc = 4,205$; $omC = 41,689$. На скриншоте слева (рис. 14) показаны эти процедуры и полученные прогнозы, правее их приведены действительные значения. Сравнение значений свидетельствует о том, что прогноз весьма удовлетворителен, т. е. адекватен результатам стандартных натуральных испытаний.

$$\text{Norm}(dc, mi, ma) := \frac{(dc - mi)}{ma - mi} \qquad \text{deNorm}(dcN, mi, ma) := mi + dcN \cdot (ma - mi)$$

$$N_{dc} := \text{Norm}(351, 332, 364) \qquad N_{dc} = 0.594$$

$$beC := \text{deNorm}(0.594, 18.454, 20.091) \qquad beC = 19.426 \qquad 19.11$$

$$vc := \text{deNorm}(0.594, 4.137, 4.252) \qquad vc = 4.205 \qquad 4.205$$

$$omC := \text{deNorm}(0.594, 40.088, 42.783) \qquad omC = 41.689 \qquad 41.176$$

Рис. 14. Процедуры нормирования и денормирования и полученные прогнозы
 Fig. 14. Procedures for normalization and denormalization and the resulting forecasts

Прогнозы носят вероятностный характер, и их совпадение в одной строке не говорит о качестве прогноза в целом. Поэтому ту же процедуру применим к векторам D_c , V_c , omC , beC (рис. 13). С помощью вектора D_c получим нормированный вектор $V_N_{dc} = \text{Norm}(V_D_c, 332, 364)$. Затем, используя только его как основу, найдем денормированные векторы значений остальных характеристик:

$$V_beN = \text{deNorm}(V_N_{dc}, 18.454, 20.091);$$

$$V_omN = \text{deNorm}(V_N_{dc}, 40.088, 42.783);$$

$$V_vdN = \text{deNorm}(V_N_{dc}, 4.137, 4.252).$$

Здесь префикс $V_$ в обозначениях переменных подчеркивает их принадлежность к вектор-столбцам. Значения этих векторов не приводятся, так как каждый из них содержит 120 элементов (строк).

Вычислим среднюю квадратическую погрешность прогноза для этих характеристик по всему множеству из 120 наборов данных. Результат такого сравнения, выполненного в среде MathCad, показан на рис. 15. Денормированные векторы характеристик вычитаются поэлементно из фактических значений, разности возводятся в квадрат и складываются по всем наборам от 1 до 120. Результат делится на число наборов 120 и извлекается корень квадратный. На рис. 15 приведены выражения из MathCad и полученные значения СКП (справа). Сравнение этих значений свидетельствует о том, что совокупность векторов-прогнозов адекватна результатам стандартных натуральных испытаний.

$$QU_v := \sqrt{\sum_k \frac{(V_{vdN}_k - V_{c_k})^2}{120}} \qquad QU_v = 1.646 \times 10^{-3}$$

$$QU_{be} := \sqrt{\sum_k \frac{(V_{bedN}_k - beC_k)^2}{120}} \qquad QU_{be} = 0.952$$

$$QU_{om} := \sqrt{\sum_k \frac{(V_{omdN}_k - omC_k)^2}{120}} \qquad QU_{om} = 1.567$$

Рис. 15. Расчет средней квадратической погрешности по трем прогнозируемым характеристикам на всем наборе данных
 Fig. 15. Calculation of the root mean square error for three predictive characteristics on the entire data set

Полученные результаты дают основание заключить, что предлагаемый подход к прогнозу всех характеристик по прогнозу только одной из них оправдывает себя. Действительно, подсчитаем относительные погрешности этих трех прогнозов: делим каждую СКП на среднее значение прогнозируемого параметра:

- для V_c $(0,001646 / 4,2) \cdot 100 \% = 0,04 \%$;
- для beC $(0,952 / 19,3) \cdot 100 \% = 4,9 \%$;
- для omC $(1,567 / 41,5) \cdot 100 \% = 3,8 \%$.

С технической точки зрения, полученные значения свидетельствуют об удовлетворительном результате применения рассматриваемого подхода к прогнозу всех характеристик, т. е. предлагаемый способ можно считать работающим.

В введении было отмечено, что мы воспользуемся двумя вычислительными средствами для решения поставленной задачи. Предыдущие результаты были получены с помощью среды SNN; все этапы решений, анализа и совершенствования результатов продемонстрированы на формах, предоставляемых этой средой (рис. 2–12). Такая работа очень эффективна, если необходимо получить конкретный статичный результат. Но система SNN не дает возможности использовать результат динамично, применяя его немедленно, например, для целей управления. Она также "скрывает" часть промежуточных результатов, не позволяя реализовать их для собственных целей изменения промежуточных результатов.

Поэтому логично использовать среду с языком программирования и расширяющимися пакетами, которые содержат функции для работы с нейронными сетями. Нами выбрана среда SciLab³ (Satish..., 2009), свободно распространяемая в Интернете, содержащая язык программирования высокого уровня и набор прикладных пакетов, в том числе пакет ANN (Artificial Neural Nets) для работы с сетями. Он подгружается в вычислительную среду SciLab средствами системы. В разделе help среды SciLab описаны 30 функций пакета ANN_toolbox. Несколько из них приведены в табл. 4 в оригинале и с переводом.

Таблица 4. Функции пакета ANN_toolbox
Table 4. Functions of the ANN_toolbox package

Функция	Перевод
ann_FF_INT – internal implementation of feedforward nets	– внутренняя реализация сетей прямого распространения
ann_FF_grad – error gradient trough finite differences	– градиент ошибки через конечные разности
ann_FF_grad_BP – error gradient trough backpropagation	– градиент ошибки через обратное распространение
ann_FF_init – initialize the weight hypermatrix	– инициализировать гиперматрицу весов
ann_FF_run – run patterns trough a feedforward net	– запускать паттерны через сеть прямого распространения
ann_d_log_activ – derivative of logistic activation function	– производная от логистической функции активации
ann_d_sum_of_sqr – derivative of sum-of-squares error	– производная ошибки суммы квадратов
ann_log_activ – logistic activation function	– функция логистической активации
ann_pat_shuffle – shuffles randomly patterns for an ANN	– случайным образом перемешивает шаблоны для ИНС

Часть терминов нам знакома по пакету SNN (например, Backpropagation, Activation function и др.), что облегчает переход в новую программную среду. Используя эти функции, можно решать вариативные сетевые задачи в автоматизированном режиме. К тому же все функции имеют открытый код, что отличает новую среду от системы SNN, где такие решения выполняются только в ручном режиме. На рис. 16 показан короткий отрезок программы SciLab, демонстрирующий применение всего лишь двух функций для обучения сети и получения тестового решения. Строки программы пронумерованы для удобства комментирования.

Прокомментируем программу, в начале которой без номеров приведена написанная нами функция активации, являющаяся несомненным преимуществом программного решения (такой возможности не было в SNN). Функция оформлена определенным образом: ее собственное имя sigelu обрамлено ключевыми словами ann_ и _activ, только тогда она узнается системой. Поэтому следующая за ней функция является производной от sigelu, ее отличает добавление в имя символа дифференциала d. Производная необходима для реализации процедуры BackPropagation оптимизации сети.

³ Руководство по работе с пакетом SCILAB. 2004. 200 с. URL : https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/308603/mod_resource/content/1/Scilab.pdf (Обращение 26.05.23).

Строка 1 открывает текстовый файл для чтения с 120 наборами данных для обучения (он знаком по работе в SNN). В строках 2–4 происходит чтение файла в матрицу с именем ISXODN, после чего файл закрывается строкой 5. В строке 6 заданы значения параметров структуры сети 16, 8, 3, 1. Они вносятся строкой 6 в список NN, он определяет затем архитектуру сети. В строках 9 и 10 содержатся матрица входов L_INPUT и вектор целей L_GOAL из 70 строк для обучения. В строке 11 определен список fa, состоящий из трех строчных значений с именами функций активации по слоям сети.

```
function [y]=ann_sirelu_activ(x)
y=x/(1+exp(-x))
endfunction
function [y]=ann_d_sirelu_activ(x)
y=(1+exp(-x))*(1+x)/((1+exp(-x))*(1+exp(x)))
endfunction

1. f=mopen('c:\dats\TestModel_120.txt','r');
2. for i=1:120; for j=1:17;
3. ISXODN(i,j)=mfscanf(f,'%g');
4. end; end;
5. mclose(f);
6. nS0=16;nS1=8;nS2=3;nS3=1;
7. NN=[nS0 nS1 nS2 nS3];
8. r=[0 1];
9. L_INPUT=ISXODN(1:70,1:nS0);
10. L_GOAL=(ISXODN(1:70,nS0+1));
11. fa=['ann_tansig_activ','ann_logsig_activ','ann_sirelu_activ']
12. W_gd=ann_FFBP_gd(L_INPUT,L_GOAL,NN,fa,0.001,1000,1e-10,1e-10);
13. k=105;
14. goal_test=TEST(k,nS0+1);
15. input_test=TEST(k,1:nS0);
16. y_test_gd=ann_FFBP_run(input_test,W_gd,fa);
```

Рис. 16. Программа в SciLab, решающая задачу обучения сети и выполнения тестового решения
Fig. 16. Program in SciLab that solves the problem of training the network and executing a test solution

Главной в программном коде, показанном на рис. 16, можно считать строку 12, в которой используется функция `ann_FFBP_gd`, значение которой присваивается переменной `W_gd`. Это сложная списочная переменная, которая содержит в качестве элементов три весовые матрицы переходов W между слоями и три вектора смещений S . Они получены в процессе обучения сети, определяют переход от слоя к слою и гарантируют минимально возможную погрешность результатов прогноза. Этот переход можно описать формулой

$$V_{\text{вых}} = fa(WV_{\text{вх}} + S),$$

где $V_{\text{вх}}$, $V_{\text{вых}}$ – вектор-столбцы входа и выхода; W – матрица весов; S – вектор смещения; fa – функция активации.

Далее можно употреблять элементы W и S в своих целях, например, самостоятельно оценивать погрешность или проверять действие разных функций активации, в том числе и собственного конструирования (Clevert et al., 2015). Удобно также организовывать работу по прогнозу с новыми наборами данных. Строки 14 и 15 позволяют выбрать для тестирования любую строку k (здесь $k=105$) из массива данных `input_test` и соответствующий ей результат `goal_test`. Тестирование выполнено в строке 16 программы обращением к функции пакета `ann_FFBP_run`.

Результаты выполнения программы приведены на рис. 17, где показаны процесс обучения сети по эпохам (слева) и график этого процесса в виде MSE (СКП), а также приведен целевой результат 348 и его прогноз 357, выполненный в строке 16. Относительная погрешность составила $9/348 \approx 2,5\%$.

Полученные результаты требуют более глубоких сравнительных оценок, которые предстоит провести в ходе дальнейших исследований по данной теме.

В среде SNN матрицу весов W и вектор смещения S также можно получить; они появляются на форме NetWork Editor (рис. 18). На ней в формате Excel выведены эти важные элементы работы по обучению сети, которые можно перенести в среду Excel, выделив мышкой всю область экрана монитора, и обычным копированием перенести на лист табличного процессора. Затем следует работать с частями этой области обычным образом.

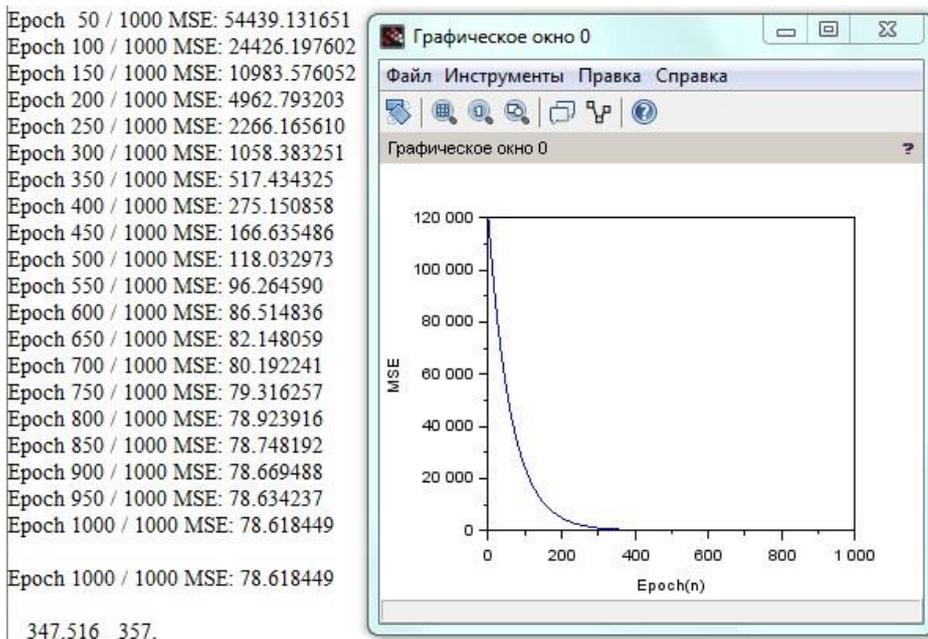


Рис. 17. Результаты выполнения программы
Fig. 17. The results of running the program

	h1#01	h1#02	h1#03	h1#04	h1#05	h1#06	h1#07	h1#08	h2#01	h2#02	h2#03	VAR17
Threshold	0.217087	0.3210215	-0.5088	0.3461872	0.2123942	-1.133292	-0.1912	0.2217951	0.6224243	0.2922363	0.9694061	-0.5276
VAR1	0.5759804	-0.2139	-0.1851	0.5102043	-1.01189	0.3493258	-0.8352	0.1341888				
VAR2	0.1457057	-0.1049	-0.691	-0.1351	0.4384726	-0.7048	-0.983	0.06327				
VAR3	-0.6064	0.00839	0.172269	0.5174006	-0.0135	0.06254	-0.5754	0.3293989				
VAR4	0.3437804	-0.3382	-0.1214	0.002801	-0.03254	-0.472927	0.7647526	0.2636704				
VAR5	0.3594457	0.8335396	-0.4407	-0.716	0.2292609	-0.457787	-0.3916	-0.1588				
VAR6	-0.7563	0.8094553	-0.2841	0.1111783	-0.1856	0.1562756	-0.9218	-0.1646				
VAR7	0.4444219	0.8684042	1.176852	-0.458	0.4962717	0.2587392	0.2899545	0.2026335				
VAR8	0.9477319	-0.07037	-0.3507	0.186558	-0.828381	0.8546913	-0.198	-0.583438				
VAR9	0.3697394	-0.020375	0.1835338	-0.5462	-1.007248	-0.1506	0.4896804	0.01982				
VAR10	-0.4158	-0.108	0.01938	0.4378547	-0.3112	0.08182	0.5784873	0.1377023				
VAR11	-0.7546	0.6379606	0.2386985	0.4448303	-0.2077	0.106598	-0.2245	0.3523047				
VAR12	-1.025825	0.9381955	-0.1789	-0.6865	-0.8869	-0.6691	-0.9415	0.24306				
VAR13	-0.759158	0.9762368	0.6014601	-0.7881	-0.7151	-0.4337	0.9621863	0.2399583				
VAR14	0.1231254	0.3579847	-0.1108	0.2200864	0.9131269	0.1760071	0.5991597	-0.1238				
VAR15	-0.5021	-0.2101	0.9095391	0.09096	-0.1454	-1.253334	0.5167753	-1.901281				
VAR16	0.7906255	0.5466644	-0.8027	0.6218805	0.8730862	-0.7761	0.6315441	0.5553287				
h1#01									-0.02505	-0.7256	0.9500563	
h1#02									0.243909	0.05702	0.2110641	
h1#03									0.6188767	-0.003659	0.9872862	
h1#04									0.3196231	-0.8578	-0.3647	
h1#05									-0.1848	-0.01648	-0.702573	
h1#06									-0.6309	0.2766878	0.9203362	
h1#07									-0.3352	-0.7559	-0.8489	
h1#08									-0.701	0.8835748	0.9212403	
h2#01												-0.6776
h2#02												0.1744832
h2#03												0.0599916

Рис. 18. Весовые матрицы и векторы смещения между слоями сети
Fig. 18. Weight matrices and bias vectors between network layers

Диапазон ячеек (рис. 18) обозначим как (h1#01:Treshhold,var17:h2#03). Его первая строка содержит только коэффициенты смещения между слоями: S1 – 8 значений; S2 – 3 значения; S3 – 1 значение. Диапазон ячеек (h1#01:var1, h2#08:var16:) является первой матрицей весов W1, диапазон (h2#01:h1#01, h2#03:h1#08) – второй матрицей W2, диапазон (var17:h2#01, var17:h2#03) – матрицей W3 (столбец).

Пакет ANN в SciLab дает возможность непосредственно (без выполнения дополнительных процедур) обращаться к этим характеристикам. В программе (рис. 17) это делается так: W_gd(1), W_gd(2), W_gd(3), где W_gd – список, полученный в строке 12.

Выводы

Оценка возможностей использования аппарата нейронных сетей для исследования математических моделей движения судна показала, что коррекция с помощью сети идентифицированных параметров выбранной модели адекватна результатам стандартных натуральных испытаний, определенных резолюцией ИМО № 137 от 2002 г. "Стандарты маневренных качеств судов".

При использовании программного комплекса (Пашенцев, 2018) появляется возможность: а) проведения произвольного числа испытаний вариативных моделей судна и получения массива данных для работы по обучению нейронной сети; б) построения сети, имеющей в качестве входных данных параметры модели и любую из маневренных характеристик в качестве выхода.

Сеть выбранной архитектуры построена с помощью пакетов StatisticaNN и ANN SciLab, обучена на массиве из 120 наборов данных, результат обучения использован для целей прогнозирования (регрессии). Ошибка не превысила приемлемого технического уровня (5 %).

Для обычных пользователей более удобным в применении является пакет SNN; быстрее получается конечный прогноз, но результаты прогноза возможно использовать только в ручном режиме.

Программирующим пользователям пакет ANN (в SciLab, аналогично в MathLab) позволяет написать достаточно простую программу, используя функции пакета, и применить полученные результаты для разных целей управления процессом расчетов (например, можно динамически менять выходные переменные из набора данных). Эта возможность является преимуществом данного пакета, хотя требует дополнительной работы программистов.

Работа с нормированными данными в SNN позволяет по нормированному выходному результату одной из маневренных характеристик (например, Dc) предсказать достаточно точно остальные характеристики (Vc, beC, omC) для установившейся циркуляции, не производя для каждой из них нового обучения сети.

Констатируем в итоге, что с помощью нейронной сети решена поставленная задача определения маневренной характеристики судна по параметрам математической модели. Это решение открывает возможность выполнения главной (обратной) задачи – определения параметров математической модели по заданным маневренным характеристикам судна. Подобные исследования будут выполняться в рамках кафедральной инициативной НИР в 2023–2025 гг.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Николенко С. И., Кадури А. А., Архангельская Е. О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Питер, 2018. 480 с.
- Оценка влияния параметров математических моделей судна на его маневренные характеристики : св-во рег. программ для ЭВМ / С. И. Позняков, С. В. Пашенцев ; № 2006612406 ; заявл. 10.05.2006 ; зарег. 10.07.2006.
- Позняков С. И., Юдин Ю. И. Сравнение математических моделей с точки зрения коэффициентов влияния // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 2. С. 241–245. EDN: ICJVKJ.
- Программный комплекс построения математической модели судна по теоретическому чертежу и ее испытания в 16 режимах работы с учетом внешних воздействий : св-во рег. программ для ЭВМ / С. В. Пашенцев ; № 2018615122 ; заявл. 12.03.2018 ; опубл. 26.04.2018.
- Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект : модели и концепции эволюционной кибернетики. М. : URSS, 2022. 224 с. (Синергетика: от прошлого к будущему ; № 23).
- Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского: в 3 т. Л. : Судостроение, 1985. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. 768 с.
- Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М. : Вильямс, 2019. 1104 с.
- Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Идентификация математической модели судна. М. : Моркнига, 2015. 157 с.
- Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. Springer Science+Business Media, LLC, 2006. 738 p.
- Clevert D., Unterthiner T., Hochreiter S. Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (ELUs). 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.07289.pdf>.
- Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H., De Jesús O. Neural network design. Boston : PWS Pub., 2014. 800 p.
- Satish Annigeri. Scilab: A Hands on Introduction. 2009. URL: <https://www.cse.iitb.ac.in/~cs626-449/scilab.pdf>.

References

- Nikolenko, S., Kadurin, A., Arkhangelskaya, E. 2018. Deep learning. Dive into the world of neural networks. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Pashentsev, S. V., Poznyakov, S. I. 2006. Evaluation of the influence of the parameters of mathematical models of the ship on its maneuvering characteristics. The program is deposited in the copyright protection agency (RosAPO). Sert. No. 2006612406, 07/10/2006. (In Russ.)
- Pozdnyakov, S. I., Yudin, Yu. I. 2006. Comparison of mathematical models in terms of coefficients of influence. *Vestnik of MSTU*, 9(2), pp. 241–245. EDN: ICJVKJ. (In Russ.)
- Pashentsev, S. V. 2018. A software package for constructing a mathematical model of a vessel according to a theoretical drawing and its testing in 16 operating modes, taking into account external influences. The complex was deposited in the federal service (FSISPTZ). Cert. No. 2018615122, 04/26/2018. (In Russ.)
- Redko, V. G. 2022. Evolution, neural networks, intelligence: Models and concepts of evolutionary cybernetics. Moscow. (Synergetics: from past to future; N 23) (In Russ.)
- Handbook of ship theory. 1985. Ed. Ya. I. Voytkunsky. 3 vol. Leningrad. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance to vessel traffic. Ship propulsors. (In Russ.)
- Khaikin, S. 2019. Neural networks: Full course. Moscow. (In Russ.)
- Yudin, Yu. I., Pashentsev, S. V. 2015. Identification of the mathematical model of the ship. Moscow. (In Russ.)
- Bishop, C. M. 2006. Pattern recognition and machine learning. Springer.
- Clevert, D., Unterthiner, T., Hochreiter, S. 2015. Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (ELUs). URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.07289.pdf>.
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jesús, O. 2014. Neural network design. Boston.
- Satish, Annigeri. 2009. Scilab: A Hands on Introduction. URL: <https://www.cse.iitb.ac.in/~cs626-449/scilab.pdf>.

Сведения об авторе

Пашенцев Сергей Владимирович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. физ.-мат. наук, профессор;
e-mail: serpass15@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1512-341X>

Sergey V. Pashentsev – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Arctic University,
Cand. Sci. (Phys.&Math.), Professor; e-mail: serpass15@yahoo.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1512-341X>

УДК [664.95:597.552.3]:543.27.08

Применение "электронного носа" для оценки легколетучих соединений полуфабрикатов мелкой рыбы

Ю. В. Аллоярова

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: alloyarovayuv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-5887>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
07.08.2023;

получена
после доработки
10.11.2023;

принята к публикации
20.11.2023

Ключевые слова:

"электронный нос",
мойва,
копчение,
копильный гель,
дымовоздушная
среда

Реферат

Производство консервов является одним из динамично развивающихся сегментов рыбной отрасли. Инструментальная оценка состава легколетучих фракций (ароматов) копченых полуфабрикатов мойвы, направляемых на производство консервов, проводилась с применением анализатора запахов МАГ-8 в равновесной газовой фазе над образцами. Для надежного установления различий в составе легколетучих соединений применен метод предварительного концентрирования компонентов в пробоотборнике. После насыщения свободного пространства над пробой сигналы при нагрузке сенсоров равновесной газовой фазой возрастали от 2,5 до 3 раз. Однако принципиальных отличий в характере влияния разных способов обработки полуфабрикатов мойвы не установлено. При нативных (естественных) условиях формирования запаха проб мойвы и предварительном концентрировании их в равновесной газовой фазе качественный и количественный составы запаха различаются, но сохраняется тенденция большего содержания соединений в образце, обработанном копильным гелем, по сравнению с мороженой мойвой и образцом, обработанным дымовоздушной смесью. Для насыщенных паров установлено, что по 3 параметрам (вкладам в сорбцию сенсоров 1, 3, 8) пробы, обработанные дымовоздушной смесью и копильным гелем, обладают сходным составом (в отличие от мороженой мойвы). Сенсоры 5, 6 и 7 не различают запах всех проб, т. е. реагируют на летучие соединения мойвы. Сенсор 4 отражает близость показателей влажности мороженой мойвы и мойвы, обработанной копильным гелем. В результате корреляционного анализа установлены соответствия полученных химических проб, в том числе большее влияние на состав легколетучих фракций (аромата) при использовании дымовоздушной смеси по сравнению с применением копильного геля.

Для цитирования

Аллоярова Ю. В. Применение "электронного носа" для оценки легколетучих соединений полуфабрикатов мелкой рыбы. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 489–502. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-489-502>.

Application of the "electronic nose" for evaluating volatile compounds of semi-finished small fish

Yuliya V. Alloyarova

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: alloyarovayuv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-5887>

Article info

Received
07.08.2023;

received
in revised
10.11.2023;

accepted
20.11.2023

Key words:

"electronic nose",
capelin,
smoking,
smoking gel,
smoke-air ambient

Abstract

The production of canned food is one of the dynamically developing segments of the fishing industry. An instrumental assessment of the composition of highly volatile fractions (aromas) of smoked semi-finished capelin products sent for the production of canned food has been carried out using a MAG 8 odor analyzer in the equilibrium gas phase above the samples. To reliably establish differences in the composition of highly volatile compounds, the method of preliminary concentration of components in a sampler has been used. After saturation of the free space above the sample, the signals increased from 2.5 to 3 times when the sensors were loaded with the equilibrium gas phase. However, no fundamental differences in the nature of the influence of different methods of processing semi-finished capelin products have been established. Under native (natural) conditions for the formation of the odor of capelin samples and their preliminary concentration in the equilibrium gas phase, the qualitative and quantitative compositions of the odor differ, but the tendency remains for a higher content of compounds in the sample treated with smoke gel compared to frozen capelin and the sample treated with a smoke-air mixture. For saturated vapors, it has been established that according to 3 parameters (contributions to the sorption of sensors 1, 3, 8), samples treated with a smoke-air mixture and smoke gel have a similar composition (unlike frozen capelin). Sensors 5, 6 and 7 do not distinguish the smell of all samples, i.e. they react to volatile compounds of capelin. Sensor 4 reflects the proximity of the moisture indicators of frozen capelin and capelin treated with smoking gel. As a result of the correlation analysis, the correspondence of the obtained chemical samples has been established, including a greater influence on the composition of highly volatile fractions (aroma) when using a smoke-air mixture compared to using a smoking gel.

For citation

Alloyarova, Y. V. 2023. Application of the "electronic nose" for evaluating volatile compounds of semi-finished small fish. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 489–502. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-489-502>.

Введение

Импортозамещение значимых видов продукции рыбохозяйственного комплекса и усиление продовольственной безопасности являются целями развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации (Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 г.¹). По данным Росстата, производство рыбной продукции за первые пять месяцев 2023 г. составило 1,8 млн т (на 5,5 % выше уровня 2022 г.)². Использование в пищевом рационе рыбной продукции способствует поддержанию здоровья и повышению продолжительности жизни населения, что подтверждается рядом исследований (Byrd *et al.*, 2022). Доля рыбы и рыбопродуктов в РФ в 2016–2021 гг. в среднем на потребителя составляла 22 кг, из них 2,2 кг – рыбные консервы (данные за 2021 г.)³.

Для продления срока хранения или улучшения органолептических свойств рыбы применяется несколько технологий ее обработки. Консервы типа "Рыба копченая в масле" неуклонно пользуются спросом у населения (Аллюрова, 2020). Копчение – древняя технология обработки рыбы, широко используемая в рыбной промышленности. Процесс копчения придает продуктам привлекательный цвет и уникальный аромат, которые зависят не только от разнообразия летучих ароматических соединений, но и от их относительного количества (Du *et al.*, 2021; Tümerkan, 2022). В древесном дыму идентифицировано до 1 100 химических соединений (из них более 400 летучих). Фенольные соединения признаны веществами, формирующими ароматические характеристики копченых продуктов. Альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, спирты, сложные эфиры и многие другие компоненты древесного дыма вносят свой вклад в вариации дымного аромата (Yin *et al.*, 2021). Коптильная жидкость применяется в качестве пищевой добавки и представляет собой более безопасную альтернативу традиционному процессу копчения (Xin *et al.*, 2021a). Жидкий дым, сконденсированный из древесного дыма, используется в качестве пищевого ингредиента для улучшения сохранности, ароматизации и окраски обработанных пищевых продуктов (Xin *et al.*, 2021b). Жидкий дым позволяет сформировать специфический ароматический букет копченой рыбы – один из отличительных признаков данного продукта, и потребители при выборе ориентируются преимущественно на него. Аромат (состав легколетучих соединений), вкус, цвет, структурно-механические свойства образуют общую совокупность органолептических факторов копченых продуктов.

Сенсорная оценка традиционно используется для определения характеристик аромата пищевых продуктов и выполняется группой опытных дегустаторов. Данный вид оценки является традиционным и незаменимым, но у него есть ограничения, заключающиеся в том, что этот метод продолжителен по времени, при его применении значительную роль играют физиологические и психологические особенности дегустаторов (Tian *et al.*, 2018; Головкова и др. 2021).

Анализ исключительных возможностей обонятельных рецепторов носа в обнаружении, распознавании и различении сложных смесей химических веществ, наряду с быстрым прогрессом в понимании того, как работает обонятельная система человека, стимулировал разработку электронных аналогов этой биологической системы. Отклики отдельных датчиков запаха, объединенные в массив, где каждый датчик обладает несколько иной избирательностью отклика и чувствительностью к запахам, при объединении с помощью подходящих математических методов могут предоставлять информацию для различения многих запахов образца. "Электронный нос" – система анализа летучих веществ, основанная на летучих компонентах образцов, которая имитирует обонятельную систему человека и использует газовые датчики для построения кривых отклика в ходе быстрого определения состава летучих веществ. "Электронный нос" часто применяют для исследования запахов, чтобы компенсировать необъективное суждение сенсорной оценки (Huang *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2020).

В настоящее время технология "электронного носа" широко используется для оценки качества пищевой продукции благодаря ее многочисленным преимуществам по сравнению с традиционными методами и технологиями обнаружения, которые могут не подходить для онлайн-контроля качества пищевых продуктов (Козырев и др., 2021; Кучменко и др., 2021a, 2021б, 2021в; Barea-Ramos *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

Целью данного исследования являлась инструментальная оценка изменений профилей ароматов полуфабрикатов мойвы, приготовленных с использованием дымовоздушной среды (ДВС) и коптильного геля (КГ), в сравнении с мороженой мойвой.

¹ Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351735594?marker=656010> (дата обращения: 30.07.2023).

² Российская рыбная отрасль работает стабильно и позволяет наращивать объемы производства рыбной продукции: за пять месяцев произведено на 5,5 % больше – 1,8 млн т. URL: <https://fish.gov.ru/news/2023/07/05/rossijskaya-rybnaaya-otrasl-rabotaet-stabilno-i-pozvolyaet-narashivat-obemy-proizvodstva-rybnoj-produkczi-za-pyat-mesyacev-proizvedeno-na-55-bolshe-18-mln-tonn/> (дата обращения: 30.07.2023).

³ Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах в 2021 г. по итогам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Potreb_prod_pitan-2021.pdf (дата обращения: 30.07.2023).

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовались:

– мойва *Mallotus villosus* мороженая баренцевоморская; срок хранения 3,5–4 месяца; не ниже первого сорта в соответствии с ГОСТ 32366 "Рыба мороженая. Технические условия"⁴ и ТР ЕАЭС 040/2016 "О безопасности рыбы и рыбной продукции"⁵;

– изготовленный полуфабрикат мойвы холодного копчения (параметры копчения: температура ДВС 26–28 °С; скорость движения ДВС 1,5–2,5 м/с);

– полуфабрикат из мойвы, приготовленный с применением КГ.

Полуфабрикаты изготовлены из мороженого сырья. Полуфабрикат холодного копчения приготовлен в условиях и с помощью технологического оборудования учебно-экспериментального цеха Мурманского арктического университета. КГ произведен с применением следующих компонентов: крахмал картофельный (ГОСТ 53876-2010⁶); коптильная жидкость AntonioSilver (ТУ 2455-001-00471633-03⁷, разработка Мурманского государственного технического университета).

"Электронный нос" – устройство, способное идентифицировать отдельные и сложные газы, состоящее из нескольких газовых датчиков с перекрывающимися свойствами и соответствующим методом классификации образов. Состав легколетучей фракции (аромата) исследовался в НИЛ ООО "Сенсорика – новые технологии" (г. Воронеж) с применением экспериментального анализатора запахов МАГ-8 ("электронный нос", Россия) в равновесной газовой фазе (РГФ) над образцами.

В ходе анализа составов легколетучей фракции (ароматов) полуфабрикатов копченой мойвы, приготовленных по разным рецептурам и технологиям, использовались:

образец 1 – мойва мороженая без обработки, сырье (контрольный образец);

образец 2 – мойва, приготовленная с использованием КГ;

образец 3 – мойва, приготовленная с применением ДВС.

Методика исследования

Состав аромата оценивался в НИЛ ООО "Сенсорика – новые технологии" с помощью экспериментального анализатора запахов МАГ-8 (рис. 1, а). Режим анализатора при исследовании – фронтальная загрузка/подача аналитов из образца в околосенсорное пространство (frontal analyte input).

Профили летучих веществ были охарактеризованы с помощью "электронного носа", который содержал десять различных датчиков на основе оксидов металлов (МОП). В измерительном массиве использовались восемь сенсоров – пьезокварцевых резонаторов типа объемных акустических волн (ОАВ) с разнохарактерными наноструктурированными сорбентами на электродах из набора Living system (Kuchmenko, 2017; Кучменко, 2015). Частота колебаний ОАВ составляла 14,0 МГц. Выбор сенсоров произведен с учетом обеспечения селективности в отношении различных классов летучих соединений (табл. 1) (Kuchmenko, 2017; Kuchmenko et al., 2014; Кучменко и др., 2014, 2021а, 2021б, 2021в).

Таблица 1. Свойства сенсоров анализатора запахов МАГ-8
Table 1. Properties of the odor analyzer MAG 8 sensors

Номер сенсора	Название сенсора	Чувствительность к веществам						
		Спирты	Кетоны	Кислоты	Арены	Амины	Органические кислоты	Сложные эфиры
1 и 8	Карбоксилированные углеродные нанотрубки (МУНТ _{-соон})	х*	х	х	х	–	–	–
2 и 7	Нитрат оксида циркония Zr	х	–	–	–	х	х	–
3	Дициклогексан-18-Краун-6 (ДЦГ18К6)	х	х	–	–	–	–	х
4 и 5	Биогидроксиапатит (ГА)	х	х	х	х	х	–	–
6	Полиэтиленгликоль сукцинат (ПЭГск)	–	–	–	–	х	–	–

Примечание. *Буквой "х" обозначается хорошая чувствительность к указанным веществам.

⁴ ГОСТ 32366-2013. Рыба мороженая. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014. 24 с.

⁵ ТР ЕАЭС 040/2016. О безопасности рыбы и рыбной продукции : Технический регламент Евразийского экономического союза № 162 : [принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 г.]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/%D0%A2%D0%A0%20%D0%95%D0%90%D0%AD%D0%A1%20040-2016.pdf> (дата обращения: 05.11.2023).

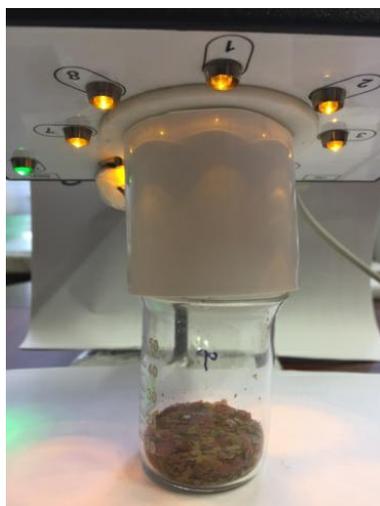
⁶ ГОСТ Р 53876–2010. Крахмал картофельный. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2011. 12 с.

⁷ ТУ 2455-001-00471633–03. Жидкость коптильная "AntonioSilver". Технические условия / Иваней А. А. Никонова А. С. // Технологии пищевых производств : каталог науч.-техн. разработок / Мурман. гос. техн. ун-т. Мурманск, 2016. С. 12. URL: http://www.mstu.edu.ru/science/results/files/tpp_2016.pdf (дата обращения: 13.12.2023).

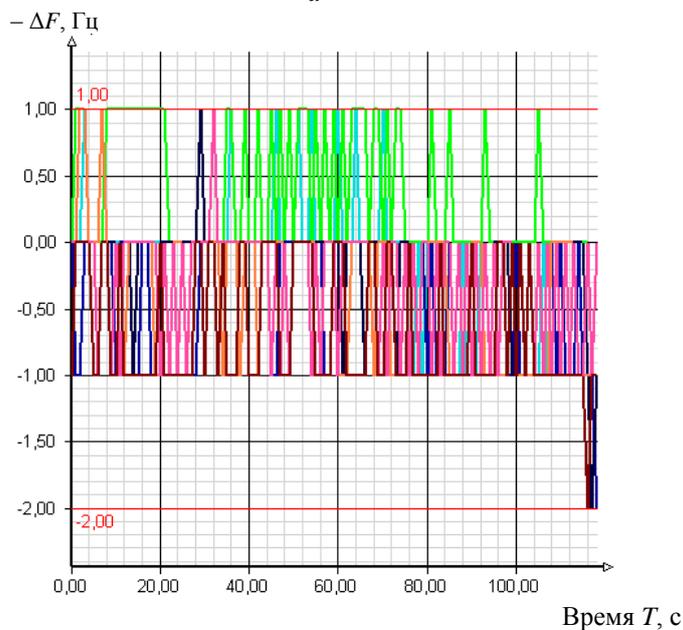
Подготовка проб к анализу

Варианты представленных для испытаний проб массой 10 г и с температурой 20 °С укладывали в пробоотборники и выдерживали 20 мин для формирования над образцами насыщенной РГФ.

В период активного измерения в течение 80 с базовая линия сенсоров в массиве без нагрузки в ячейке детектирования оставалась стабильной (колебания не более ± 1 Гц) (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Фронтальное исследование образца с помощью анализатора газов МАГ-8 (а);
полученные хроночастотограммы сенсоров (б)

Fig. 1. Frontal study of the sample on the MAG 8 gas analyzer (а);
the obtained chronoperiodograms of the sensors (б)

Режим измерения

Фронтальное исследование аналитов осуществлялось в течение 200 с и включало следующие периоды:
0–80 с – сенсоры расположены над образцами, легколетучие фракции (аромат) поступают в околосенсорное пространство фронтально;

81–200 с – десорбция образцов от сенсоров с открытой ячейкой детектирования.

При повторных экспериментах воспроизводимость измерений для сенсора 1 (наименьшая чувствительность) составила 3–5 %, а для сенсора 8 (наибольшая чувствительность) – не более 10 %.

В качестве результатов исследования анализатор запахов МАГ-8 создает выходную кривую пьезосенсора (хроночастотограмму), на которой выводится динамика значений частоты колебаний сенсоров и продолжительности работы сенсоров (рис. 2). Хроночастотограммы в дальнейшем используются для анализа.

Суммарный аналитический сигнал получается при использовании алгоритма интегральной обработки сигналов сенсоров и представляется в виде "визуального отпечатка" – графика максимальных сигналов. В целях определения состава легколетучих фракций (аромата) использовали наибольшие отклики восьми сенсоров – полные "визуальные отпечатки" максимумов, которые соответствовали максимальным откликам сенсоров в РГФ за первый период испытаний. Полученные результаты позволяют установить соответствие между составами легколетучих фракций (ароматов) исследуемых вариантов образцов (Kuchmenko, 2017). Установленное программное обеспечение также позволяет производить автоматический расчет площадей под полученными кривыми.

Для проведения анализа данных использовались характеристики:

1) качественные:

– сопоставление полученного "визуального отпечатка" и набора "визуальных отпечатков", находящихся в базе данных соединений;

– идентификация отдельных соединений или типов веществ, находящихся в смеси, с использованием метрик A_{ij} , полученных от сенсоров при проведении исследования (Kuchmenko et al., 2014);

2) количественные:

– площадь фигуры "визуального отпечатка" S_{Σ} , Гц·с, позволяющая определить интенсивность легколетучих фракций (аромата), их концентрацию, а также содержание воды;

– значения максимумов показаний сенсоров с наиболее активной или специфической пленками сорбентов ΔF_{\max} , Гц, применяемая для оценки содержания отдельных классов органических соединений в РГФ методом нормировки (Kuchmenko, 2017).

Отклики сенсоров зафиксированы, обработаны и сопоставлены с использованием программного обеспечения (ПО) анализатора MAG Soft.

Методика получения и обработки результатов

Для выбранных точек каждого образца снимали показания сенсоров в РГФ, эксперименты проводили в двукратной повторности.

По полученным в результате сенсорной оценки хроночастотограммам определяли количественные показатели: площади "визуальных отпечатков" и максимальные значения откликов. Экспериментальные данные представлены на рис. 2.

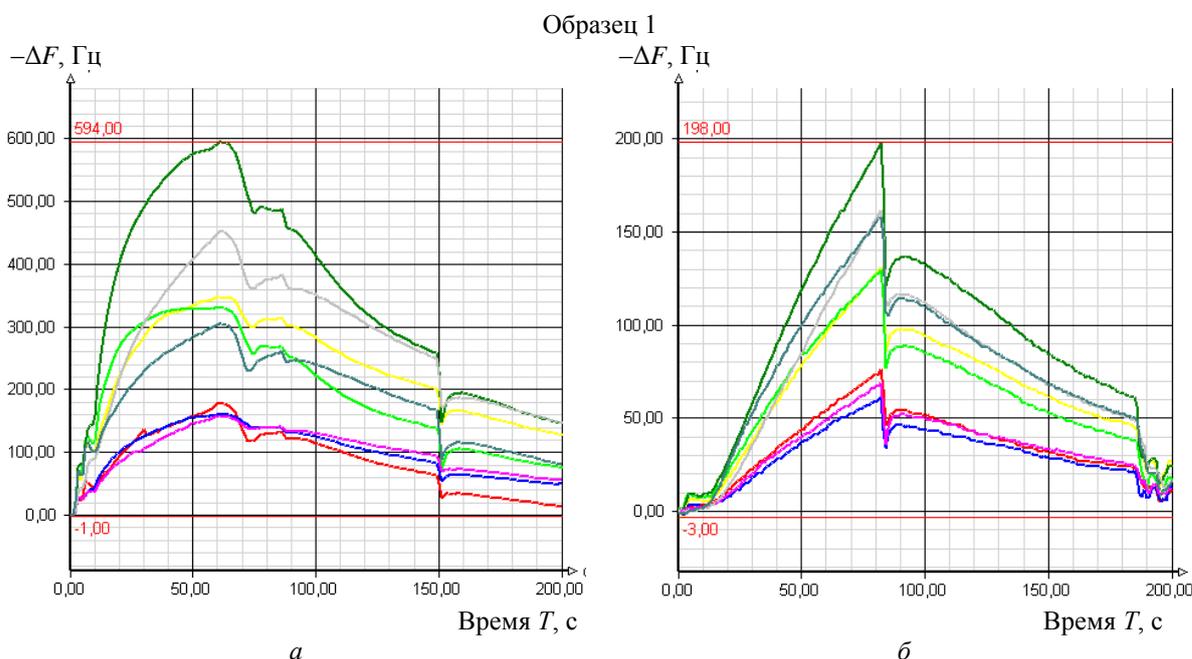


Рис. 2. Хроночастотограммы сенсоров массива при измерении запаха проб мойвы в режимах предварительного насыщения в пробоотборнике с применением фронтального ввода паров и без насыщения (естественное состояние пробы):

a – вариант 1 (насыщенные пары); b – вариант 1 (разбавленное нативное состояние);

Fig. 2. Chronoperiodograms of array sensors when measuring the smell of capelin samples in the pre-saturation mode in the sampler and frontal vapor injection and without saturation (natural state of the sample):

a – option 1 (saturated vapors); b – option 1 (diluted native state); c – option 2 (saturated vapor);

z – option 2 (dilute native state)

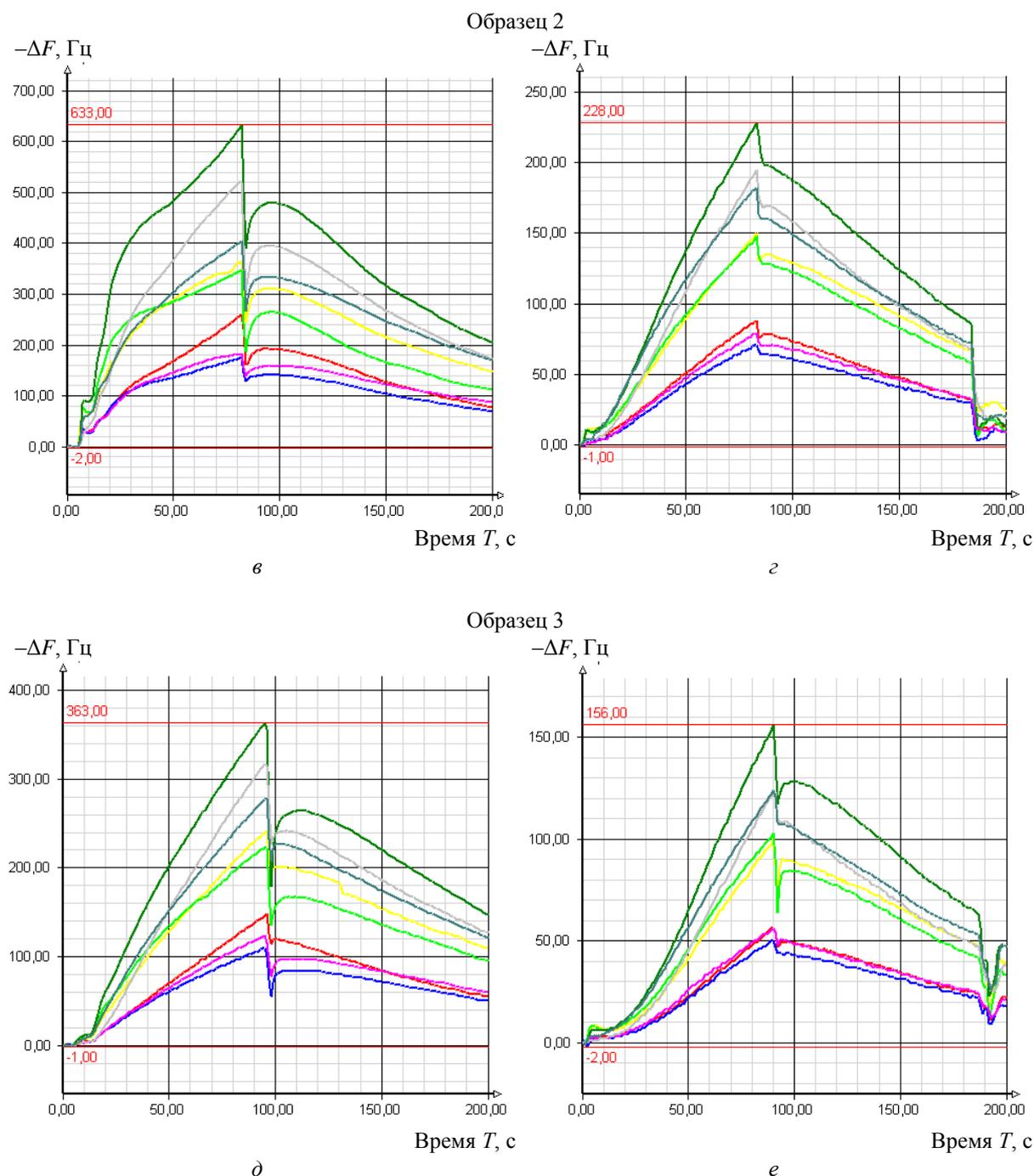


Рис. 2 (продолжение). Хроночастотограммы сенсоров массива при измерении запаха проб мойвы в режимах предварительного насыщения в пробоотборнике с применением фронтального ввода паров и без насыщения (естественное состояние пробы):
 в – вариант 2 (насыщенные пары); г – вариант 2 (разбавленное нативное состояние)
 д – вариант 3 (насыщенные пары); е – вариант 3 (разбавленное нативное состояние)
 Fig. 2 (continued). Chronoperiodograms of array sensors when measuring the smell of capelin samples in the pre-saturation mode in the sampler and frontal vapor injection and without saturation (natural state of the sample): д – option 3 (saturated vapor); е – option 3 (dilute native state)

С помощью встроенной программы производили фиксацию сигналов от набора сенсоров, формировали "визуальный отпечаток".

В ходе сопоставления составов легколетучих фракций (ароматов) исследованных образцов применяли метод наложения следов летучих веществ ("визуальных отпечатков" максимальных сигналов сенсоров). Далее методом нормировки определяли параметры для сравнения проб: A_{ij} и массовую долю отдельных

групп соединений ω , мас.%, по вкладу в суммарный показатель сигналов отдельных сенсоров (*Kuchmenko, 2017*).

При соответствии качественного и количественного состава образцов эти показатели в пределах допустимой вариации должны быть близкими. А при изменении состава легколетучих фракций (аромата) наблюдается расхождение одного или нескольких качественных показателей, например спектра качественного состава (параметры A_{ij}).

В ходе исследования произведено графическое изображение спектров качественного состава рассматриваемых образцов по показателям A_{ij} , изучена динамика их изменения с последующей проверкой корреляции полученных матриц параметров A_{ij} .

Используемые в ходе анализа экспериментальные данные статистически надежны, грубые промахи и неоднородность исключены.

Последующий корреляционный и регрессионный анализ полученной информации проводился с помощью интернет-приложения "Корреляционно-регрессионный анализ"⁸.

Результаты и обсуждение

Установление отличий в составах легколетучих фракций

В целях нахождения достоверных отличий в составах легколетучих фракций (ароматах) исследуемых образцов использовали способ, включающий подготовительную концентрацию компонентов в пробоотборнике. Сигналы сенсоров после насыщения РГФ легколетучими фракциями анализируемых образцов возрастают до 2,5–3 раз (табл. 1). Вместе с тем существенного влияния способов обработки мойвы на изменение характера состава легколетучих фракций образцов не установлено. В образце мойвы, обработанной с использованием КГ, значительно повышается содержание легколетучих фракций, в том числе воды. В образце мойвы, приготовленной с ДВС, заметно изменяется химический состав запаха.

Анализатор запахов МАГ-8 определяет значения максимальных и минимальных откликов работающих в ходе эксперимента сенсоров, а также площадь "визуального отпечатка", полученную при нанесении экстремальных значений на график (табл. 2). Поэтому для оценки изменений в качественном и количественном составе легколетучих соединений проб мойвы, поступающих из тушки в РГФ и околосенсорное пространство, сравним первичную информацию – величины откликов выбранных сенсоров в массиве и величины количественного интегрального сигнала "электронного носа" – площади "визуального отпечатка" минимальных откликов (табл. 1).

Таблица 2. Средние отклики сенсоров и площадь круговой диаграммы сигналов сенсоров
Table 2. Average responses of sensors and the circle diagram area of sensor signals

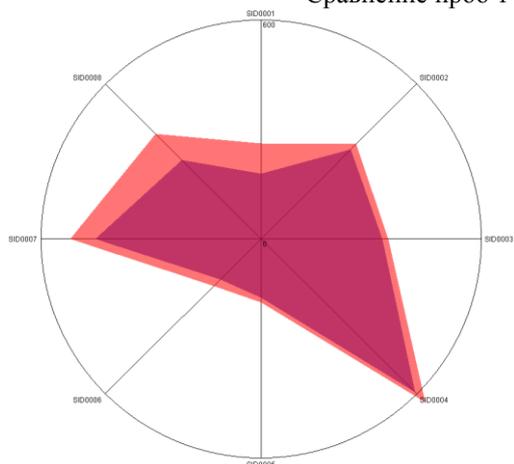
Номер сенсора	Насыщенные пары			Разбавленные пары		
	Мойва			Мойва		
	мороженая	с КГ	с ДВС	мороженая	с КГ	с ДВС
1	178	261	148	76	88	56
2	347	336	242	131	150	100
3	331	347	223	130	148	103
4	594	633	363	198	228	156
5	161	175	109	61	71	50
6	158	182	124	69	79	56
7	452	520	317	162	195	123
8	305	405	278	158	182	124
$S\Sigma_{\max}$, Гц·с	194 354	325 468	104 281	21 450	53 996	17 122

Таким образом, для естественных условий формирования комплекса легколетучих фракций (аромата) образцов мойвы и в случае их первоначальной концентрации в РГФ качественный и количественный составы запаха незначительно отличаются. Вместе с тем общий характер отличий представляется следующим: количественное содержание исследуемых веществ в образцах 1 и 3 меньше, чем в образце 2.

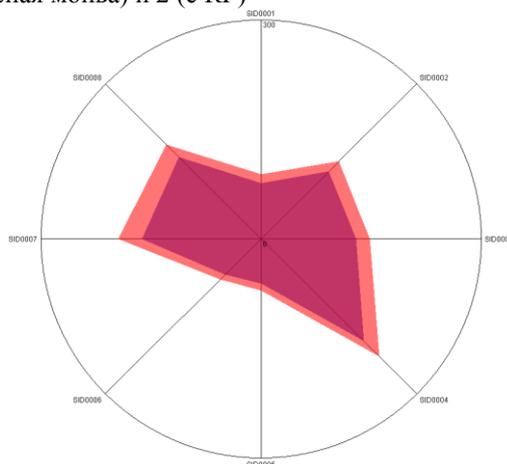
При рассмотрении полученных от сенсоров диаграмм "визуального отпечатка" подтверждаются различия в химическом составе равновесно-газовой фазы над всеми исследованными образцами. Количественное сравнение интенсивности ароматов исследованных образцов представлено на рис. 3.

⁸ Корреляционно-регрессионный анализ // Медицинская статистика. URL: <https://medstatistic.ru/calculators/calccorrelation.html> (дата обращения: 04.07.2023).

Сравнение проб 1 (мороженая мойва) и 2 (с КГ)

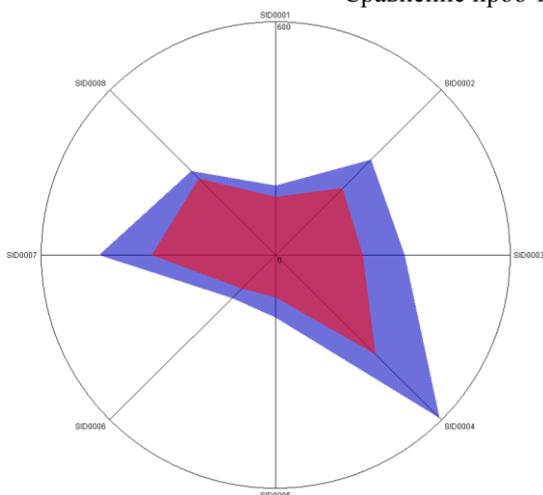


Насыщенные равновесные фазы
 Площадь: базовый образец: 267 949,3;
 сравниваемое измерение: 352 050,4.
 Расхождение площадей 84 101,2.
 Относительное расхождение 31,4 %

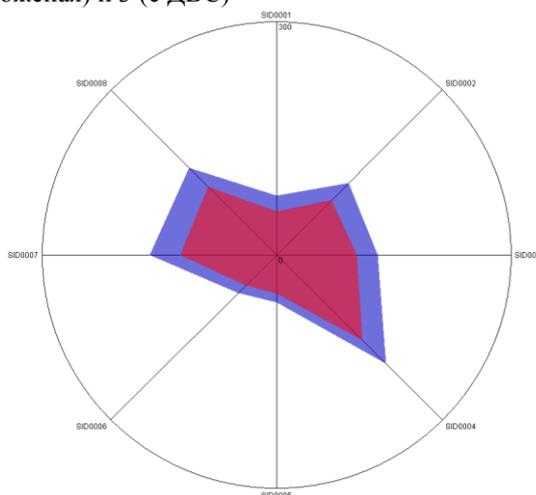


Нативные условия
 Площадь: базовое измерение 41 646,8;
 сравниваемое измерение 55 809,1.
 Расхождение площадей 14 162,3.
 Относительное расхождение 34,0 %

Сравнение проб 1 (мороженая) и 3 (с ДВС)

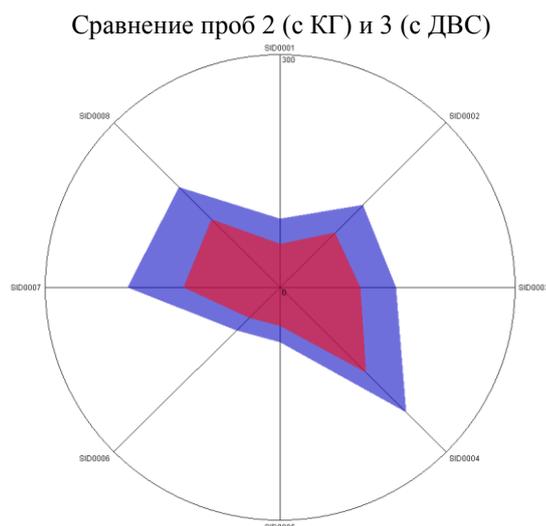


Насыщенные равновесные фазы
 Площадь: базовое измерение 267 949,3;
 сравниваемое измерение 138 731,5.
 Расхождение площадей 129 217,8.
 Относительное расхождение 48,2 %



Нативные условия
 Площадь: базовое измерение 41 646,8;
 сравниваемое измерение 25 332,8.
 Расхождение площадей 16 314,0.
 Относительное расхождение 39,2 %

Рис. 3. Диаграммы "визуальных отпечатков" сигналов сенсоров в РФФ над пробами и статистика сравнения. По круговой оси указаны номера сенсоров в массиве, по вертикальной – максимальные отклики сенсоров за время измерения (ΔF_{\max} , Гц)
 Fig. 3. "Visual prints" of the sensor signals in the equilibrium gas phase above the samples. Along the axes are indicated: along the circular – the numbers of sensors in the array, along the vertical – the maximum responses of the sensors during the measurement (ΔF_{\max} , Hz)



Нативные условия
 Площадь: базовое измерение 55 809,1;
 сравниваемое измерение 25 332,8.
 Расхождение площадей 30476,3.
 Относительное расхождение 54,6 %

Рис. 3 (продолжение). Диаграммы "визуальных отпечатков" сигналов сенсоров в РГФ над пробами и статистика сравнения. По круговой оси указаны номера сенсоров в массиве, по вертикальной – максимальные отклики сенсоров за время измерения (ΔF_{\max} , Гц)
 Fig. 3 (continued). "Visual prints" of the sensor signals in the equilibrium gas phase above the samples. Along the axes are indicated: along the circular – the numbers of sensors in the array, along the vertical – the maximum responses of the sensors during the measurement (ΔF_{\max} , Hz)

Определение содержания отдельных групп веществ

Рассмотрим количественное содержание отдельных групп соединений в составе анализируемой смеси, выделяемых с помощью массива сенсоров, настроенного на определенные типы легколетучих фракций (табл. 3). Основным критерием нормировки являются максимальные отклики сенсоров, зарегистрированные в период проведения исследования.

Таблица 3. Относительное содержание компонентов в пробах ω ($\pm 0,5$), мас. %
 Table 3. Relative content of components in samples ω (± 0.5), % wt

Номер сенсора	Насыщенные пары			Разбавленные пары		
	Мойва			Мойва		
	мороженая	с КГ	с ДВС	мороженая	с КГ	с ДВС
$\omega 1$	7,05	9,13	8,2	7,72	7,71	7,29
$\omega 2$	13,7	11,8	13,4	13,3	13,1	13,0
$\omega 3$	13,1	12,1	12,4	13,2	13	13,4
$\omega 4$	23,5	22,1	20,1	20,1	20	20,3
$\omega 5$	6,4	6,1	6,0	6,2	6,2	6,5
$\omega 6$	6,25	6,37	6,87	7,0	6,9	7,3
$\omega 7$	17,9	18,2	17,6	16,5	17,1	16,0
$\omega 8$	12,1	14,2	15,4	16,0	16,0	16,2

При условии насыщенных паров образцы 2 и 3 имеют более близкие между собой значения трех параметров – вкладов в сорбцию сенсоров 1, 3 и 8 – по сравнению с образцом 1. Показания сенсоров 5, 6 и 7 свидетельствуют об одинаковом составе легколетучих фракций исследуемых образцов. По результатам работы сенсора 4 можно судить о близких значениях влажности образцов 1 и 2. Показатели образцов, которые выдерживались на воздухе, характеризуются значительно меньшими различиями, однако общий характер дифференциации образцов сохраняется для данных, полученных с помощью сенсора 7.

В табл. 4 представлены идентифицированные в пробах легколетучие вещества – типичные вещества, по которым предварительно "обучался" массив сенсоров.

Таблица 4. Вещества с высокой вероятностью присутствия в легколетучих фракциях образцов
 Table 4. Substances with a high probability of being present in the volatile fractions of samples

Образец мойвы	Насыщенные пары	Разбавленные пары
Мороженная	Ацетон, вода, гексанон, метиламин, метилпропанон, пентанол, триэтиламин, триметиламин	Амины простого и сложного строения, ацетон, бензальдиаль, вода, гексанон, кислоты, метиламин, метилпропанон, триэтиламин, пентанол, триметиламин
Приготовленная с КГ	Амины простого и сложного строения, бензальдиаль, вода, метиламин, пропандиаль, спирты, триэтиламин, триметиламин	1,2-спирты, диэтиламин, диметилциклогексиламин, кетоны, кислоты, пиридинкарбальдегид, пропиламин
Приготовленная с ДВС	Молочная кислота, муравьиная кислота	Бензальдегид, бензальдиаль, гексанон, изопропанол, кислоты, метилбензальдегид, метил-О-этиламин, метил-О-пропиламин, циклогексиламин, циклопентиламин, этиламинол

Отличия используемых маркеров объясняются различным содержанием указанных веществ в образцах и их перераспределением в процессе исследования в окружающую воздушную среду.

Изменения интегрального восприятия аромата исследуемых образцов целесообразно оценить с помощью матриц параметров A_{ij} , которые показывают динамику изменения соотношений концентраций отдельных типов легколетучих веществ. Показатели A_{ij} отражают неизменность/схожесть ароматов исследуемых образцов.

В случае различия показателей сигналов сенсоров можно сделать вывод о том, что концентрации отдельных групп веществ в РФФ исследуемых образцов также различаются. Например, отличие показателя на 40 % и более свидетельствует о существенных различиях качественного состава присутствующих типов веществ в ароматах образцов.

Для нахождения различия в качественном составе легколетучих фракций в ходе исследований были определены 28 расчетных параметров A (рис. 4).

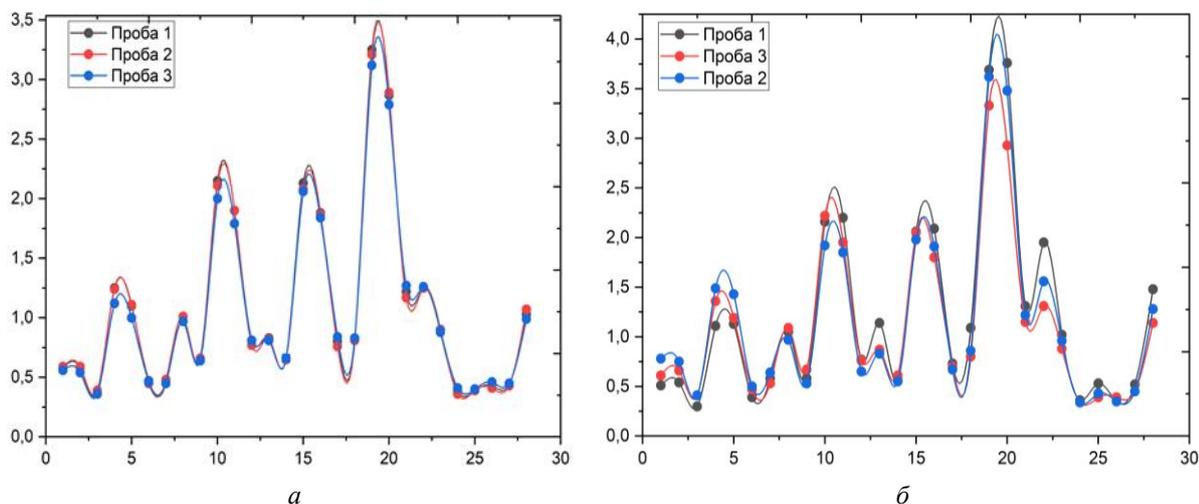


Рис. 4. Спектры параметров стабильности качественного состава легколетучих фракций ароматов исследуемых образцов в разбавленном (а) и в насыщенном (б) состоянии

Fig. 4. Spectra of the stability parameters of the qualitative composition of the volatile fractions of the studied samples' aromas, in the diluted (а) and the saturated (б) state

Для разбавленного (естественного) фона ароматов образцов (без концентрирования) определена наибольшая степень идентичности химического состава легколетучих фракций между контрольным образцом и образцом мойвы, приготовленной с применением КГ. В большей степени оттенки запаха проявляются при концентрировании компонентов в РФФ. При таком подходе все пробы значительно отличаются по химическому составу. Для количественной оценки степени подобия химического состава РФФ над пробами мойвы проведем корреляционно-регрессионный попарный анализ матриц A (табл. 5).

Таблица 5. Корреляционно-регрессионный анализ матриц А
Table 5. Correlation-regression analysis of matrices A

Показатель	Сравнение проб 1, 2	Сравнение проб 1–3	Сравнение проб 2, 3
Коэффициент корреляции r	0,980	0,976	0,984
Связь между исследуемыми признаками	Прямая		
Теснота (сила) связи по шкале Чеддока	Высокая		
Число степеней свободы f	26,0		
t -критерий Стьюдента	25,417	22,774	28,220
Критическое значение t -критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы	2,056		
Уравнение парной линейной регрессии	$y = 0,06619 + 0,89978x$	$y = 0,11673 + 0,81836x$	$y = 0,06840 + 0,89925x$
Коэффициент детерминации r^2	0,961 (факторный признак x определяет 96,1 % дисперсии зависимого признака y)	0,952 (факторный признак x определяет 95,2 % дисперсии зависимого признака y)	0,968 (факторный признак x определяет 96,8 % дисперсии зависимого признака y)
Средняя ошибка аппроксимации (характеризует адекватность регрессионной модели)	13,5 %	13,0 %	9,8 %

При сравнении трех исследуемых проб установлено, что $t_{\text{набл}} > t_{\text{крит}}$, а зависимость признаков статистически значима ($p = 0,000000$).

Корреляционный анализ показывает, что химические составы проб 2 и 3 коррелируют в максимальной степени. Незначительно изменяет состав легколетучей фракции мойвы ДВС, а КГ – в меньшей степени.

Заключение

В результате данного исследования были сопоставлены составы легколетучих фракций копченых полуфабрикатов мойвы, обработанных коптильным гелем и дымовоздушной смесью, направляемых на производство консервов.

После насыщения свободного пространства над пробами сигналы при нагрузке сенсоров равновесной газовой фазой возрастают до 3 раз. Однако принципиальных отличий в характере влияния разных способов обработки полуфабрикатов мойвы не установлено.

Для естественных условий формирования запаха проб мойвы и при предварительном концентрировании их в равновесной газовой фазе качественный и количественный составы ароматов отличаются. Содержание соединений в образце, обработанном коптильным гелем, больше, чем в мороженой мойве и образце, обработанном дымовоздушной смесью. Для насыщенных паров установлено, что по трем параметрам (вкладам в сорбцию сенсоров 1, 3 и 8) составы проб, обработанных дымовоздушной смесью и коптильным гелем, ближе между собой, чем к составу мороженой мойвы. Сенсоры 5, 6 и 7 не различают запах всех рассматриваемых проб, а значит, реагируют на летучие соединения мойвы. Сенсор 4 отражает схожесть показателей влажности мороженой мойвы и мойвы, обработанной коптильным гелем.

В результате проведенного корреляционного анализа определены соответствия полученных химических проб и установлено, что химические составы проб полуфабрикатов мойвы, обработанных дымовоздушной смесью и коптильным гелем, коррелируют в максимальной степени. Однако следует сделать вывод о том, что обработка дымовоздушной смесью полуфабрикатов мойвы в большей степени изменяет состав легколетучей фракции по сравнению с использованием коптильного геля.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Аллойрова Ю. В. Совершенствование технологии рыбных консервов из мойвы: расширение ассортимента, применение коптильного геля, повышение качества : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.04. Мурманск, 2020. 212 с. EDN: ACUEUU.
- Головкова Д. О. Сенсорная аналитическая система "электронный нос" для анализа качества пищевых продуктов // Наука молодых – будущее России : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Курск, 9–10 декабря 2021 г. Курск : Юго-Западный гос. ун-т, 2021. Т. 4. С. 153–155. EDN: DIFVUA.
- Козырев И. А., Батаева Д. С., Насонова В. В. Мультисенсорная система "электронный нос" для определения качества мясных продуктов в процессе хранения // Пищевые системы. 2021. Т. 4, № 3S. С. 142–147. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3s-142-147>. EDN: KZTNOT.
- Кучменко Т. А., Лисицкая Р. П. Применение химических сенсоров в технологическом контроле: формирование аромата кондитерских масс // Журнал аналитической химии. 2021в. Т. 76, № 7. С. 648–659. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450221070070>. EDN: NXKKTFF.
- Кучменко Т. А., Умарханов Р. У., Корнехо Т. Х. Изучение сорбционных свойств карбоксилированных углеродных нанотрубок на пьезомикровесах OAB-типа // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021б. Т. 21, № 3. С. 336–346. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3467>. EDN: YZGYPT.
- Кучменко Т. А., Умарханов Р. У., Менжулина Д. А. Биогидроксипатит – новая фаза для селективного микровзвешивания паров органических соединений – маркеров воспаления в носовой слизи телят и человека. Сообщение 1. Сорбция в модельных системах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021а. Т. 21, № 2. С. 142–152. DOI: [10.17308/sorpchrom.2021.21/3348](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3348). EDN: HDUKYU.
- Кучменко Т. А., Чернышева С. Е. Идентификация моноэтаноламина в воздухе с применением двух сенсоров на основе микрофазы фторида калия // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4 (66). С. 135–139. EDN: VKDSVB.
- Кучменко Т. А., Шуба А. А., Тюркин И. А., Битюкова В. В. Оценка состояния биологических проб по составу равновесной газовой фазы с применением мультисенсорной системы // Журнал аналитической химии. 2014. Т. 69, № 5. С. 534–543. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0044450214050077>. EDN: RYCGPZ.
- Barea-Ramos J. D., Santos J. P., Lozano J., Rodríguez M. J. [et al.]. Detection of aroma profile in Spanish rice paella during socarrat formation by electronic nose and sensory panel // Chemosensors. 2023. Vol. 11, Iss. 6. Article number: 342. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11060342>.
- Byrd K. A., Shieh J., Mork S., Pincus L. [et al.]. Fish and fish-based products for nutrition and health in the first 1000 days: A systematic review of the evidence from low and middle-income countries // Advances in Nutrition. 2022. Vol. 13, Iss. 6. P. 2458–2487. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac102>.
- Du H., Chen Q., Liu Q., Wang Y. [et al.]. Evaluation of flavor characteristics of bacon smoked with different woodchips by HS-SPME-GC-MS combined with an electronic tongue and electronic nose // Meat Science. 2021. Vol. 182. Article number: 108626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108626>.
- Huang X.-H., Qi L.-B., Fu B.-S., Chen Z.-H. [et al.]. Flavor formation in different production steps during the processing of cold-smoked Spanish mackerel // Food Chemistry. 2019. Vol. 286. P. 241–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.211>.
- Kuchmenko T. A., Umarkhanov R. U., Grazhulene S. S., Zaglyadova S. V. [et al.]. Microstructural investigations of sorption layers in mass-sensitive sensors for the detection of nitrogen-containing compounds // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Vol. 8, Iss. 2. P. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451014020372>.
- Kuchmenko T. A. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality // Pure and Applied Chemistry. 2017. Vol. 89, Iss. 10. P. 1587–1601. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2016-1108>.
- Tan J., Xu J. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review // Artificial Intelligence in Agriculture. 2020. Vol. 4. P. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.06.003>.
- Tian H., Shen Y., Yu H., Chen C. Aroma features of honey measured by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry, and electronic nose // International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Iss. 1. P. 1755–1768. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1213744>.
- Tümerkan E. T. A. Investigations of the polycyclic aromatic hydrocarbon and elemental profile of smoked fish // Molecules. 2022. Vol. 27, Iss. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27207015>.
- Wang R., Liang M., Zhang Z., Wu Y. [et al.]. Comparison of flavor profile relationship of soy sauce under different storage conditions // Foods. 2023. Vol. 12, Iss. 14. Article number: 2707. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12142707>.
- Xin X., Bissett A., Wang J., Gan A. [et al.]. Production of liquid smoke using fluidised-bed fast pyrolysis and its application to green lipped mussel meat // Food Control. 2021а. Vol. 124. Article number: 107874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107874>.

- Xin X., Dell K., Udugama I. A., Young B. R. [et al.]. Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring // *Journal of Cleaner Production*. 2021б. Vol. 294. Article number: 125368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125368>.
- Yin X., Wen R., Sun F., Wang Y. [et al.]. Collaborative analysis on differences in volatile compounds of Harbin red sausages smoked with different types of woodchips based on gas chromatography – mass spectrometry combined with electronic nose // *LWT*. 2021. Vol. 143. Article number: 111144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111144>.

References

- Alloyarova, Yu. V. 2020. Improving the technology of canned fish from capelin: Expanding the range, using smoking gel, improving quality. Ph.D. Thesis. Murmansk. EDN: ACUEUU. (In Russ.)
- Golovkova, D. O. 2021. Sensory analytical system "electronic nose" for food quality analysis. In coll. articles of the 6th International scientific conference of promising developments of young scientists *Science of the young – the future of Russia*, Kursk, Vol. 4, pp. 153–155. EDN: DIFVUA. (In Russ.)
- Kozyrev, I. A., Nasonova, V. V., Bataeva, D. S. 2021. Multisensor system "electronic nose" for determining the quality of meat products during storage. *Food Systems*, 4(3S), pp. 142–147. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3s-142-147>. EDN: KZTNOT. (In Russ.)
- Kuchmenko, T. A., Lisitskaya, R. P. 2021в. The use of chemical sensors in technological control: The formation of the aroma of confectionery masses. *Zhurnal Analiticheskoi Khimii*, 76(7), pp. 648–659. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044450221070070>. EDN: NXKKTf. (In Russ.)
- Kuchmenko, T. A., Umarchanov, R. U., Kornekho, T. Kh. 2021б. Studying the sorption properties of carboxylated carbon nanotubes on OAB-type piezomicrobalances. *Sorption and Chromatographic Processes*, 21(3), pp. 336–346. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3467>. EDN: YZGYPT. (In Russ.)
- Kuchmenko, T. A., Umarchanov, R. U., Menzhulina, D. A. 2021а. Biohydroxyapatite is a new phase for selective microbalancing of vapors of organic compounds – markers of inflammation in the nasal mucus of calves and humans. Communication 1. Sorption in model systems. *Sorption and Chromatographic Processes*, 21(2), pp. 142–152. DOI: [10.17308/sorpchrom.2021.21/3348](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3348). EDN: HDUKYU. (In Russ.)
- Kuchmenko, T. A., Chernysheva, S. E. 2015. Identification of monoethanolamine in the air using two sensors based on the microphase of potassium fluoride. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4(66), pp. 135–139. EDN: VKDSVB. (In Russ.)
- Kuchmenko, T. A., Shuba, A. A., Tyurkin, I. A., Bitukova, V. V. 2014. Evaluation of the state of biological samples by the composition of the equilibrium gas phase using a multisensor system. *Zhurnal Analiticheskoi Khimii*, 69(5), pp. 534–543. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0044450214050077>. EDN: RYCGPZ. (In Russ.)
- Barea-Ramos, J. D., Santos, J. P., Lozano, J., Rodríguez, M. J. et al. 2023. Detection of aroma profile in Spanish rice paella during socarrat formation by electronic nose and sensory panel. *Chemosensors*, 11(6). Article number: 342. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11060342>.
- Byrd, K. A., Shieh, J., Mork, S., Pincus, L. et al. 2022. Fish and fish-based products for nutrition and health in the first 1000 days: A systematic review of the evidence from low and middle-income countries. *Advances in Nutrition*, 13(6), pp. 2458–2487. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac102>.
- Du, H., Chen, Q., Liu, Q., Wang, Y. et al. 2021. Evaluation of flavor characteristics of bacon smoked with different woodchips by HS-SPME-GC-MS combined with an electronic tongue and electronic nose. *Meat Science*, 182. Article number: 108626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108626>.
- Huang, X.-H., Qi, L.-B., Fu, B.-S., Chen, Z.-H. et al. 2019. Flavor formation in different production steps during the processing of cold-smoked Spanish mackerel. *Food Chemistry*, 286, pp. 241–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.211>.
- Kuchmenko, T. A., Umarchanov, R. U., Grazhulene, S. S., Zaglyadova, S. V. et al. 2014. Microstructural investigations of sorption layers in mass-sensitive sensors for the detection of nitrogen-containing compounds. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 8(2), pp. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451014020372>.
- Kuchmenko, T. A. 2017. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality. *Pure and Applied Chemistry*, 89(10), pp. 1587–1601. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2016-1108>.
- Tan, J., Xu, J. 2020. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, pp. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.06.003>.
- Tian, H., Shen, Y., Yu, H., Chen, C. 2018. Aroma features of honey measured by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry, and electronic nose. *International Journal of Food Properties*, 21(1), pp. 1755–1768. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1213744>.

- Tümerkan, E. T. A. 2022. Investigations of the polycyclic aromatic hydrocarbon and elemental profile of smoked fish. *Molecules*, 27(20). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27207015>.
- Wang, R., Liang, M., Zhang, Z., Wu, Y. et al. 2023. Comparison of flavor profile relationship of soy sauce under different storage conditions. *Foods*, 12(14). Article number: 2707. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12142707>.
- Xin, X., Bissett, A., Wang, J., Gan, A. et al. 2021a. Production of liquid smoke using fluidised-bed fast pyrolysis and its application to green lipped mussel meat. *Food Control*, 124. Article number: 107874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107874>.
- Xin, X., Dell, K., Udugama, I. A., Young, B. R. et al. 2021b. Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring. *Journal of Cleaner Production*, 294. Article number: 125368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125368>.
- Yin, X., Wen, R., Sun, F., Wang, Y. et al. 2021. Collaborative analysis on differences in volatile compounds of Harbin red sausages smoked with different types of woodchips based on gas chromatography – mass spectrometry combined with electronic nose. *LWT*, 143. Article number: 111144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111144>.

Сведения об авторах

Аллойрова Юлия Витальевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник;
e-mail: alloyarovayuv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-5887>

Yuliya V. Alloyarova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Junior Research Scientist;
e-mail: alloyarovayuv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-5887>

Влияние содержания пшенично-амарантовых отрубей на качество формового хлеба

Р. Х. Кандроков*, Ю. С. Ерина, В. В. Бурматов

*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Россия;
e-mail: nart132007@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
24.04.2023;

получена
после доработки
15.08.2023;

принята к публикации
30.08.2023

Ключевые слова:

пшеница,
амарант,
мука,
отруби,
формовой
хлеб,
качество

Реферат

Биохимический состав, физические и технологические свойства зерна амаранта обуславливают возможность его применения для повышения потребительских свойств и пищевой ценности хлебобулочных изделий. Полученные экспериментальные результаты кислотности и влажности образцов тестовых заготовок с добавлением пшенично-амарантовых отрубей (5–15 %) и контрольного образца пшеничного теста с 5%-м содержанием пшеничных отрубей находятся в пределах нормативных значений, установленных в стандартах. Добавление 5, 10 и 15 % пшенично-амарантовых отрубей улучшает питательную ценность готового продукта за счет высокого содержания белка, микро- и макроэлементов, высоконенасыщенного масла в семенах, в составе которого присутствует сквален. Добавление пшенично-амарантовых отрубей не меняет структуру и свойства хлеба. Полученные образцы формового хлеба с содержанием 5, 10 и 15 % пшенично-амарантовых отрубей имеют гладкую поверхность без особых деформаций, мягкий, эластичный мякиш, равномерную тонкостенную пористость без разрывов; вкус и запах соответствуют данному виду пшеничного хлеба. Наиболее выраженный вкус и запах пшеничного хлеба с 5%-м содержанием пшеничных отрубей имеет формовой хлеб с содержанием 15 % пшенично-амарантовых отрубей. Физико-химические показатели пшенично-амарантовых опытных образцов, за исключением влажности и кислотности, не превышают значения контрольного образца. По результатам проведенных исследований разработана технология приготовления обогащенного пшеничного формового хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей в количестве 5, 10 и 15 %.

Для цитирования

Кандроков Р. Х. и др. Влияние содержания пшенично-амарантовых отрубей на качество формового хлеба. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 503–510. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-503-510>.

The influence of the wheat-amaranth bran content on the pan bread quality

Roman H. Kandrov*, Julia S. Erina, Valery V. Burmatov

*Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia;
e-mail: nart132007@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Article info

Received
24.04.2023;

received
in revised;
15.08.2023

accepted
30.08.2023

Key words:

wheat,
amaranth,
flour,
bran,
shaped
bread,
quality

Abstract

The biochemical composition, physical and technological properties of amaranth grain determine the possibility of its use to improve the consumer properties and nutritional value of bakery products. The obtained experimental results of the acidity and moisture content of samples of dough pieces with the addition of wheat-amaranth bran (5–15 %) and a control sample of wheat dough with 5 % content of wheat bran are within the normative values established in the standards. The addition of 5, 10 and 15 % wheat-amaranth bran improves the nutritional value of the finished product due to the high content of protein, micro- and macroelements, and highly unsaturated oil in the seeds, which contains squalene. Adding wheat-amaranth bran does not change the structure and properties of bread. The resulting samples of tin bread containing 5, 10 and 15 % wheat-amaranth bran have a smooth surface without any special deformations, a soft, elastic crumb, uniform thin-walled porosity without breaks; the taste and smell correspond to this type of wheat bread. The most pronounced taste and smell of wheat bread with 5 % wheat bran content is in tin bread containing 15 % wheat-amaranth bran. The physicochemical parameters of wheat-amaranth test samples, with the exception of moisture and acidity, do not exceed the values of the control sample. Based on the results of the research, technology for preparing enriched wheat pan bread with the addition of wheat-amaranth bran in amounts of 5, 10 and 15 % has been developed.

For citation

Kandrov, R. H. et al. 2023. The influence of the wheat-amaranth bran content on the pan bread quality. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 503–510. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-503-510>.

Введение

Зерно амаранта обладает сбалансированным химическим составом, повышенной пищевой и биологической ценностью, широким спектром функциональных пищевых веществ, в том числе антиоксидантного действия, что определяют перспективы его использования в технологии пищевых производств (Cai et al., 2003; Шмалько, 2004; Дергаусов, 2006; Железнов и др., 2009; Жаркова и др., 2019).

Исследования по использованию амаранта в пищевой промышленности в России касаются в основном способов применения амарантовой муки в хлебопекарном производстве. Биохимический состав, физические и технологические свойства зерна амаранта обуславливают возможность его применения для повышения потребительских свойств и пищевой ценности молочных, хлебобулочных, мучных кондитерских, мясных и других изделий (Ключкин, 1997; Кретов и др., 2006).

Данное сырье находит применение в качестве источника высококачественного белка, крахмала и масла (Офицеров, 2002; Росляков и др., 2004; Gorinstein et al., 2007; 2008).

Амарант и продукты его переработки по содержанию белка, аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов, биологически активных веществ и жира превосходит многие традиционные культуры (Gins et al., 2002; Gamel et al., 2006; Kelawala et al., 2004; Khandaker et al., 2008). Амарант, как сельскохозяйственная культура, отличается неприхотливостью к условиям внешней среды и повышенной урожайностью, сбалансированностью белка, пектинов, микро- и макроэлементов. В семенах амаранта содержится высоконасыщенное масло, в составе которого присутствует сквален (до 8 %). Сквален повышает силы иммунной системы человека и тем самым увеличивает устойчивость организма к опухолевым заболеваниям (Prakash et al., 1995; Sala et al., 1998; Kalac et al., 2000; Verma et al., 2002; Kamal, 2007; Zeashan et al., 2008).

Среди нетрадиционных для хлебопекарного производства видов сырья продукты переработки помольных зерновых смесей на основе амаранта занимают особое место, так как обладают высокой пищевой и биологической ценностью, а также технологическими свойствами, отличными от традиционных в хлебопечении видов муки (Способ получения..., 2021a).

В настоящее время актуальность приобретают разработки современных технологий производства хлебобулочных изделий и мучных кондитерских изделий с добавлением пшенично-амарантовых отрубей. Пшенично-амарантовые отруби изготавливаются при совместной переработке зерна пшеницы и амаранта в пшенично-амарантовую муку и пшенично-амарантовые отруби (Способ получения..., 2021б).

Целями исследования являлись определение влияния содержания пшенично-амарантовых отрубей на свойства и качество пшеничного хлеба, разработка технологии приготовления обогащенного пшеничного формового хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей в количестве 5–15 %.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использованы амарантовые отруби – продукт, полученный при переработке зерна амаранта (или амарантового жмыха), сбалансированный по содержанию всех незаменимых аминокислот (Способ получения..., 2021a).

Амарантовые отруби превосходят отруби исходных видов по количеству белка в два раза, а клетчатки – в три раза, что обусловлено химическим составом анатомических частей зародыша и эндосперма зерна амаранта. Сравнительная характеристика содержания основных компонентов в зерне амаранта и пшеницы представлена в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный химический состав зерна амаранта и пшеницы
Table 1. Comparative chemical composition of amaranth and wheat grains

Культура	Белок, %	Жиры, %	Углеводы, %	Клетчатка, %	Зола, %	Вода, %
Амарант	17,6	6,8	56,2	6,2	2,6	10,6
Пшеница	12,3	1,7	68,4	2,0	1,6	14

На кафедре зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий Российского биотехнологического университета проведена переработка пшенично-амарантовой помольной смеси соотношением 70/30 % по разработанной и запатентованной технологической схеме (Способ получения..., 2021б) с использованием мельницы лабораторного помола МЛП-4 с нарезными вальцами. В результате были получены пшенично-амарантовая мука (79,3 %) и пшенично-амарантовые отруби (20,7 %).

Полученные при лабораторном помолу отруби использовались в процессе приготовления формового пшеничного хлеба с различным содержанием пшенично-амарантовых отрубей и пшеничной муки высшего сорта. Физико-химические и органолептические показатели образцов хлеба с пшенично-амарантовыми отрубями сравнивались с показателями контрольного образца хлеба с добавлением пшеничных отрубей.

Определение физико-химических и органолептических показателей осуществлялось в соответствии с ГОСТ 5667-65 "Хлеб и хлебобулочные изделия. Правила приемки, методы отбора образцов, методы

определения органолептических показателей и массы изделий"¹ и ГОСТ 25832-89 "Изделия хлебобулочные диетические"².

Результаты и обсуждение

Процесс тестоведения проведен по разработанной нами рецептуре (табл. 2). Первый этап приготовления пшеничного хлеба – замес с добавлением 5, 10 и 15 % пшенично-амарантовых отрубей в течение 10 мин (5 мин – при использовании 1-й скорости лабораторной тестомесилки до образования схваченных кусков теста, последующие 5 мин – 2-й скорости тестомесилки до получения целого комка теста). Начальная температура теста до брожения с содержанием отрубей 5 % составила 29,5 °С; 10 % – 29,6; 15 % – 29 °С.

После замеса готовое тесто отправлено на брожение; продолжительность брожения – 60–80 мин при комнатной температуре (20 °С), которая способствует формированию необходимого баланса кислых ароматов. Температура теста после брожения с содержанием отрубей 5 % составила 27,3 °С; 10 % – 27,1; 15 % – 27,4 °С.

После измерения температуры определены показатели влажности с помощью прибора Чижовой. При добавлении 5 % отрубей влажность теста составила 43,4 %; 10 % – 41,8; 15 % – 43,6 %. Влажность контрольного образца с 5%-м содержанием пшеничных отрубей равна 43,8 %.

Кислотность определена посредством титрования: при добавлении 5 % отрубей – 2,8 град; 10 % – 3,8; 15 % – 4,0 град; контрольный образец с добавлением пшеничных отрубей (5 %) – 3,4 град.

Полученные показатели соответствовали нормативам, указанным в стандарте (ГОСТ 5667-65).

После брожения каждый образец отправлен на расстойку (50 мин) при температуре 35 °С.

Таблица 2. Рецептура приготовления формового пшеничного хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей на 100 кг муки
Table 2. Recipe for preparing pan wheat bread with the addition of wheat-amaranth bran

Сырье, кг	Рецептура приготовления хлеба с добавлением			
	пшеничных отрубей (контрольный образец)	пшенично-амарантовых отрубей		
	5 %	5 %	10 %	15 %
Мука пшеничная высшего сорта	0,481	0,481	0,454	0,400
Отруби	0,027	0,027	0,053	0,107
Мезофильная закваска	0,053	0,053	0,053	0,053
Соль пищевая	0,010	0,010	0,010	0,010
Вода	0,270	0,270	0,270	0,270
Сахар белый	0,005	0,005	0,005	0,005
Масло сливочное (82,5 %)	0,005	0,005	0,005	0,005

На втором этапе исследований проведена лабораторная выпечка пшеничного формового хлеба из муки высшего сорта с добавлением 5–15 % (интервал варьирования 5 %) пшенично-амарантовых отрубей и контрольного образца пшеничного хлеба с добавлением 5 % пшеничных отрубей. Определение физико-химических и органолептических показателей осуществлялось в течение установленных стандартом сроков (ГОСТ 5667-65), но не ранее чем через три часа.

Технологический процесс производства пшеничного формового хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей предусматривал внесение мезофильной закваски 100%-й градации и включал следующие операции. Замес каждого опытного образца теста с различным количественным содержанием пшенично-амарантовых отрубей и контрольного пшеничного с добавлением пшеничных отрубей был сокращен до 6 мин при использовании 2-го скоростного режима лабораторной тестомесилки. Начальная температура теста до брожения с 5%-м содержанием пшенично-амарантовых отрубей составила 29,5 °С, 10%-м – 29,6, 15%-м – 29,0 °С. Технологический процесс проводился по ускоренному методу тестоведения, т. е. было сокращено не только время замеса, но и время брожения с 60 до 30 мин при соблюдении комнатной температуры 25 °С (при комнатной температуре дрожжевое тесто начинает активно бродить). Температура теста после брожения с 5%-м содержанием пшенично-амарантовых отрубей составила 27,3 °С, 10%-м – 27,1, 15%-м – 27,4 °С.

После измерения температуры определены показатели влажности и кислотности пшеничного теста. При добавлении 5 % пшенично-амарантовых отрубей влажность теста составила 43,4 %; 10 % – 43,8; 15 % – 43,6 %; 5 % пшеничных отрубей (контрольный образец) – 43,8 %. Титрованием установили

¹ ГОСТ 5667-65. Хлеб и хлебобулочные изделия. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий. Введен 01.01.1966. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200022321>.

² ГОСТ 25832-89. Изделия хлебобулочные диетические. Технические условия. Введен 1990-07-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006139>.

кислотность тестовых заготовок: при внесении 5 % пшенично-амарантовых отрубей – 2,8 град; 10 % отрубей – 3,8; 15 % – 4,0 град; 5 % пшеничных отрубей (контрольный образец) – 3,4 град. Полученные экспериментальные результаты кислотности пшеничного теста с пшенично-амарантовыми отрубями и контрольного образца пшеничного теста с добавлением 5 % пшеничных отрубей соответствуют показателям, указанным в ГОСТ 25832-89.

Тесто каждого опытного образца после разделки и формования массой 200 г было отправлено на расстойку продолжительностью 50 мин при температуре 35 °С. После расстойки произведены лабораторные выпечки при температуре 220 °С в течение 25–30 мин.

После выпечки и полного остывания хлеба с содержанием пшенично-амарантовых отрубей и контрольного образца определены их органолептические и физико-химические свойства (табл. 3, 4).

Таблица 3. Органолептические показатели качества пшеничного хлеба с различным содержанием пшенично-амарантовых отрубей и контрольного пшеничного образца с добавлением 5 % пшеничных отрубей
Table 3. Organoleptic quality indicators of bread with different content of wheat-amaranth bran and a control wheat sample with the addition of wheat bran (5 %)

Показатель	Контрольный образец	Хлеб с добавлением пшенично-амарантовых отрубей		
		5 %	10 %	15 %
Внешний вид	Правильная форма с выпуклой верхней коркой, недеформированная	Правильная форма с выпуклой верхней коркой, недеформированная	Правильная форма с выпуклой верхней коркой, недеформированная	Правильная форма с выпуклой верхней коркой, недеформированная
Поверхность	Гладкая, без вмятин на боках	Гладкая, без вмятин на боках от деформации	Гладкая, без крупных трещин	Гладкая, с небольшими вмятинами по бокам
Состояние мякиша	Мягкий, невлажный, эластичный, без комочков, равномерная тонкостенная пористость	Мягкий, хорошо пропеченный, без комочков, равномерная тонкостенная пористость	Нелипкий, невлажный, равномерная тонкостенная пористость	Невлажный, эластичный, равномерная тонкостенная пористость
Вкус и аромат	Приятный вкус, без постороннего привкуса; аромат, свойственный данному виду; без постороннего запаха	Наименее выраженный вкус; без постороннего привкуса; аромат, свойственный данному виду; без постороннего запаха	Приятный вкус; без постороннего привкуса; аромат, свойственный данному виду; без постороннего запаха	Наиболее выраженный вкус; без постороннего привкуса; аромат, свойственный данному виду; без постороннего запаха

На основе данных табл. 3 можно сделать следующие выводы. В опытных образцах с содержанием 5–15 % пшенично-амарантовых отрубей не выявлены отклонения от контрольного образца с содержанием 5 % пшеничных отрубей. Полученный хлеб с пшенично-амарантовыми отрубями имеет гладкую поверхность без особых деформаций; мягкий, эластичный мякиш с равномерной тонкостенной пористостью (без разрывов); вкус и запах, соответствующие данному виду. Экспертами дегустационной оценки особо выделен пшеничный хлеб с 15%-м содержанием пшенично-амарантовых отрубей, отличающийся наиболее выраженным вкусом и запахом.

Таблица 4. Физико-химические показатели качества пшеничного хлеба с различным содержанием пшенично-амарантовых отрубей и контрольного образца пшеничного хлеба с добавлением 5 % пшеничных отрубей
Table 4. Physical and chemical parameters of bread with different content of wheat-amaranth bran and a control wheat sample with the addition of wheat bran (5 %)

Показатель	Контрольный образец	Хлеб с добавлением пшенично-амарантовых отрубей		
		5 %	10 %	15 %
Влажность, %	46,6	45,1	44,9	44,3
Кислотность, град	4,2	3,6	3,4	3,2
Пористость, %	63,0	65,0	67,0	66,0

Данные, указанные в табл. 4, свидетельствуют о том, что показатели опытных образцов с различным количественным содержанием пшенично-амарантовых отрубей соответствуют характеристикам контрольного

пшеничного образца с 5%-м содержанием пшеничных отрубей. Однако показатели влажности и кислотности отличаются от показателей контрольного пшеничного образца. Этот факт объясняется тем, что отруби обладают значительной водопоглощительной способностью и, соответственно, впитывают большое количество влаги, поэтому влажность с увеличением содержания отрубей уменьшалась по сравнению с контрольным образцом. Пониженная кислотность пшеничного хлеба с пшенично-амарантовыми отрубями также связана с поглощением большого количества влаги отрубями. С увеличением содержания отрубей тесто разжижалось при брожении и не успевало накопить определенное количество кислот.

Внешний вид хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей показан на рисунке.

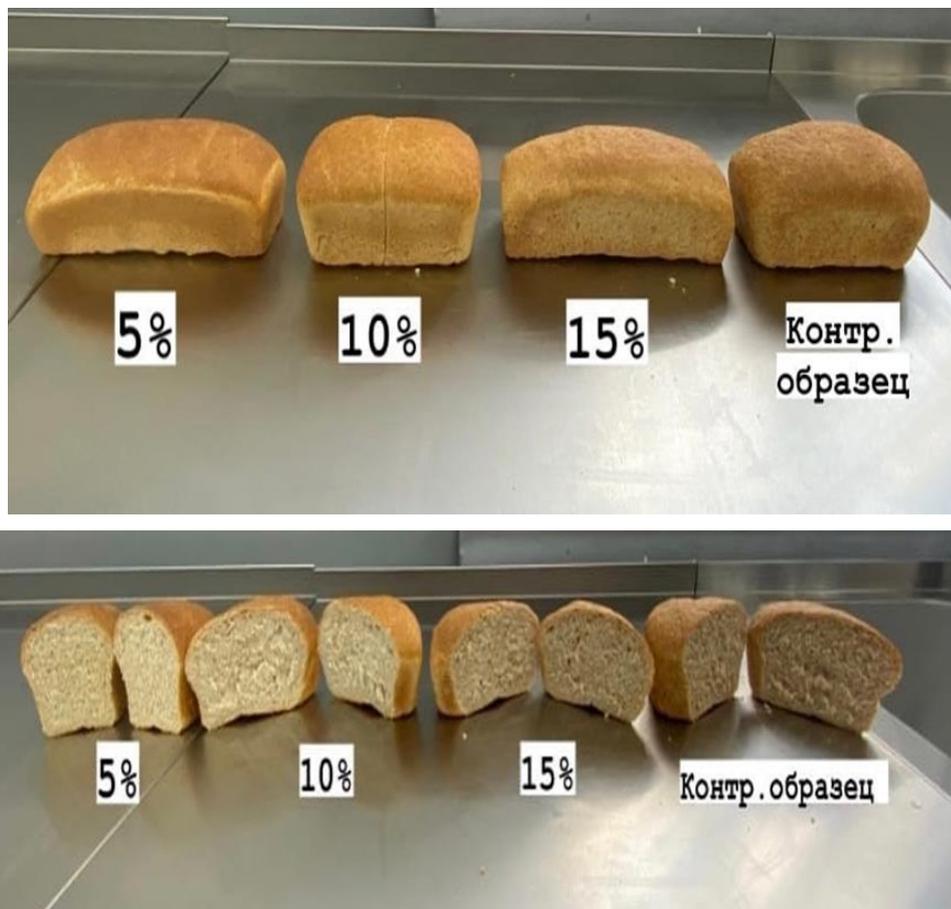


Рисунок. Внешний вид хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей
Figure. Appearance of bread with the addition of wheat-amaranth bran of various ratios

Заключение

В результате проведенных исследований установлено влияние содержания пшенично-амарантовых отрубей на хлебопекарные свойства формового пшеничного хлеба. При добавлении 5 % пшенично-амарантовых отрубей влажность теста составила 43,4 %; 10 % отрубей – 43,8; 15 % – 43,6; 5 % пшеничных отрубей (контрольный образец теста) – 43,8 %. Посредством титрования установлены значения кислотности тестовых заготовок с различным добавлением отрубей: при добавлении 5 % пшенично-амарантовых отрубей – 2,8 град; 10 % отрубей – 3,8; 15 % – 4,0 град; кислотность контрольного образца с 5%-м содержанием пшеничных отрубей – 3,4 град. Полученные экспериментальные результаты кислотности и влажности образцов тестовых заготовок с пшенично-амарантовыми отрубями и контрольный образец пшеничного теста с добавлением 5 % пшеничных отрубей соответствуют нормативным значениям, указанным в стандартах.

Добавление пшенично-амарантовых отрубей не меняет структуры и свойств хлеба. Полученные образцы формового хлеба с содержанием 5–15 % пшенично-амарантовых отрубей имеют гладкую поверхность без особых деформаций, мягкий, эластичный мякиш с равномерной, тонкостенной пористостью (без разрывов); вкус и запах, соответствующие данному виду. Наиболее выраженные вкус и запах по сравнению с хлебом с 5%-м содержанием пшеничных отрубей имеет формовой хлеб с добавлением 15 % пшенично-амарантовых отрубей. Физико-химические показатели пшенично-амарантовых опытных образцов (за исключением влажности и кислотности) не превышают показатели контрольного образца.

По результатам проведенных исследований разработана технология приготовления обогащенного пшеничного формового хлеба с добавлением пшенично-амарантовых отрубей в количестве 5–15 %.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Жаркова И. М., Лавров С. В., Самохвалов А. А., Гребенщиков А. В. [и др.]. Разработка функциональных пищевых продуктов для безглютенового и геродического питания, в том числе для профилактики остеопороза // Хлебопродукты. 2019. № 12. С. 53–55. DOI: 10.32462/0235-2508-2019-28-12-53-55. EDN: THRYGZ.
- Железнов А. В., Железнова Н. Б., Бурмакина Н. В., Юдина Р. С. Амарант: научные основы интродукции. Новосибирск : Гео, 2009. 236 с.
- Дергаусов В. И. Амарант – культура перспективная // Масла и жиры. 2006. № 2. С. 7–9.
- Кретов И. Т., Соболев С. Н., Мирошниченко Л. А., Жаркова И. М. Масло из семян амаранта // Масложировая промышленность. 2006. № 1. С. 22–23.
- Ключкин В. В. Основные направления переработки и использования пищевых продуктов из семян люпина и амаранта // Хранение и переработка сельхозсырья. 1997. № 9. С. 30–33.
- Способ получения амарантовой муки из амарантового жмыха : пат. 2745669 Рос. Федерация / Р. Х. Кандроков, Н. В. Лабутина ; № 2020106874 ; заявл. 14.02.20 ; опубл. 30.03.2021а, Бюл. № 10.
- Способ получения пшенично-амарантовой муки : пат. 2760494 Рос. Федерация / Р. Х. Кандроков, С. А. Катин ; № 2021114272 ; заявл. 20.05.21 ; опубл. 25.11.2021б, Бюл. № 33.
- Росляков Ю. Ф., Шмалько Н. А., Бочкова Л. А. Перспективы использования амаранта в пищевой индустрии // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические Науки. 2004. № 4. С. 92–95. EDN: NTOINR.
- Офицеров Е. Н. Амарант – перспективное сырье для пищевой и фармацевтической промышленности // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2001. Т. 2, № 5. С. 1–4. EDN: WPGSZV.
- Шмалько Н. А., Уварова И. И., Росляков Ю. Ф. Амарантовая мука – антиоксидантная добавка для макаронных изделий, обогащенных бета-каротином // Известия вузов. Пищевая технология. 2004. № 5–6 (282–283). С. 39–41. EDN: PZMWUZ.
- Kelawala N. S., Ananthanarayan L. Antioxidant activity of selected foodstuffs // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2004. Vol. 55, Iss. 6. P. 511–516. DOI: <https://doi.org/10.1080/09637480400015794>.
- Khandaker L., Ali Md. B., Oba S. Total polyphenol and antioxidant activity of red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) as affected by different sunlight level // Journal of the Japanese Society for Horticultural Science. 2008. Vol. 77, Iss. 4. P. 395–401. DOI: <https://doi.org/10.2503/jjshs1.77.395>.
- Gins M. S., Gins V. K., Kononkov P. F. Change in the biochemical composition of amaranth leaves during selection for increased amaranthine content // Applied Biochemistry and Microbiology. 2002. Vol. 38, N 5. P. 474–479. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019980821313>.
- Gorinstein S., Vargas O. J. M., Jaramillo N. O., Salas I. A. [et al.]. The total polyphenols and the antioxidant potentials of some selected cereals and pseudocereals // European Food Research and Technology. 2007. Vol. 225, Iss. 3–4. P. 321–328. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0417-7>.
- Gorinstein S., Lojek A., Číž M., Pawelzik E. [et al.]. Comparison of composition and antioxidant capacity of some cereals and pseudocereals // International Journal of Food Science & Technology. 2008. Vol. 43, Iss. 4. P. 629–637. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01498.x>.
- Cai Y., Sun M., Corke H. Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2003. Vol. 51, Iss. 8. P. 2288–2294. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf030045u>.
- Gamel T. H., Linssen J. P. H. Nutritional and medical aspects of amaranth // Recent progress in Medicinal Plants / ed.: J. N. Govil. Studium Press LLC, 2006. P. 346–362.
- Sala M., Berardi S., Bondioli P. Amaranth seed: le potenzialità // Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse. 1998. Vol. 75, Iss. 11. P. 503–506.
- Kalač P., Moudrý J. Composition and nutritional value of amaranth seeds // Czech Journal of Food Sciences. 2000. Vol. 18, Iss. 5. P. 201–206. DOI: <https://doi.org/10.17221/9651-cjfs>.
- Kamal R. Radio-protective role of *Amaranthus paniculatus* L. on the sensitivity of mouse spermatogonia after exposure to gamma radiation // Himalayan J. Envir. Zool. 2007. Vol. 21, N 2. P. 315–318.
- Prakash D., Joshi B. D., Pal M. Vitamin C in leaves and seed oil composition of the *Amaranthus* species // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 1995. Vol. 46, Iss. 1. P. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.3109/09637489509003385>.
- Zeashan H., Amresh G., Singh S., Rao C. V. Hepatoprotective activity of *Amaranthus spinosus* in experimental animals // Food and Chemical Toxicology. 2008. Vol. 46, Iss. 11. P. 3417–3421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.08.013>.
- Verma R. K., Sisodia R., Bhatia A. L. Radioprotective role of *Amaranthus gangeticus* Linn.: A biochemical study on mouse brain // Journal of Medicinal Food. 2002. Vol. 5, Iss. 4. P. 189–195. DOI: <http://doi.org/10.1089/109662002763003339>.

References

- Zharkova, I. M., Lavrov, S. V., Samokhvalov, A. A., Grebenshchikov, A. V. et al. 2019. Development of functional food products for gluten-free and heroic nutrition, including for the prevention of osteoporosis. *Khleboproducty*, 12, pp. 53–55. DOI: 10.32462/0235-2508-2019-28-12-53-55. EDN: THRYGZ. (In Russ.)
- Zheleznov, A. V., Zheleznova, N. B., Burmakina, N. V., Yudina, R. S. 2009. Amaranth: Scientific basis of introduction. Novosibirsk. (In Russ.)
- Dergausov, V. I. 2006. Amaranth – a promising culture. *OILS&FATS*, 2, pp. 7–9. (In Russ.)
- Kretov, I. T., Sobolev, S. N., Miroshnichenko, L. A., Zharkova, I. M. 2006. Oil from amaranth seeds. *Maslozhirovaya Promyshlennost'*, 1, pp. 22–23. (In Russ.)
- Klyuchkin, V. V. 1997. The main directions of processing and use of food products from the seeds of lupine and amaranth. *Khranenie I Pererabotka Selkhozsyriya*, 9, pp. 30–33. (In Russ.)
- Kandrokov, R. Kh., Labutina, N. V. 2021a. Method for producing amaranth flour from amaranth cake, Russian Federation, Pat. 2745669. (In Russ.)
- Kandrokov, R. Kh., Katin, S. A. 2021b. Method for producing wheat-amaranth flour, Russian Federation, Pat. 2760494. (In Russ.)
- Roslyakov, Yu. F., Shmalko, N. A., Bochkova, L. A. 2004. Prospects for the use of amaranth in the food industry. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, 4, pp. 92–95. EDN: NTOINR. (In Russ.)
- Ofitserov, E. N. 2001. Amaranth as a promising raw material for food and pharmaceutical industries. *Khimiya i komp'yuternoye modelirovaniye. Butlerovskiye soobshcheniya*, 2(5), pp. 1–4. EDN: WPGSZV. (In Russ.)
- Shmalko, N. A., Uvarova, I. I., Roslyakov, Yu. F. 2004. Amaranth flour – an antioxidant additive for pasta enriched with beta-carotene. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 5–6(282–283), pp. 39–41. EDN: PZMWUZ. (In Russ.)
- Kelawala, N. S., Ananthanarayan, L. 2004. Antioxidant activity of selected foodstuffs. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 55(6), pp. 511–516. DOI: <https://doi.org/10.1080/09637480400015794>.
- Khandaker, L., Ali, Md. B., Oba, S. 2008. Total polyphenol and antioxidant activity of red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) as affected by different sunlight level. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 77(4), pp. 395–401. DOI: <https://doi.org/10.2503/jjshs1.77.395>.
- Gins, M. S., Gins, V. K., Kononkov, P. F. 2002. Change in the biochemical composition of amaranth leaves during selection for increased amaranthine content. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 38(5), pp. 474–479. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019980821313>.
- Gorinstein, S., Vargas, O. J. M., Jaramillo, N. O., Salas, I. A. et al. 2007. The total polyphenols and the antioxidant potentials of some selected cereals and pseudocereals. *European Food Research and Technology*, 225(3–4), pp. 321–328. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0417-7>.
- Gorinstein, S., Lojek, A., Číž, M., Pawelzik, E. et al. 2008. Comparison of composition and antioxidant capacity of some cereals and pseudocereals. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(4), pp. 629–637. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01498.x>.
- Cai, Y., Sun, M., Corke, H. 2003. Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), pp. 2288–2294. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf030045u>.
- Gamel, T. H., Linssen, J. P. H. 2006. Nutritional and medical aspects of amaranth. In *Recent progress in Medicinal Plants*. Ed.: J. N. Govil. Studium Press LLC, pp. 346–362.
- Sala, M., Berardi, S., Bondioli, P. 1998. Amaranth seed: le potenzialità. *Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, 75(11), pp. 503–506.
- Kalač, P., Moudrý, J. 2000. Composition and nutritional value of amaranth seeds. *Czech Journal of Food Sciences*, 18(5), pp. 201–206. DOI: <https://doi.org/10.17221/9651-cjfs>.
- Kamal, R. 2007. Radio-protective role of *Amaranthus paniculatus* L. on the sensitivity of mouse spermatogonia after exposure to gamma radiation. *Himalayan J. Envir. Zool.*, 21(2), pp. 315–318.
- Prakash, D., Joshi, B. D., Pal, M. 1995. Vitamin C in leaves and seed oil composition of the *Amaranthus* species. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 46(1), pp. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.3109/09637489509003385>.
- Zeashan, H., Amresh, G., Singh, S., Rao, C. V. 2008. Hepatoprotective activity of *Amaranthus spinosus* in experimental animals. *Food and Chemical Toxicology*, 46(11), pp. 3417–3421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.08.013>.
- Verma, R. K., Sisodia, R., Bhatia, A. L. 2002. Radioprotective role of *Amaranthus gangeticus* Linn.: A biochemical study on mouse brain. *Journal of Medicinal Food*, 5(4), pp. 189–195. DOI: <http://doi.org/10.1089/109662002763003339>.

Сведения об авторах

Кандроков Роман Хажсетович – ул. Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: nart132007@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Roman Kh. Kandrov – 11 Volokolamskoe shosse Str., Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: nart132007@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Ерина Юлия Сергеевна – ул. Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), студент;
e-mail: july.erina2016@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0727-626X>

Julia S. Erina – 11 Volokolamskoe shosse Str., Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Student;
e-mail: july.erina2016@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0727-626X>

Бурматов Валерий Вячеславович – ул. Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), студент,
e-mail: burmatnovvv@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9501-6002>

Valery V. Burmatnov – 11 Volokolamskoe shosse Str., Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Student;
e-mail: burmatnovvv@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9501-6002>

УДК 606

Особенности подбора заквасочных культур в производстве функциональных кисломолочных продуктов

М. С. Каночкина, Л. А. Иванова, А. Д. Коновалова, О. Н. Левин*

**Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Россия;*
e-mail: oleg.l-e-v-i-n@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8567-412X>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
26.05.2023;

получена
после доработки
27.09.2023;

принята к публикации
23.11.2023

Ключевые слова:

бактериальные
закваски,
бифидобактерии,
молочнокислые
бактерии,
функциональный
продукт,
кисломолочный
продукт, свойства

Реферат

Современные тенденции формирования здорового образа жизни обусловили активную разработку технологий изготовления функциональных кисломолочных продуктов. Выбор рациональной комбинации молочнокислых бактерий и бифидобактерий для создания заквасок должен обеспечивать продукты функциональными свойствами и осуществляться с учетом следующих критериев: продукт должен быть безопасным (каждый микроорганизм, входящий в его состав, необходимо проверить и оценить с точки зрения безопасности, в том числе подтвердить отсутствие генов резистентности к антибиотикам); продукт должен обладать пищевой ценностью; продукт должен соответствовать определенным количественным характеристикам (количество пробиотиков, уровень кислотности, энергетическая ценность). В ходе исследования особенностей подбора заквасочных культур (молочнокислых бактерий и бифидобактерий) в производстве функциональных кисломолочных продуктов проведен поиск (по ключевым словам) источников литературы, опубликованных в период с 2012 по апрель 2023 гг. и связанных с разработкой заквасок и функциональных продуктов. С применением трех поисковых систем отобрано 105 источников, которые проверены на соответствие обозначенным критериям включения. Среди отобранных источников только 69 могли быть применимы для написания обзора, в котором рассмотрено влияние функциональных кисломолочных продуктов на организм человека и проанализирован потенциал использования молочнокислых бактерий и бифидобактерий в качестве компонента заквасочной композиции.

Для цитирования

Каночкина М. С. и др. Особенности подбора заквасочных культур в производстве функциональных кисломолочных продуктов. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 511–528. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-511-528>.

Features of the selection of starter cultures in the production of functional fermented milk products

Maria S. Kanochkina, Ludmila A. Ivanova, Anastasia D. Konovalova, Oleg N. Levin*

**Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia;*
e-mail: oleg.l-e-v-i-n@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8567-412X>

Article info

Received
26.05.2023;

received
in revised
27.09.2023;

accepted
23.11.2023

Key words:

bacterial starter cultures,
bifidobacteria,
lactic acid bacteria,
functional product,
fermented milk
product,
properties

Abstract

Modern trends in the formation of a healthy lifestyle have led to the active development of technologies for the production of functional fermented milk products. The selection of a rational combination of lactic acid bacteria and bifidobacteria for creating starter cultures should provide products with functional properties and take into account the following criteria: the product must be safe (each microorganism included in its composition must be tested and assessed from a safety point of view, including confirmation of the absence of genes antibiotic resistance); the product must have nutritional value; the product must meet certain quantitative characteristics (amount of probiotics, acidity level, energy value). In the course of studying the features of the selection of starter cultures (lactic acid bacteria and bifidobacteria) in the production of functional fermented milk products, a search (using key words) for literature sources published between 2012 and April 2023 was carried out and related to the development of starter cultures and functional products. Using three search engines, 105 sources were selected and checked for compliance with the designated inclusion criteria. Among the selected sources, only 69 could be applicable for writing a review that has examined the effect of functional fermented milk products on the human body and has analyzed the potential of using lactic acid bacteria and bifidobacteria as a component of the starter composition.

For citation

Kanochkina, M. S. et al. 2023. Features of the selection of starter cultures in the production of functional fermented milk products. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 511–528. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-511-528>.

Введение

В настоящее время растущий потребительский спрос на продукты, способствующие укреплению здоровья и профилактике заболеваний, определяет необходимость разработки технологий и производства новых функциональных кисломолочных продуктов, которые изготавливаются с использованием заквасок.

Заквасочная культура – микробный препарат, инициирующий ферментацию и содержащий большое количество микроорганизмов (Moser *et al.*, 2018). В пищевой промышленности в качестве заквасок применяют различные микроорганизмы (бактерии, плесневые грибы, дрожжи) для производства хлеба (Hernández-Parada *et al.*, 2023), кисломолочных продуктов (Moser *et al.*, 2018), колбасных изделий (Ratanaburee *et al.*, 2013) и др. Основная функция закваски – спровоцировать последовательный процесс ферментации и сформировать органолептические свойства продукта (De Melo Pereira *et al.*, 2020).

Кисломолочные продукты получают посредством сквашивания молока под действием молочнокислых бактерий (МКБ) (Ayivi *et al.*, 2022; Moser *et al.*, 2018). Ценные фенотипические признаки молочнокислых бактерий определяют возможность их промышленного применения с целью получения кисломолочной продукции. Для придания продукту дополнительных свойств применяются бактерии рода *Bifidobacterium* (Утебаева и др., 2016).

Концепция функционального питания включает разработку и производство функциональных продуктов питания (ФПП). Польза кисломолочных функциональных продуктов заключается в благоприятном влиянии на состояние организма человека входящих в их состав микроорганизмов. (пробиотический эффект) или метаболитов, синтезированных во время ферментации (биоактивный эффект) (Joshi, 2015). Способность продуцировать метаболиты, характеризующиеся определенными свойствами, обусловлена, как правило, штаммом бактерий (Linares *et al.*, 2017). Создание многокомпонентных заквасочных культур позволяет обеспечивать функциональные кисломолочные продукты наилучшими свойствами (Артюхова и др., 2015), поскольку возможно включить в такие закваски штаммы с высокими технологическими и пробиотическими показателями (в том числе бактериоциногенные штаммы). Таким образом, бактерии-кандидаты в заквасочную композицию должны быть тщательно отобраны и изучены.

Цель настоящего обзора включает анализ научной литературы и патентных материалов для определения особенностей подбора заквасочных культур, применяемых в процессе производства функциональных кисломолочных продуктов.

Материалы и методы

Выбор научной литературы и патентных материалов осуществлялся по следующим критериям включения: 1) период публикации с 2012 г. по апрель 2023 г.; 2) научная работа должна быть в области изучаемой темы; 3) совпадение ключевых слов. Описание научного материала не включало анализ статей, относящихся к разработке заквасок для производства продуктов детского питания и продуктов на немолочной основе.

В процессе анализа литературы использовалась следующая методика:

– выполнен поиск 105 источников, соответствующих изучаемой теме, с помощью поисковых систем и баз данных (PubMed, Академия Google, Киберлиника) с использованием ключевых слов первого (бактериальные закваски, бифидобактерии, молочнокислые бактерии, функциональный продукт) и второго (кисломолочный продукт, свойства) уровней;

– при анализе литературы и оценке применимости материала для написания обзора было изъято 36 статей, которые соответствовали критериям исключения; таким образом, в обзоре использовано 69 источников;

– выбранная литература анализировалась по критериям включения, а информация была распределена на подтемы: функциональные кисломолочные продукты; потенциал молочнокислых бактерий и бифидобактерий в качестве компонента заквасочной композиции; подбор бактериальных штаммов для создания заквасочной композиции.

Результаты и обсуждение

Закваски содержат один или несколько видов микроорганизмов и используются для получения ферментированных продуктов питания с ценными свойствами. Выбор вида микроорганизма для получения закваски зависит от конечной цели, т. е. от конкретных заданных характеристик разрабатываемого продукта, а также диктуется свойствами субстрата и требованиями к производственному процессу и самому продукту (Goldstein *et al.*, 2015).

Функциональные кисломолочные продукты

Современные тенденции формирования здорового образа жизни обусловили активную разработку технологий изготовления функциональных кисломолочных продуктов (Jia *et al.*, 2016; Shiby *et al.*, 2013). Например, введение пробиотических культур в заквасочную культуру обеспечивает получение кисломолочного

ФПП, поскольку пробиотики – это живые микроорганизмы, оказывающие благотворное влияние на здоровье организма-хозяина (Hill et al., 2014).

Полезное физиологическое воздействие на организм человека функциональных кисломолочных продуктов показано на рис. 1.

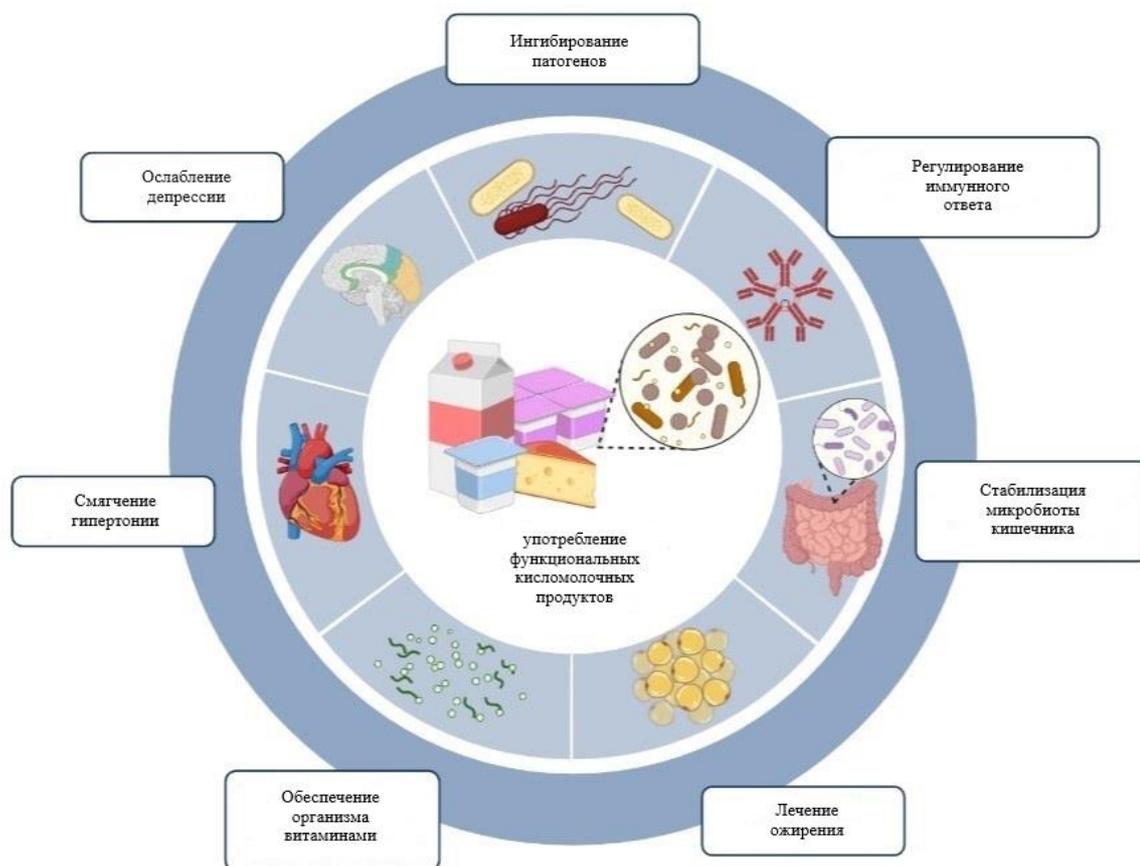


Рис. 1. Влияние функциональных кисломолочных продуктов на организм
Fig. 1. Beneficial effect of functional fermented milk products on the body

Штаммы *Lactobacillaceae* и *Bifidobacterium* часто используются как пробиотики (Markowiak et al., 2017; Утебаева и др., 2016). Микроорганизмы, относящиеся к пробиотикам, являются непатогенными, они способны выдерживать низкие диапазоны pH, высокие концентрации конъюгированных и деконъюгированных солей желчных кислот, не способны передавать гены резистентности к антибиотикам-патогенам (Belicová et al., 2013; Mokoena, 2017).

Пробиотические бактерии обладают антагонистической активностью по отношению к патогенам желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) (Markowiak et al., 2017), которая реализуется за счет способности предотвращать пролиферацию чужеродных микроорганизмов-патогенов к слизистой оболочке кишечника. Также благоприятными для здоровья человека являются следующие свойства пробиотиков: оказание стимулирующего действия; регулирование иммунного ответа; повышение биодоступности метаболитов и основных питательных веществ; снижение непереносимости лактозы; стабилизация кишечной микробиоты после применения антибиотиков; уменьшение популяции возбудителей за счет продукции молочной кислоты, бактериоцинов и других ингибирующих соединений (de Castilho et al., 2019; Vamanu et al., 2020).

Среди функциональных продуктов кисломолочные продукты считаются оптимальными носителями пробиотиков. Известны варианты включения пробиотиков в различные продукты. Сыры могут быть носителями пробиотических штаммов бифидобактерий, поскольку сырная матрица защищает чувствительные бактерии от низкого pH и желчных солей при прохождении через желудочно-кишечный тракт (Castro et al., 2015; de Almeida et al., 2018). При этом стоит оценивать жизнеспособность бактерий при длительном созревании сыра. Например, ученые использовали при производстве сыра "Гауда" штаммы *Lactiplantibacillus plantarum* H4 и *Limosilactobacillus fermentum* H9, демонстрирующие пробиотические свойства и биологическую активность (Oh et al., 2016). Кефир является продуктом, обеспечивающим доставку в ЖКТ пробиотических культур *Bifidobacterium* sp., *Lactobacillus* sp. (Prado et al., 2015); была разработана стабильная закваска, состоящая из штаммов *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* C106 и *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG. В этой

композиции *L. rhamnosus* GG является пробиотическим микроорганизмом, который приносит пользу здоровью при пероральном приеме, но имеет плохие способности к росту в молоке, поскольку не метаболизирует лактозу и не расщепляет казеин. В таком случае термофильный стрептококк дополняет неспособность *L. rhamnosus* GG расти в молоке (Kort et al., 2015).

Потенциал молочнокислых бактерий и бифидобактерий в качестве компонента заквасочной композиции

При получении кисломолочных продуктов часто используют закваски, содержащие различные виды молочнокислых бактерий – многочисленной гетерогенной группы бактерий, играющих основополагающую роль в ферментации (Ayivi et al., 2022; Moser et al., 2018). Молочнокислые бактерии, осуществляющие ферментацию молока, вызывают ряд важных изменений, которые приводят к формированию уникальных свойств кисломолочных продуктов (рис. 2) (Casarotti et al., 2014).

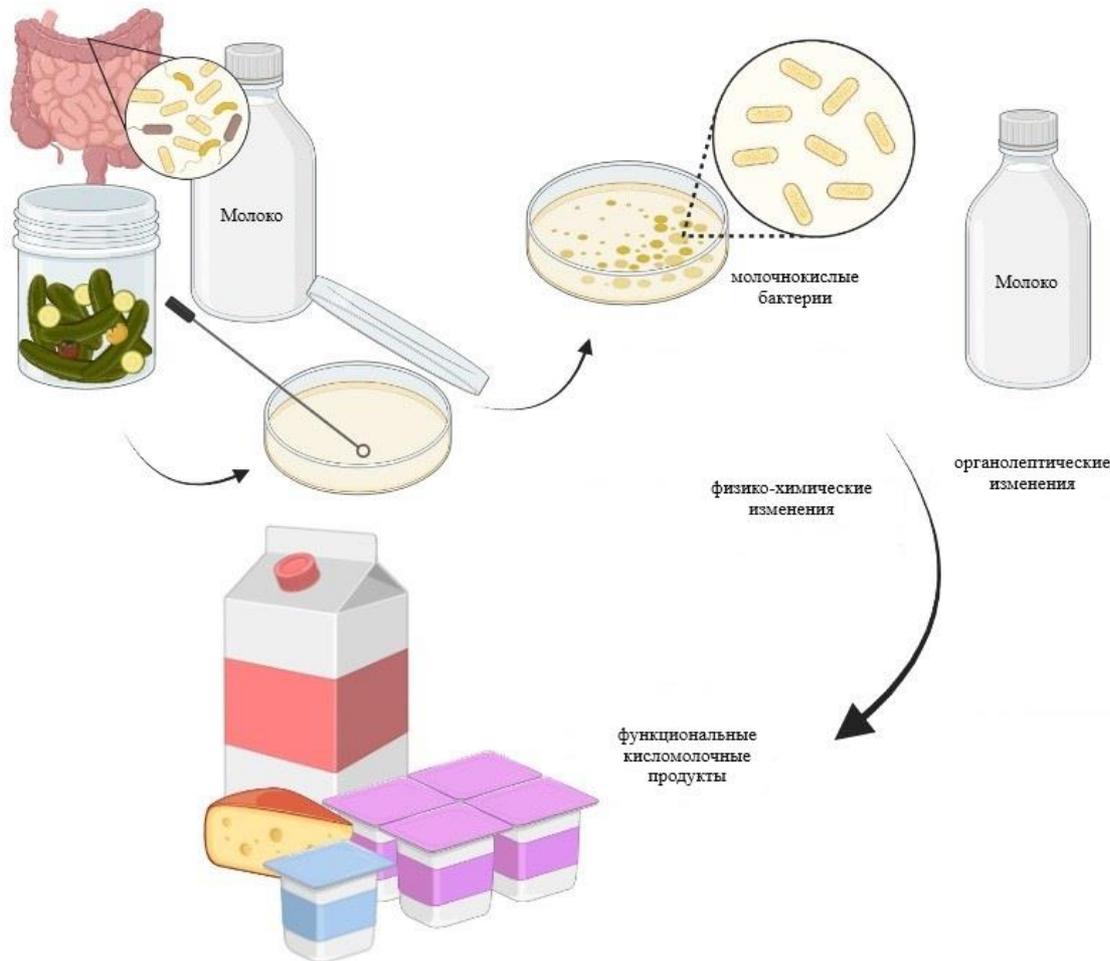


Рис. 2. Действие молочнокислых бактерий при ферментации молока
Fig. 2. Action of lactic acid bacteria during milk fermentation

Молочнокислые бактерии имеют способность перерабатывать углеводы в молочную кислоту, в результате чего происходит коагуляция субстрата за счет воздействия молочной кислоты на белок молока – казеин (Coelho et al., 2022; Oh et al., 2016). Также они продуцируют другие продукты: органические кислоты, ароматические соединения, витамины, бактериоцины, перекись водорода, экзополисахариды и ферменты (de Castilho et al., 2019; Linares et al., 2017; Makino et al., 2016). Антимикробная активность заквасочных бактерий обусловлена продукцией органических кислот (молочной, уксусной, муравьиной, пропионовой), а также других соединений (бактериоцинов, перекиси водорода, реутерина, диацетила, ацетона) (Arqués et al., 2015; Bintsis, 2018). Бактериоцины – это пептиды, которые специфически ингибируют рост некоторых родственных/неродственных бактерий (Arqués et al., 2015). В связи с этим активно обсуждается применение данных пептидов в пищевой промышленности как биоконсервантов (Todorov et al., 2022). Совокупность синтезируемых метаболитов обеспечивает приятный органолептический профиль продукта, продлевает срок годности и предупреждает развитие посторонней микрофлоры (Linares et al., 2017). За формирование

вкуса отвечают такие процессы, как гликолиз, липолиз и протеолиз (Coelho et al., 2022; Linares et al., 2017). Кроме этого, протеолиз вносит свой вклад в развитие органолептических свойств с помощью расщепления белков на пептиды и свободные аминокислоты, которые в дальнейшем превращаются в спирты, альдегиды, кислоты, сложные эфиры (Bintsis, 2018; Coelho et al., 2022). В создании текстуры кисломолочного продукта важная роль отведена экзополисахаридам (ЭПС), представляющим собой гомополимеры или гетерополимеры (Ansorena et al., 2016; Nagaoka, 2019). Они функционируют как загустители, текстуризаторы и эмульгаторы (Nagaoka, 2019) и могут снижать степень синерезиса (более низкое отделение сыворотки) (Surber et al., 2021). К продуцированию ЭПС способны некоторые молочнокислые бактерии: *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lactococcus lactis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus casei* (Ansorena et al., 2016). Экзопполисахариды некоторых штаммов *Lactobacillus rhamnosus* облегчали течение колита (Wan et al., 2022). ЭПС штаммов *Lactiplantibacillus plantarum* обладает противовирусной активностью (Noda et al., 2021). МКБ могут продуцировать γ -аминомасляную кислоту (ГАМК), оказывающую благоприятное воздействие на здоровье (Wang et al., 2018; Zhuang et al., 2018).

Практическая значимость каждого рода молочнокислых бактерий различна. В качестве заквасочных культур часто используют микроорганизмы родов *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Lactiplantibacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus* (Bintsis, 2018; Goldstein et al., 2015; Kort, 2015; Papademas, 2014). Бактерии рода *Bifidobacterium* возможно включить в состав некоторых молочных продуктов, так как они обладают свойствами, благоприятными для организма человека (Li et al., 2014; Liu et al., 2017; Pompei et al., 2007; Tian et al., 2022a; Yao et al., 2021).

Описание наиболее часто используемых бактерий для получения заквасок

Бактерии рода *Lactobacillus*, *Lacticaseibacillus* и *Lactiplantibacillus* широко применяются в промышленности, например, для получения пробиотических заквасочных культур (Goldstein et al., 2015). *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* используют в производстве йогуртов (Xu et al., 2015). Этот вид образует ацетальдегид, который придает аромат и вкус продуктам (Xu et al., 2015) и сбраживает лактозу (Kok et al., 2018). *Lactiplantibacillus plantarum* – один из наиболее распространенных видов бактерий; он широко применяется в качестве закваски, поскольку обеспечивает приятный вкус, аромат, формирует консистенцию кисломолочного продукта (Cui et al., 2021). Некоторые штаммы *Lactiplantibacillus plantarum* способны продуцировать сильнодействующие бактериоцины, которые возможно применять в качестве пищевых консервантов (Seddik et al., 2017). Штаммы *Lacticaseibacillus paracasei* участвуют в формировании аромата, а также улучшают текстуру йогурта (Gu et al., 2020; Pimentel et al., 2012). Известно, что некоторые штаммы могут усиливать образование диацетила при совместном культивировании с другими заквасочными культурами (Aunshjerg et al., 2015). *Lacticaseibacillus rhamnosus* применяют как пробиотическую культуру (Capurso et al., 2019; Kort et al., 2015), поскольку этот вид способен выживать в условиях ЖКТ, образовывать биопленку, защищать слизистую оболочку кишечника (Capurso et al., 2019). *Lactobacillus johnsonii* применяют в составе заквасок с пробиотическими свойствами. Некоторые штаммы незначительно повышают титр антител у человека и обладают антимикробными свойствами (Bintsis, 2018). *Lactobacillus helveticus*, включенный в закваску, способствует лучшему формированию органолептического профиля продукта (Sıçramaz et al., 2022). *Lactobacillus reuteri* синтезирует антибиотические соединения (реутерицин и реутерин), которые подавляют развитие патогенных микроорганизмов (Bintsis, 2018).

Бактерии рода *Lactococcus* – мезофильные молочнокислые микроорганизмы, выделенные изначально из зеленых растений; они часто используются в заквасках, поскольку лактококки генетически стабильны, обладают устойчивостью к бактериофагам и способны синтезировать молекулы, влияющие на органолептические свойства продукта (Bintsis, 2018). *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* сбраживает молоко, подавляет рост посторонней микрофлоры за счет продукции бактериоцина низина (Malaczewska et al., 2021) и оказывает влияние на аромат продукта (Frece et al., 2014). *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *cremoris* имеет уникальные метаболические пути, формирующие аромат кисломолочного продукта (Bintsis, 2018). *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetilactis* в процессе жизнедеятельности синтезирует ацетоин, который придает сливочный вкус желаемому продукту (Xu et al., 2015), а также синтезирует диацетил, ароматические соединения и выделяет углекислый газ (Fusieger et al., 2020).

Среди представителей рода *Streptococcus* есть множество патогенных микроорганизмов. *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* не патогенен, часто используется в качестве заквасочной культуры, придает ценные органолептические свойства кисломолочным продуктам (Bintsis, 2018; Kort et al., 2015; Xu et al., 2015; Zha et al., 2015; Dan et al., 2023).

Leuconostoc mesenteroides применяют при производстве сыра и сливочного масла благодаря способности синтезировать диацетил и ацетоин, влияющие на органолептические показатели (Papademas, 2014).

Молочнокислые бактерии в процессе ферментации молока синтезируют разнообразные соединения, формирующие определенные ароматы, вкусы, консистенции и текстуры конечных продуктов. Спектр синтезируемых МКБ соединений представлен в табл. 1.

Таблица 1. Влияние различных видов МКБ
на органолептические характеристики получаемого продукта
Table 1. The effect of various types of LAB
on the organoleptic characteristics of the resulting product

Микроорганизм	Органолептическая характеристика	Достигается за счет	Источники
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Ansorena et al., 2016;</i> <i>Nagaoka, 2019;</i> <i>Surber et al., 2021</i>
		синтеза молочной кислоты	
<i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Ansorena et al., 2016;</i> <i>Nagaoka, 2019;</i> <i>Surber et al., 2021</i>
	Аромат, вкус	синтеза ацетальдегида	
<i>Lactiplanti-bacillus plantarum</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Ansorena et al., 2016;</i> <i>Nagaoka, 2019;</i> <i>Surber et al., 2021</i>
	Аромат, вкус	синтеза 3-метилбутанала, гексанала, (Е)-2-октеналя, нонанала, 2-гептанона, 2-нонанона, 2,3-пентандиона, ацетальдегида, ацетата	
<i>Lacticaseibacillus casei</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Ansorena et al., 2016;</i> <i>Nagaoka, 2019;</i> <i>Surber et al., 2021</i>
<i>Lacticaseibacillus paracasei</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Pimentel et al., 2012</i>
	Аромат, вкус	синтеза ацетона, бутановой кислоты, диацетила	<i>Aunbjerg et al., 2015;</i> <i>Gu et al., 2020</i>
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Ansorena et al., 2016;</i> <i>Nagaoka, 2019;</i> <i>Surber et al., 2021</i>
	Аромат	подкисления молока (молочная кислота) и образования некоторых летучих и нелетучих ароматических соединений	
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Gotoh et al., 2021</i>
	Аромат	синтеза молочной кислоты, ароматических соединений	<i>Bintsis, 2018</i>
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>diacetylactis</i>	Аромат, вкус (сливочный и маслянистый)	синтеза ацетоина, диацетила, ароматических соединений (C4), углекислого газа	<i>Xu et al., 2015;</i> <i>Fusieger et al., 2020</i>
<i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>thermophilus</i>	Консистенция (снижение синерезиса)	синтеза ЭПС	<i>Bintsis, 2018;</i> <i>Kort et al., 2015;</i> <i>Xu et al., 2015</i>
	Аромат, вкус	синтеза ацетальдегида, уксусной кислоты, этилового эфира муравьиной кислоты	
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Аромат, вкус	синтеза диацетила, ацетоина	<i>Papademas, 2014</i>
	Консистенция	синтеза декстрана	<i>Ansorena et al., 2016</i>

Бифидобактерии (*Bifidobacterium*) представляют собой группу анаэробных микроорганизмов (Утебаева и др., 2016), которые сквашивают молоко медленнее вышеописанных групп молочнокислых бактерий. Бифидобактерии являются компонентами пробиотических препаратов вследствие наличия пробиотических свойств, а также могут входить в состав функциональных продуктов (Hidalgo-Cantabrana et al., 2017). Бифидобактерии улучшают здоровье желудочно-кишечного тракта, облегчают аллергические реакции

и модулируют целостность кишечника, а также поддерживают иммунный гомеостаз хозяина (Li et al., 2014; Умебаева и др., 2016). Среди выделенных бактерий только три вида способны развиваться в молоке: *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum* и *Bifidobacterium animalis* (Умебаева и др., 2016). *Bifidobacterium bifidum* – распространенный пробиотический штамм для новорожденных детей, проявляющий антиоксидантные и антибактериальные свойства (Li et al., 2014). *Bifidobacterium longum* поддерживает работоспособность печени, оказывает противовоспалительное действие (Yao et al., 2021). *Bifidobacterium longum* subsp. *infantis* продуцирует ЭПС (Dai et al., 2023), бактериоцины (Liu et al., 2017). Однако есть и другие виды бифидобактерий, используемых при разработке инновационных функциональных продуктов питания с пробиотическими свойствами: *Bifidobacterium breve* имеет потенциал для лечения депрессии, расстройств ЖКТ, ожирения (Tian et al., 2022b; Okubo et al., 2021), *Bifidobacterium teenis* обеспечивает организм витамином В9 (Pompei et al., 2007).

Некоторые штаммы рода *Pediococcus* чаще всего применяют в качестве защитной культуры за счет способности к продуцированию бактериоцинов (Zhang et al., 2019). *Pediococcus acidilactici* стимулирует рост *Lactobacillus* и обладает антиоксидантными свойствами (Bai et al., 2021).

Таким образом, в зависимости от вида и даже штамма МКБ и бифидобактерий, а также их синергетического взаимодействия наблюдается их различное профилактическое и лечебное влияние на организм человека (табл. 2).

Таблица 2. Влияние различных видов МКБ и бифидобактерий на организм человека
 Table 2. The influence of various types of LAB and bifidobacteria on the human body

Микроорганизм	Влияние на организм человека	Достигается за счет	Источники
<i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i>	Облегчение течения колита	синтеза ЭПС	Wan et al., 2022
<i>Lactiplanti-bacillus plantarum</i>	Противовирусная активность	синтеза ЭПС	Noda et al., 2021
	Борьба с патогенами ЖКТ	синтеза бактериоцинов	Seddik et al., 2017
	Облегчение гипертонии и тревожных расстройств	синтеза ГАМК	Zhuang et al., 2018
<i>Lactobacillus brevis</i>	Смягчение гипертонии, диабетических сосудистых и неврологических расстройств	синтеза ГАМК	Wang et al., 2018
<i>Lactobacillus reuteri</i>	Подавление развития патогенных микроорганизмов	синтеза бактериоцинов	Bintsis, 2018
	Обеспечение организма витаминами	синтеза кобаламина	Mohammed et al., 2014
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	Ингибирование патогенов	синтеза низина	Malaczewska et al., 2021
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	Антибактериальная способность в отношении патогенов; активность по удалению гидроксильных и супероксидных радикалов; ингибирующее действие на перекисное окисление липидов и гемолиз эритроцитов	синтеза ЭПС	Li et al., 2014
<i>Bifidobacterium longum</i>	Противовоспалительное действие	синтеза индол-3-молочной кислоты	Yao et al., 2021
	Защитный эффект	синтеза короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК); адаптации к среде ЖКТ	Tian et al., 2022b
<i>Bifidobacterium longum</i> subsp. <i>infantis</i>	Снижение риска развития астмы, связанной с приемом антибиотиков	синтеза ЭПС	Dai et al., 2023
	Антимикробная активность в отношении <i>Listeria monocytogenes</i>	синтеза бактериоцинов	Liu et al., 2017
<i>Bifidobacterium teenis</i>	Обеспечение организма витаминами	синтеза фолиевой кислоты	Pompei et al., 2007

<i>Bifidobacterium breve</i>	Ослабление депрессии и связанных с ней желудочно-кишечных расстройств	изменения микробиома кишечника; метаболизма триптофана	<i>Tian et al., 2022a;</i> <i>Okubo et al., 2021</i>
	Лечение ожирения	повышения чувствительности к инсулину	<i>Solito et al., 2021</i>
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	Широкий спектр противомикробной активности против грамположительных, грамотрицательных бактерий	синтеза бактериоцинов	<i>Zhang et al., 2019</i>
<i>Pediococcus acidilactici</i>	Стимулирование роста <i>Lactobacillus</i> ; высокая активность 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила по удалению свободных радикалов	синтеза ЭПС	<i>Bai et al., 2021</i>

При подборе заквасочных культур для производства функциональных кисломолочных продуктов используются действующие нормативные документы: ГОСТ 32923-2014 "Продукты кисломолочные, обогащенные пробиотическими микроорганизмами. Технические условия"¹, ГОСТ Р 54059-2010 "Продукты пищевые функциональные. Ингредиенты пищевые функциональные. Классификация и общие требования"², ГОСТ Р 54060-2010 "Продукты пищевые функциональные. Идентификация. Общие положения"³, ГОСТ 33491-2015 "Продукты кисломолочные, обогащенные бифидобактериями бифидум. Технические условия"⁴, ГОСТ 34372-2017 "Закваски бактериальные для производства молочной продукции. Общие технические условия"⁵, Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 "Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации"⁶.

В соответствии с ГОСТ Р 54060-2010 существенными признаками функциональных пищевых продуктов являются их качественные и количественные органолептические и физико-химические параметры; ГОСТ содержит нормы и характеристики, показатели эффективности, описание пищевой ценности, специфические критерии наименований.

Жизнедеятельность молочнокислых бактерий и бифидобактерий сопряжена с синтезом биологически активных веществ, таких как ферменты, лактаты, витамины, аминокислоты, нейрхимические вещества; производство вторичных желчных кислот может быть опосредовано гидролазой солей желчных кислот некоторых лактобактерий. Следует отметить способность молочнокислых бактерий и бифидобактерий к ферментации резистентного крахмала и некрахмальных полисахаридов, поскольку данные вещества обуславливают синтез незаменимых короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК): ацетата, пропионата и бутирата. КЦЖК задействованы в процессах регуляции клеточного иммунитета, обмена энергии, метаболизма липидов и углеводов в печени, белой и бурой жировой ткани, легких, костном мозге, поджелудочной железе, а также закисляют содержимое кишечника, препятствуют развитию воспалений и онкологических заболеваний. При совместном участии КЦЖК и различных нейроактивных молекул происходит регуляция процессов центральной нервной системы (МР 2.3.1.0253-21).

Функциональный кисломолочный продукт должен соответствовать качественным характеристикам (рис. 3) согласно указанным выше нормативным документам.

Цвет кисломолочного продукта должен быть молочно-белым, за исключением ряженки и варенца, для которых присущ светло-кремовый цвет; недопустимо наличие постороннего привкуса и запаха.

¹ ГОСТ 32923-2014. Продукты кисломолочные, обогащенные пробиотическими микроорганизмами. Технические условия. Введен 01.01.2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115748>.

² ГОСТ Р 54059-2010. Продукты пищевые функциональные. Ингредиенты пищевые функциональные. Классификация и общие требования. Введен 01.01.2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085998>.

³ ГОСТ Р 54060-2010. Продукты пищевые функциональные. Идентификация. Общие положения. Введен 01.01.2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085350>.

⁴ ГОСТ 33491-2015. Продукты кисломолочные, обогащенные бифидобактериями бифидум. Технические условия. Введен 01.07.2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127470>.

⁵ ГОСТ 34372-2017. Закваски бактериальные для производства молочной продукции. Общие технические условия. Введен 01.09.2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200157895>.

⁶ МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации. Введены 22.07.2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/608629034>.

Консистенция и внешний вид должны быть однородными с нарушенным/ненарушенным сгустком. Для некоторых продуктов характерны особенности: допустимо газообразование для кефира; продукт, содержащий ацидофильную палочку, может иметь тягучую консистенцию; сметана должна иметь глянцевую поверхность (ГОСТ 32923-2014; ГОСТ 33491-2015).



Рис. 3. Качественные характеристики функционального пищевого продукта
Fig. 3. Qualitative characteristics of a functional food product

Отобранные микроорганизмы для будущей разработки закваски оцениваются с точки зрения их безопасности, т. е. применяющиеся штаммы МКБ и бифидобактерий должны входить в список культур, разрешенных на территории Российской Федерации, с проведением исследований на соответствие требованиям качества и безопасности (МР 2.3.1.0253-21).

Отбор молочнокислых бактерий, имеющих потенциал для пищевой промышленности, осуществляется по таким критериям, как способность синтезировать определенные соединения в достаточном количестве (молочная кислота, КЦЖК, ароматические вещества, витамины, бактериоцины, нейроактивные молекулы, экзополисахариды, ферменты) (Linares et al., 2017); наличие технологических характеристик (высокая жизнеспособность; антимикробная активность; органолептические показатели; протеолитическая активность; липолитическая активность; жизнеспособность и стабильность желаемых свойств бактерий после процесса лиофилизации, приготовления и реализации продуктов и др. (Akabanda et al., 2014; De Melo Pereira et al., 2020).

Отобранные штаммы, которые могут быстро снижать pH среды за счет синтеза молочной кислоты, способствуют коагуляции белков молока и снижению рисков интенсивного развития посторонней микрофлоры в продуктах (Akabanda et al., 2014). Штаммы с высокой подкисляющей активностью и другими технологически ценными свойствами являются основной культурой закваски, а дополнительные культуры придают конечному продукту определенные свойства (формирование уникальной органолептики, антимикробная активность и др.) (Akabanda et al., 2014; Ayivi et al., 2022; De Melo Pereira et al., 2020). Штаммы, способные к синтезу

бактериоцинов, могут быть рассмотрены в качестве заквасочной или дополнительной культуры при производстве кисломолочных продуктов (Arqués *et al.*, 2015). Бактериоциногенная культура, применяемая в качестве дополнительной закваски, должна быть безопасной, и при ее использовании не должны изменяться органолептические характеристики конечного продукта в худшую сторону (Todorov *et al.*, 2022). Производство бактериоцина *in situ* обеспечит дополнительную защиту продукта, поэтому важно идентифицировать бактериоциногенные штаммы (de Castilho *et al.*, 2019) и исследовать их потенциал в качестве основной или дополнительной культуры в многокомпонентной закваске (Dal Bello *et al.*, 2012; Mills *et al.*, 2017).

Функциональный продукт должен соответствовать определенным количественным характеристикам, таким как количество пробиотиков, уровень кислотности и энергетическая ценность продукта. Необходимо обеспечить наличие пробиотической культуры в пищевой матрице не менее 10^6 КОЕ/см³. Уровень кислотности зависит от типа кисломолочного продукта (ГОСТ 32923-2014; ГОСТ 33491-2015), поскольку различные виды микроорганизмов способны обеспечивать разные диапазоны предельной кислотности (ГОСТ 34372-2017). Энергетическая ценность продукта, обогащенного пробиотиками, зависит от массовой доли жира и находится в диапазоне 30–105 ккал. При этом энергетическая ценность сметаны, обогащенной пробиотическими микроорганизмами, составляет 120–290 ккал (ГОСТ 32923-2014).

При соотношении информации о пробиотических свойствах культур микроорганизмов и существенных признаков функциональных пищевых продуктов разработан алгоритм оценки эффективности функционального пищевого продукта, содержащего в качестве физиологически функционального пищевого ингредиента пробиотические штаммы МКБ и бифидобактерий (табл. 3).

Таблица 3. Существенные признаки функциональных пищевых продуктов и характеристика видов микроорганизмов, входящих в состав функциональных пищевых продуктов
Table 3. Essential features of functional foods and characteristics of the types of microorganisms included in functional foods

Виды МКБ и бифидобактерий	Органолептика					Биологическая ценность					Предельная кислотность, °Т	КОЕ/см ³ , до				
	Вкус	Внешний вид	Аромат	Консистенция	Цвет	Бактериоцины	Ферменты	Витамины	ЭПС	КЦЖК		Нейроактивные молекулы	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹ –10 ¹⁰
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>		✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		95–140		✓	✓	
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓	100–220		✓		
<i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i>	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓			160–350				✓
<i>Lactobacillus acidophilus</i>		✓		✓			✓		✓			180–300	✓			
<i>Bifidobacterium longum</i> subsp. <i>infantis</i>						✓	✓		✓			40–130	✓			
<i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>thermophilus</i>	✓	✓	✓	✓			✓					100–140				✓

Разработанный алгоритм следует применять при оценке предполагаемых существенных признаков разрабатываемой инновационной продукции, содержащей в качестве функционального пищевого ингредиента специально выделенные штаммы, благоприятно воздействующие на организм человека через нормализацию

микробиома, с целью подбора культур и составления их консорциумов для получения продуктов функционального назначения с заданными свойствами.

Заключение

Употребление кисломолочных функциональных продуктов обеспечивает поступление в ЖКТ полезных бактерий и их метаболитов, поэтому разработка новых заквасок является важнейшей задачей пищевой промышленности.

Бактерии, имеющие пробиотические свойства, могут находиться в кисломолочных продуктах в виде закваски или функциональной добавки. В качестве пробиотика могут выступать бактерии *Lactocaseibacillus rhamnosus*, образующие био пленки и защищающие слизистую кишечника. *Lactobacillus johnsonii* вызывают незначительное увеличение антител и обладают антимикробными свойствами, что способствует повышению иммунитета. *Lactobacillus reuteri* являются продуцентами реутерина и реутерина, подавляющими развитие патогенных микроорганизмов. Среди пробиотических микроорганизмов широко распространены *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum* и *Bifidobacterium animalis*, оказывающие антиоксидантное и противовоспалительное действие, поддерживающие работоспособность печени.

Как показывают многочисленные исследования, различное сочетание бактерий существенно влияет на питательные, реологические, органолептические, пробиотические показатели, поэтому при разработке функционального продукта для получения закваски необходимо осуществлять тщательный подбор штаммов с пробиотическими свойствами и бактериоциногенных культур.

Благодарности

Авторы выражают благодарность научно-исследовательской организации "Микробные нутриенты иммунокорректоры" за помощь в проведении исследований, организационную и методическую поддержку.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Артюхова С. И., Ключева К. В. Перспективы разработки отечественных биологически активных добавок к пище на основе консорциумов молочнокислых бактерий и бифидобактерий // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2015. № 3. С. 208–212. EDN: UZEPEV.
- Утебаева А. А., Бурмасова М. А., Сысоева М. А. Перспективы использования бифидобактерий в продуктах функционального питания и лекарственных средствах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6, № 4(19). С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-4-100-109>. EDN: XHYJGF.
- Akabanda F., Owusu-Kwarteng J., Tano-Debrah K., Parkouda C. [et al.]. The use of lactic acid bacteria starter culture in the production of *Nunu*, a spontaneously fermented milk product in Ghana // International Journal of Food Science. 2014. Vol. 2014. Article number: 721067. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/721067>.
- Ansorena D., Astiasarán I. Fermented foods: Composition and health effects // Encyclopedia of Food and Health. 2016. P. 649–655. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00285-3>.
- Arqués J. L., Rodríguez E., Langa S., Landete J. M. [et al.]. Antimicrobial activity of lactic acid bacteria in dairy products and gut: Effect on pathogens // BioMed Research International. 2015. Vol. 2015. Article number: 584183. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/584183>.
- Aunbjerg S. D., Honoré A. H., Marcussen J., Ebrahimi P. [et al.]. Contribution of volatiles to the antifungal effect of *Lactobacillus paracasei* in defined medium and yogurt // International Journal of Food Microbiology. 2015. Vol. 194. P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.11.007>.
- Ayivi R. D., Ibrahim S. A. Lactic acid bacteria: An essential probiotic and starter culture for the production of yoghurt // International Journal of Food Science & Technology. 2022. Vol. 57, Iss. 11. P. 7008–7025. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.16076>.
- Bai Y., Luo B., Zhang Y., Li X. [et al.]. Exopolysaccharides produced by *Pediococcus acidilactici* MT41-11 isolated from camel milk: Structural characteristics and bioactive properties // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 185. P. 1036–1049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.152>.
- Belicová A., Mikulášová M., Dušinský R. Probiotic potential and safety properties of *Lactobacillus plantarum* from Slovak Bryndza cheese // BioMed Research International. 2013. Vol. 2013. Article number: 760298. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/760298>.
- Bintsis T. Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics // AIMS Microbiology. 2018. Vol. 4, Iss. 4. P. 665–684. DOI: <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>.
- Capurso L. Thirty years of *Lactobacillus rhamnosus* GG. A review // Journal of Clinical Gastroenterology. 2019. Vol. 53. P. S1–S41. DOI: <https://doi.org/10.1097/MCG.0000000000001170>.

- Casarotti S. N., Monteiro D. A., Moretti M. M. S., Penna A. L. B. Influence of the combination of probiotic cultures during fermentation and storage of fermented milk // *Food Research International*. 2014. Vol. 59. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.068>.
- Castro J. M., Tornadijo M. E., Fresno J. M., Sandoval H. Biocheese: A food probiotic carrier // *BioMed Research International*. 2015. Vol. 2015. Article number: 723056. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/723056>.
- Coelho M. C., Malcata F. X., Silva C. C. G. Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: From starter cultures to probiotic functions // *Foods*. 2022. Vol. 11, Iss. 15. Article number: 2276. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152276>.
- Cui Y., Wang M., Zheng Y., Miao K. [et al.]. The carbohydrate metabolism of *Lactiplantibacillus plantarum* // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, Iss. 24. Article number: 13452. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms222413452>.
- Dai D. L. Y., Petersen C., Hoskinson C., Del Bel K. L. [et al.]. Breastfeeding enrichment of *B. Longum* subsp. *Infantis* mitigates the effect of antibiotics on the microbiota and childhood asthma risk // *Med*. 2023. Vol. 4, Iss. 2. P. 92–112.e5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medj.2022.12.002>.
- Dal Bello B., Cocolin L., Zeppa G., Field D. [et al.]. Technological characterization of bacteriocin producing *Lactococcus lactis* strains employed to control *Listeria monocytogenes* in cottage cheese // *International Journal of Food Microbiology*. 2012. Vol. 153(1–2). P. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.016>.
- Dan T., Chen H., Li T., Tian J. [et al.]. Influence of *Lactobacillus plantarum* P-8 on fermented milk flavor and storage stability // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03133>.
- Dan T., Hu H., Tian J., He B. [et al.]. Influence of different ratios of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* on fermentation characteristics of yogurt // *Molecules*. 2023. Vol. 28, Iss. 5. Article number: 2123. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28052123>.
- de Almeida J. d. S. O., Dias C. O., Pinto S. S., Pereira L. C. [et al.]. Probiotic mascarpone-type cheese: Characterisation and cell viability during storage and simulated gastrointestinal conditions // *International Journal of Dairy Technology*. 2018. Vol. 71, Iss. S1. P. 195–203. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12457>.
- de Castilho N. P. A., Nero L. A., Todorov S. D. Molecular screening of beneficial and safety determinants from bacteriocinogenic lactic acid bacteria isolated from Brazilian artisanal calabresa // *Letters in Applied Microbiology*. 2019. Vol. 69, Iss. 3. P. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1111/lam.13194>.
- de Melo Pereira G. V., de Carvalho Neto D. P., Junqueira A. C. D. O., Karp S. G. [et al.]. A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry // *Food Reviews International*. 2020. Vol. 36, Iss. 2. P. 135–167. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>.
- Frece J., Cvrtila J., Topić I., Delaš F. [et al.]. *Lactococcus lactis* ssp. *Lactis* as potential functional starter culture // *Food Technology and Biotechnology*. 2014. Vol. 52, Iss. 4. P. 489–494. DOI: <https://doi.org/10.17113/ftb.52.04.14.3794>.
- Fusieger A., Martins M. C. F., de Freitas R., Nero L. A. [et al.]. Technological properties of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* obtained from dairy and non-dairy niches // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2020. Vol. 51. P. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00182-3>.
- Goldstein E. J., Tyrrell K. L., Citron D. M. *Lactobacillus* species: Taxonomic complexity and controversial susceptibilities // *Clinical Infectious Diseases*. 2015. Vol. 60, Iss. Suppl 2. P. S98–S107. DOI: <https://doi.org/10.1093/cid/civ072>.
- Gotoh Y., Kita K., Tanaka K., Ishikawa S. [et al.]. Genome sequences of two strains of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* with the same ancestry but a different capacity to produce exopolysaccharides // *The Journal of General and Applied Microbiology*. 2021. Vol. 67, Iss. 5. P. 220–223. DOI: <https://doi.org/10.2323/jgam.2021.03.001>.
- Gu Y., Li X., Xiao R., Dudu O. E. [et al.]. Impact of *Lactobacillus paracasei* IMC502 in coculture with traditional starters on volatile and non-volatile metabolite profiles in yogurt // *Process Biochemistry*. 2020. Vol. 99. P. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.07.003>.
- Hernández-Parada N., González-Ríos O., Suárez-Quiroz M. L., Hernández-Estrada Z. J. [et al.]. Exploiting the native microorganisms from different food matrices to formulate starter cultures for sourdough bread production // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, Iss. 1. Article number: 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010109>.
- Hidalgo-Cantabrana C., Delgado S., Ruiz L., Ruas-Madiedo P. [et al.]. Bifidobacteria and their health-promoting effects // *Microbiology Spectrum*. 2017. Vol. 5, Iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.BAD-0010-2016>.
- Hill C., Guarner F., Reid G., Gibson G. R. [et al.]. Expert consensus document. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic // *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2014. Vol. 11, Iss. 8. P. 506–514. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66>.

- Jia R., Chen H., Chen H., Ding W. Effects of fermentation with *Lactobacillus rhamnosus* GG on product quality and fatty acids of goat milk yogurt // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99, Iss. 1. P. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10114>.
- Joshi V. K. Indigenous fermented foods of South Asia. CRC Press, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19214>.
- Kok C. R., Hutkins R. Yogurt and other fermented foods as sources of health-promoting bacteria // *Nutrition Reviews*. 2018. Vol. 76, Iss. Suppl. 1. P. 4–15. DOI: <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy056>.
- Kort R., Westerik N., Mariela Serrano L., Douillard F. P. [et al.]. A novel consortium of *Lactobacillus rhamnosus* and *Streptococcus thermophilus* for increased access to functional fermented foods // *Microbial Cell Factories*. 2015. Vol. 14. Article number: 195. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0370-x>.
- Li S., Huang R., Shah N. P., Tao X. [et al.]. Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315 // *Journal of Dairy Science*. 2014. Vol. 97, Iss. 12. P. 7334–7343. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7912>.
- Linares D. M., Gómez C., Renes E., Fresno J. M. [et al.]. Lactic acid bacteria and bifidobacteria with potential to design natural biofunctional health-promoting dairy foods // *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00846>.
- Liu G., Ren G., Zhao L., Cheng L. [et al.]. Antibacterial activity and mechanism of bifidocin A against *Listeria monocytogenes* // *Food Control*. 2017. Vol. 7, Part B. P. 854–861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.036>.
- Makino S., Sato A., Goto A., Nakamura M. [et al.]. Enhanced natural killer cell activation by exopolysaccharides derived from yogurt fermented with *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* OLL1073R-1 // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99, Iss. 2. P. 915–923. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10376>.
- Małaczewska J., Kaczorek-Lukowska E. Nisin-A lantibiotic with immunomodulatory properties: A review // *Peptides*. 2021. Vol. 137. Article number: 170479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2020.170479>.
- Markowiak P., Śliżewska K. Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health // *Nutrients*. 2017. Vol. 9, Iss. 9. Article number: 1021. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu9091021>.
- Mills S., Griffin C., O'Connor P. M., Serrano L. M. [et al.]. A multibacteriocin cheese starter system, comprising Nisin and Lacticin 3147 in *Lactococcus lactis*, in combination with Plantaricin from *Lactobacillus plantarum* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2017. Vol. 83, Iss. 14. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00799-17>.
- Mohammed Y., Lee B., Kang Z., Du G. Capability of *Lactobacillus reuteri* to produce an active form of Vitamin B12 under optimized fermentation conditions // *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*. 2014. Vol. 2. P. 617–621.
- Mokoena M. P. Lactic acid bacteria and their bacteriocins: Classification, biosynthesis and applications against uropathogens: A mini-review // *Molecules*. 2017. Vol. 22, Iss. 8. Article number: 1255. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22081255>.
- Moser A., Schafroth K., Meile L., Egger L. [et al.]. Population dynamics of *Lactobacillus helveticus* in Swiss Gruyère-type cheese manufactured with natural whey cultures // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00637>.
- Nagaoka S. Yogurt production // *Lactic Acid Bacteria. Methods in Molecular Biology* / eds.: M. Kanauchi. Vol. 1887. Humana Press, New York, NY, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8907-2_5.
- Noda M., Danshiitsoodol N., Sakaguchi T., Kanno K. [et al.]. Exopolysaccharide produced by plant-derived *Lactobacillus plantarum* SN35N exhibits antiviral activity // *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 2021. Vol. 44, Iss. 12. P. 1886–1890. DOI: <https://doi.org/10.1248/bpb.b21-00517>.
- Oh N. S., Joung J. Y., Lee J. Y., Kim S. H. [et al.]. Characterization of the microbial diversity and chemical composition of gouda cheese made by potential probiotic strains as an adjunct starter culture // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016. Vol. 64, Iss. 39. P. 7357–7366. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02689>.
- Okubo R., Xiao J., Matsuoka Y. J. Potential beneficial effects of *Bifidobacterium breve* A1 on cognitive impairment and psychiatric disorders // *The Neuroscience of Depression. Features, Diagnosis, and Treatment* / eds.: C. R. Martin, L.-A. Hunter V. [et al.]. Academic Press, 2021. P. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817933-8.00040-2>.
- Papademas P. Dairy microbiology. A practical approach. Boca Raton : CRC Press, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17915>.
- Pimentel T. C., Garcia S., Prudêncio S. H. Effect of long-chain inulin on the texture profile and survival of *Lactobacillus paracasei* spp. *paracasei* in set yoghurts during refrigerated storage // *International Journal of Dairy Technology*. 2012. Vol. 65, Iss. 1. P. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00739.x>.
- Pompei A., Cordisco L., Amaretti A., Zanoni S. [et al.]. Folate production by bifidobacteria as a potential probiotic property // *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01763-06>.

- Prado M. R., Blandón L. M., Vandenberghe L. P. S., Rodrigues C. [et al.]. Milk kefir: Composition, microbial cultures, biological activities, and related products // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01177>.
- Ratanaburee A., Kantachote D., Charenrjiratrakul W., Sukhoom A. Selection of γ -aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria and their potential as probiotics for use as starter cultures in Thai fermented sausages (*Nham*) // *International Journal of Food Science & Technology*. 2013. Vol. 48, Iss. 7. P. 1371–1382. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12098>.
- Seddik H. A., Bendali F., Gancel F., Fliss I. [et al.]. *Lactobacillus plantarum* and its probiotic and food potentialities // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2017. Vol. 9, Iss. 2. P. 111–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9264-z>.
- Shiby V. K., Mishra H. N. Fermented milks and milk products as functional foods – A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2013. Vol. 53, Iss. 5. P. 482–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.547398>.
- Siçramaz H., Güven O. T., Can A., Ayar A. [et al.]. Impact of different starter cultures and *Lactobacillus helveticus* on volatile components, chemical and sensory properties of pasta filata cheese // *Current Research in Food Science*. 2022. Vol. 5. P. 1009–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.05.017>.
- Solito A., Bozzi Cionci N. B., Calgaro M., Caputo M. [et al.]. Supplementation with *Bifidobacterium breve* BR03 and B632 strains improved insulin sensitivity in children and adolescents with obesity in a cross-over, randomized double-blind placebo-controlled trial // *Clinical Nutrition*. 2021. Vol. 40, Iss. 7. P. 4585–4594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2021.06.002>.
- Surber G., Spiegel T., Dang B. P., Pombo A. W. [et al.]. Cream cheese made with exopolysaccharide-producing *Lactococcus lactis*: Impact of strain and curd homogenization pressure on texture and syneresis // *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 308. Article number: 110664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110664>.
- Tian P., Chen Y., Zhu H., Wang L. [et al.]. *Bifidobacterium breve* CCFM1025 attenuates major depression disorder via regulating gut microbiome and tryptophan metabolism: A randomized clinical trial // *Brain, Behavior, and Immunity*. 2022a. Vol. 100. P. 233–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2021.11.023>.
- Tian R., Yu Z., Yu L., Tian F. [et al.]. Effects of *Bifidobacterium Longum* Ccfm5871 as an adjunct starter culture on the production of fermented milk // *SSRN*. 2022b. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4180220>.
- Todorov S. D., Popov I., Weeks R., Chikindas M. L. Use of bacteriocins and bacteriocinogenic beneficial organisms in food products: Benefits, challenges, concerns // *Foods*. 2022. Vol. 11, Iss. 19. Article number: 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11193145>.
- Vamanu E., Gatea F. Correlations between microbiota bioactivity and bioavailability of functional compounds: A mini-review // *Biomedicines*. 2020. Vol. 8, Iss. 2. Article number: 39. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines8020039>.
- Wan C., Qian W. W., Liu W., Pi X. [et al.]. Exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* ZFM231 alleviates DSS-induced colitis in mice by regulating gut microbiota // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022. Vol. 102, Iss. 15. P. 7087–7097. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12070>.
- Wang Q., Liu X., Fu J., Wang S. [et al.]. Substrate sustained release-based high efficacy biosynthesis of GABA by *Lactobacillus brevis* NCL912 // *Microbial Cell Factories*. 2018. Vol. 17. Article number: 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0919-6>.
- Xu Z., Li S., Gong G., Liu Z. [et al.]. Influence of different acidifying strains of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* on the quality of yoghurt // *Food Science and Technology Research*. 2015. Vol. 21, Iss. 2. P. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.21.263>.
- Yao S., Zhao Z., Wang W., Liu X. *Bifidobacterium Longum*: Protection against inflammatory bowel disease // *Journal of Immunology Research*. 2021. Vol. 2021. Article number: 8030297. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8030297>.
- Zha M., Yu J., Zhang Y., Wang H. [et al.]. Study on *Streptococcus thermophilus* isolated from Qula and associated characteristic of acetaldehyde and diacetyl in their fermented milk // *The Journal of General and Applied Microbiology*. 2015. Vol. 61, Iss. 2. P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.2323/jgam.61.50>.
- Zhang Y., Yang J., Liu Y., Wu Y. [et al.]. A novel bacteriocin PE-ZYB1 produced by *Pediococcus pentosaceus* zy-B isolated from intestine of *Mimachlamys nobilis*: Purification, identification and its anti-listerial action // *LWT*. 2019. Vol. 118. Article number: 108760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108760>.
- Zhuang K., Jiang Y., Feng X., Li L. [et al.]. Transcriptomic response to GABA-producing *Lactobacillus plantarum* CGMCC 1.2437^T induced by L-MSG // *PloS One*. 2018. Vol. 13, Iss. 6. Article number: e0199021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199021>.

References

- Artyukhova, S. I., Klyueva, K. V. 2015. Prospects for the development of domestic biologically active food additives based on consortia of lactic acid bacteria and bifidobacteria. *Young Russia: Advanced Technologies – in Industry!*, 3, pp. 208–212. EDN: UZEPEV. (In Russ.)
- Utebaeva, A. A., Burmasova, M. A., Sysoeva, M. A. 2016. Prospects for the use of bifidobacteria in functional nutrition products and medicines. *Izvestiya Vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology*, 4(19), pp. 100–109. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-4-100-109. EDN: XHYJGF. (In Russ.)
- Akabanda, F., Owusu-Kwarteng, J., Tano-Debrah, K., Parkouda, C. et al. 2014. The use of lactic acid bacteria starter culture in the production of *Nunu*, a spontaneously fermented milk product in Ghana. *International Journal of Food Science*, 2014. Article number: 721067. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/721067>.
- Ansorena, D., Astiasarán, I. 2016. Fermented foods: Composition and health effects. *Encyclopedia of Food and Health*, pp. 649–655. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00285-3>.
- Arqués, J. L., Rodríguez, E., Langa, S., Landete, J. M. et al. 2015. Antimicrobial activity of lactic acid bacteria in dairy products and gut: Effect on pathogens. *BioMed Research International*, 2015. Article number: 584183. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/584183>.
- Aunsbjerg, S. D., Honoré, A. H., Marcussen, J., Ebrahimi, P. et al. 2015. Contribution of volatiles to the antifungal effect of *Lactobacillus paracasei* in defined medium and yogurt. *International Journal of Food Microbiology*, 194, pp. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.11.007>.
- Ayivi, R. D., Ibrahim, S. A. 2022. Lactic acid bacteria: An essential probiotic and starter culture for the production of yoghurt. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(11), pp. 7008–7025. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.16076>.
- Bai, Y., Luo, B., Zhang, Y., Li, X. et al. 2021. Exopolysaccharides produced by *Pediococcus acidilactici* MT41-11 isolated from camel milk: Structural characteristics and bioactive properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185. P. 1036–1049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.152>.
- Belicová, A., Mikulášová, M., Dušinský, R. 2013. Probiotic potential and safety properties of *Lactobacillus plantarum* from Slovak Bryndza cheese. *BioMed Research International*, 2013. Article number: 760298. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/760298>.
- Bintsis, T. 2018. Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 4(4), pp. 665–684. DOI: <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>.
- Capurso, L. 2019. Thirty years of *Lactobacillus rhamnosus* GG. A review. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 53, pp. S1–S41. DOI: <https://doi.org/10.1097/MCG.0000000000001170>.
- Casarotti, S. N., Monteiro, D. A., Moretti, M. M. S., Penna, A. L. B. 2014. Influence of the combination of probiotic cultures during fermentation and storage of fermented milk. *Food Research International*, 59, pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.068>.
- Castro, J. M., Tornadijo, M. E., Fresno, J. M., Sandoval, H. 2015. Biocheese: A food probiotic carrier. *BioMed Research International*, 2015. Article number: 723056. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/723056>.
- Coelho, M. C., Malcata, F. X., Silva, C. C. G. 2022. Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: From starter cultures to probiotic functions. *Foods*, 11(15). Article number: 2276. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152276>.
- Cui, Y., Wang, M., Zheng, Y., Miao, K. et al. 2021. The carbohydrate metabolism of *Lactiplantibacillus plantarum*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24). Article number: 13452. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms222413452>.
- Dai, D. L. Y., Petersen, C., Hoskinson, C., Del Bel, K. L. et al. 2023. Breastfeeding enrichment of *B. Longum* subsp. *Infantis* mitigates the effect of antibiotics on the microbiota and childhood asthma risk. *Med*, 4(2), pp. 92–112.e5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medj.2022.12.002>.
- Dal Bello, B., Cocolin, L., Zeppa, G., Field, D. et al. 2012. Technological characterization of bacteriocin producing *Lactococcus lactis* strains employed to control *Listeria monocytogenes* in cottage cheese. *International Journal of Food Microbiology*, 153(1–2), pp. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.016>.
- Dan, T., Chen, H., Li, T., Tian, J. et al. 2019. Influence of *Lactobacillus plantarum* P-8 on fermented milk flavor and storage stability. *Frontiers in Microbiology*, 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03133>.
- Dan, T., Hu, H., Tian, J., He, B. et al. 2023. Influence of different ratios of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* on fermentation characteristics of yogurt. *Molecules*, 28(5). Article number: 2123. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28052123>.
- de Almeida, J. d. S. O., Dias, C. O., Pinto, S. S., Pereira, L. C. et al. 2018. Probiotic mascarpone-type cheese: Characterisation and cell viability during storage and simulated gastrointestinal conditions. *International Journal of Dairy Technology*, 71(S1), pp. 195–203. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12457>.
- de Castilho, N. P. A., Nero, L. A., Todorov, S. D. 2019. Molecular screening of beneficial and safety determinants from bacteriocinogenic lactic acid bacteria isolated from Brazilian artisanal calabresa. *Letters in Applied Microbiology*, 69(3), pp. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1111/lam.13194>.

- de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Junqueira, A. C. D. O., Karp, S. G. et al. 2020. A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*, 36(2), pp. 135–167. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>.
- Frece, J., Cvrtila, J., Topić, I., Delaš, F. et al. 2014. *Lactococcus lactis* ssp. *Lactis* as potential functional starter culture. *Food Technology and Biotechnology*, 52(4), pp. 489–494. DOI: <https://doi.org/10.17113/ftb.52.04.14.3794>.
- Fusieger, A., Martins, M. C. F., de Freitas, R., Nero, L. A. et al. 2020. Technological properties of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* obtained from dairy and non-dairy niches. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51, pp. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00182-3>.
- Goldstein, E. J., Tyrrell, K. L., Citron, D. M. 2015. *Lactobacillus* species: Taxonomic complexity and controversial susceptibilities. *Clinical Infectious Diseases*, 60(Suppl. 2), pp. S98–S107. DOI: <https://doi.org/10.1093/cid/civ072>.
- Gotoh, Y., Kita, K., Tanaka, K., Ishikawa, S. et al. 2021. Genome sequences of two strains of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* with the same ancestry but a different capacity to produce exopolysaccharides. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 67(5), pp. 220–223. DOI: <https://doi.org/10.2323/jgam.2021.03.001>.
- Gu, Y., Li, X., Xiao, R., Dudu, O. E. et al. 2020. Impact of *Lactobacillus paracasei* IMC502 in coculture with traditional starters on volatile and non-volatile metabolite profiles in yogurt. *Process Biochemistry*, 99, pp. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.07.003>.
- Hernández-Parada, N., González-Ríos, O., Suárez-Quiroz, M. L., Hernández-Estrada, Z. J. et al. 2023. Exploiting the native microorganisms from different food matrices to formulate starter cultures for sourdough bread production. *Microorganisms*, 11(1). Article number: 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010109>.
- Hidalgo-Cantabrana, C., Delgado, S., Ruiz, L., Ruas-Madiedo, P. et al. 2017. Bifidobacteria and their health-promoting effects. *Microbiology Spectrum*, 5(3). DOI: <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.BAD-0010-2016>.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R. et al. 2014. Expert consensus document. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11(8), pp. 506–514. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66>.
- Jia, R., Chen, H., Chen, H., Ding, W. 2016. Effects of fermentation with *Lactobacillus rhamnosus* GG on product quality and fatty acids of goat milk yogurt. *Journal of Dairy Science*, 99(1), pp. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10114>.
- Joshi, V. K. 2015. Indigenous fermented foods of South Asia. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19214>.
- Kok, C. R., Hutkins, R. 2018. Yogurt and other fermented foods as sources of health-promoting bacteria. *Nutrition Reviews*, 76(Suppl. 1), pp. 4–15. DOI: <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy056>.
- Kort, R., Westerik, N., Mariela Serrano, L., Douillard, F. P. et al. 2015. A novel consortium of *Lactobacillus rhamnosus* and *Streptococcus thermophilus* for increased access to functional fermented foods. *Microbial Cell Factories*, 14. Article number: 195. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0370-x>.
- Li, S., Huang, R., Shah, N. P., Tao, X. et al. 2014. Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315. *Journal of Dairy Science*, 97(12), pp. 7334–7343. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7912>.
- Linares, D. M., Gómez, C., Renes, E., Fresno, J. M. et al. 2017. Lactic acid bacteria and bifidobacteria with potential to design natural biofunctional health-promoting dairy foods. *Frontiers in Microbiology*, 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00846>.
- Liu, G., Ren, G., Zhao, L., Cheng, L. et al. 2017. Antibacterial activity and mechanism of bifidocin A against *Listeria monocytogenes*. *Food Control*, 7, Part B, pp. 854–861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.036>.
- Makino, S., Sato, A., Goto, A., Nakamura, M. et al. 2016. Enhanced natural killer cell activation by exopolysaccharides derived from yogurt fermented with *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* OLL1073R-1. *Journal of Dairy Science*, 99(2), pp. 915–923. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10376>.
- Małaczewska, J., Kaczorek-Łukowska, E. 2021. Nisin-A lantibiotic with immunomodulatory properties: A review. *Peptides*, 137. Article number: 170479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2020.170479>.
- Markowiak, P., Ślizewska, K. 2017. Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. *Nutrients*, 9(9). Article number: 1021. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu9091021>.
- Mills, S., Griffin, C., O'Connor, P. M., Serrano, L. M. et al. 2017. A multibacteriocin cheese starter system, comprising Nisin and Lacticin 3147 in *Lactococcus lactis*, in combination with Plantaricin from *Lactobacillus plantarum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(14). DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00799-17>.
- Mohammed, Y., Lee, B., Kang, Z., Du, G. 2014. Capability of *Lactobacillus reuteri* to produce an active form of Vitamin B12 under optimized fermentation conditions. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, 2, pp. 617–621.
- Mokoena, M. P. 2017. Lactic acid bacteria and their bacteriocins: Classification, biosynthesis and applications against uropathogens: A mini-review. *Molecules*, 22(8). Article number: 1255. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22081255>.

- Moser, A., Schafroth, K., Meile, L., Egger, L. et al. 2018. Population dynamics of *Lactobacillus helveticus* in Swiss Gruyère-type cheese manufactured with natural whey cultures. *Frontiers in Microbiology*, 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00637>.
- Nagaoka, S. 2019. Yogurt production. In *Lactic Acid Bacteria. Methods in Molecular Biology*. Eds.: M. Kanauchi. Vol. 1887. Humana Press, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8907-2_5.
- Noda, M., Danshiitsoodol, N., Sakaguchi, T., Kanno, K. et al. 2021. Exopolysaccharide produced by plant-derived *Lactobacillus plantarum* SN35N exhibits antiviral activity. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 44(12), pp. 1886–1890. DOI: <https://doi.org/10.1248/bpb.b21-00517>.
- Oh, N. S., Joung, J. Y., Lee, J. Y., Kim, S. H. et al. 2016. Characterization of the microbial diversity and chemical composition of gouda cheese made by potential probiotic strains as an adjunct starter culture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(39), pp. 7357–7366. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02689>.
- Okubo, R., Xiao, J., Matsuoka, Y. J. 2021. Potential beneficial effects of *Bifidobacterium breve* A1 on cognitive impairment and psychiatric disorders. In *The Neuroscience of Depression. Features, Diagnosis, and Treatment*. Eds.: C. R. Martin, L.-A. Hunter V. et al. Academic Press, pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817933-8.00040-2>.
- Papademas, P. 2014. Dairy microbiology. A practical approach. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17915>.
- Pimentel, T. C., Garcia, S., Prudêncio, S. H. 2012. Effect of long-chain inulin on the texture profile and survival of *Lactobacillus paracasei* spp *paracasei* in set yoghurts during refrigerated storage. *International Journal of Dairy Technology*, 65(1), pp. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00739.x>.
- Pompei, A., Cordisco, L., Amaretti, A., Zanoni, S. et al. 2007. Folate production by bifidobacteria as a potential probiotic property. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(1). DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01763-06>.
- Prado, M. R., Blandón, L. M., Vandenberghe, L. P. S., Rodrigues, C. et al. 2015. Milk kefir: Composition, microbial cultures, biological activities, and related products. *Frontiers in Microbiology*, 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01177>.
- Ratanaburee, A., Kantachote, D., Charernjitrakul, W., Sukhoom, A. 2013. Selection of γ -aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria and their potential as probiotics for use as starter cultures in Thai fermented sausages (*Nham*). *International Journal of Food Science & Technology*, 48(7), pp. 1371–1382. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12098>.
- Seddik, H. A., Bendali, F., Gancel, F., Fliss, I. et al. 2017. *Lactobacillus plantarum* and its probiotic and food potentialities. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 9(2), pp. 111–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9264-z>.
- Shiby, V. K., Mishra, H. N. 2013. Fermented milks and milk products as functional foods – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(5), pp. 482–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.547398>.
- Siçramaz, H., Güven, O. T., Can, A., Ayar, A. et al. 2022. Impact of different starter cultures and *Lactobacillus helveticus* on volatile components, chemical and sensory properties of pasta filata cheese. *Current Research in Food Science*, 5, pp. 1009–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.05.017>.
- Solito, A., Bozzi Cionci, N. B., Calgaro, M., Caputo, M. et al. 2021. Supplementation with *Bifidobacterium breve* BR03 and B632 strains improved insulin sensitivity in children and adolescents with obesity in a cross-over, randomized double-blind placebo-controlled trial. *Clinical Nutrition*, 40(7), pp. 4585–4594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2021.06.002>.
- Surber, G., Spiegel, T., Dang, B. P., Pombo, A. W. et al. 2021. Cream cheese made with exopolysaccharide-producing *Lactococcus lactis*: Impact of strain and curd homogenization pressure on texture and syneresis. *Journal of Food Engineering*, 308. Article number: 110664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110664>.
- Tian, P., Chen, Y., Zhu, H., Wang, L. et al. 2022a. *Bifidobacterium breve* CCFM1025 attenuates major depression disorder via regulating gut microbiome and tryptophan metabolism: A randomized clinical trial. *Brain, Behavior, and Immunity*, 100, pp. 233–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2021.11.023>.
- Tian, R., Yu, Z., Yu, L., Tian, F. et al. 2022b. Effects of *Bifidobacterium Longum* Ccfm5871 as an adjunct starter culture on the production of fermented milk. *SSRN*. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4180220>.
- Todorov, S. D., Popov, I., Weeks, R., Chikindas, M. L. 2022. Use of bacteriocins and bacteriocinogenic beneficial organisms in food products: Benefits, challenges, concerns. *Foods*, 11(19). Article number: 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11193145>.
- Vamanu, E., Gatea, F. 2020. Correlations between microbiota bioactivity and bioavailability of functional compounds: A mini-review. *Biomedicines*, 8(2). Article number: 39. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines8020039>.
- Wan, C., Qian, W. W., Liu, W., Pi, X. et al. 2022. Exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* ZFM231 alleviates DSS-induced colitis in mice by regulating gut microbiota. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(15), pp. 7087–7097. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12070>.

- Wang, Q., Liu, X., Fu, J., Wang, S. et al. 2018. Substrate sustained release-based high efficacy biosynthesis of GABA by *Lactobacillus brevis* NCL912. *Microbial Cell Factories*, 17. Article number: 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0919-6>.
- Xu, Z., Li, S., Gong, G., Liu, Z. et al. 2015. Influence of different acidifying strains of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* on the quality of yoghurt. *Food Science and Technology Research*, 21(2), pp. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.21.263>.
- Yao, S., Zhao, Z., Wang, W., Liu, X. 2021. *Bifidobacterium Longum*: Protection against inflammatory bowel disease. *Journal of Immunology Research*, 2021. Article number: 8030297. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8030297>.
- Zha, M., Yu, J., Zhang, Y., Wang, H. et al. 2015. Study on *Streptococcus thermophilus* isolated from Qula and associated characteristic of acetaldehyde and diacetyl in their fermented milk. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 61(2), pp. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.2323/jgam.61.50>.
- Zhang, Y., Yang, J., Liu, Y., Wu, Y. et al. 2019. A novel bacteriocin PE-ZYB1 produced by *Pediococcus pentosaceus* zy-B isolated from intestine of *Mimachlamys nobilis*: Purification, identification and its anti-listerial action. *LWT*, 118. Article number: 108760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108760>.
- Zhuang, K., Jiang, Y., Feng, X., Li, L. et al. 2018. Transcriptomic response to GABA-producing *Lactobacillus plantarum* CGMCC 1.2437^T induced by L-MSG. *PLoS One*, 13(6). Article number: e0199021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199021>.

Сведения об авторах

Каночкина Мария Сергеевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), канд. техн. наук;
ООО "Микробные нутриенты иммунокорректоры", научный руководитель
биотехнологических проектов;
e-mail: kanoch@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0001-6077-5957>

Maria S. Kanochkina – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Limited liability company "Microbial nutrients immunocorrectors",
Scientific Director of biotechnological projects;
e-mail: kanoch@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0001-6077-5957>

Иванова Людмила Афанасьевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), д-р техн. наук, профессор;
e-mail: biotech@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1993-8333>

Ludmila A. Ivanova – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: biotech@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1993-8333>

Коновалова Анастасия Дмитриевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), студент;
e-mail: konovalova.bio@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4998-1994>

Anastasia D. Konovalova – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Student;
e-mail: konovalova.bio@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4998-1994>

Левин Олег Николаевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), студент;
e-mail: oleg.l-e-v-i-n@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8567-412X>

Oleg N. Levin – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Student;
e-mail: oleg.l-e-v-i-n@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8567-412X>

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 26, № 4 (октябрь – декабрь) 2023 г.



Подписано в печать 18.12.2023
Дата выхода в свет 22.12.2023
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 21.62. Тираж 500 экз. Заказ № 185.
Цена 2 000 р. 00 коп.

Адрес издателя:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в редакционно-издательском центре МАУ :
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13