

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Нижний Новгород 2025

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 3 (31). – 132 с.

Выходит 1 раз в квартал

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки), 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Главный редактор

Алексей Борисович Лоскутов, д-р техн. наук, профессор

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент

Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Даурен Садыкович Ахметбаев

д-р техн. наук (Казахстан)

Геннадий Яковлевич Вагин

д-р техн. наук, профессор

Леонид Абрамович Герман

д-р техн. наук, профессор

Валерий Геннадьевич Гольдштейн

д-р техн. наук, профессор

Игорь Васильевич Гуляев

д-р техн. наук, профессор

Павел Владимирович Илюшин

д-р техн. наук

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мешеряков

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Олег Станиславович Хватов

д-р техн. наук, профессор

Александр Иванович Чивенков

д-р техн. наук, профессор

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://ie.nntu.ru>

СМИ зарегистрировано Роскомнадзором
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	4
Вуколов В.Ю., Жаринов И.В. Разработка алгоритмов реализации многокритериального определения оптимальной конфигурации распределительных электрических сетей 6-35 кВ.....	4
Хватов О.С., Марков Д.К., Билялетдинов Т.З. Использование гибридного буферного накопителя электрической энергии на основе аккумуляторных батарей и блоков суперконденсаторов в асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения...	22
Рыжова Е.Л. Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава – методы, примеры их реализации, перспективы развития.....	38
Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорное устройство опережающего защитного отключения шахтного кабеля.....	61
Барabanова Л.П., Кузнецов Н.А., Леонтьева В.С. Математическое моделирование магнитного поля двухосного магнитного излучателя километрового (длинноволнового) диапазона частот системы электромагнитного позиционирования.....	74
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	84
Токарев И.С. Многофункциональная система накопления электрической энергии в газовой отрасли.....	84
Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В., Елфимов С.А., Сергеева А.Э. Современное состояние развития кабельных муфт с полимерной изоляцией.....	98
Юшкевич У.К., Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави А.Д.М. Динамическое управление энергопотреблением электрических зарядных станций: современные подходы и технологии.....	117

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.1

EDN CCONYN

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

В.Ю. Вуколов

ORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: Vvucolov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***И.В. Жаринов**

ORCID: 0009-0003-4544-8458 e-mail: i_zharinov@mail.ru

Дзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Дзержинск, Россия

Представлены результаты разработки проблемы многокритериального выбора при оптимизации электросетей 6-35 кВ. При проектировании электрической сети выбор оптимальной конфигурации является ответственным этапом, играющим важнейшую роль в формировании экономических и технических показателей энергосистемы. Главной целью при этом является использование интеллектуальных электронных устройств, снижение потерь при передаче электроэнергии, обеспечение требуемого уровня надежности сети, а также разработка схемы быстродействующих переключения в аварийных режимах, которая предусматривает отключения узлов энергосистемы при переходе между режимами и в критических ситуациях. В процессе реконфигурации для повышения производительности системы происходит изменение функциональных связей между элементами распределительной электросети. Высокая степень влияния неопределенностей на стабильность работы и надежность электросетей обуславливает необходимость разработки методов их преодоления, одним из эффективных является метод, основанный на оптимизации по Парето.

Представлены методы определения оптимальной разомкнутой конфигурации электросетевого района, основанные на принципе Парето. Они могут быть реализованы индивидуально для каждого потребителя исследуемой распределительной сети. Разработанные алгоритмы сравнения альтернативных вариантов и поиска оп-

тимального решения реализуются с применением единичных показателей надежности, отражающих различные аспекты целевого назначения системы с учетом особенностей их функционирования. В рамках проведенного исследования в качестве мажоритарного критерия использовался критерий максимальной надежности. Также учитывался приоритет мощности при определении ключевого потребителя. Применение критерия оптимальности по Парето дает набор «неидеальных» решений, каждое из которых превосходит остальные хотя бы по одному признаку. Практическая реализация разработанных алгоритмов в автоматизированных системах управления режимом и конфигурацией распределительных электрических сетей позволит повысить эффективность передачи электроэнергии, что приведет к снижению расхода первичного топлива (газ, уголь, мазут и т.п.) на производство электроэнергии, а также величины возможного ущерба от нарушения электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: время бесперебойной работы, категория надежности, конфигурация сети, критерий, надежность, недоотпуск энергии, отказ, параметр потока восстановления, потери электроэнергии, принцип надежности Парето, распределительная сеть.

Для цитирования: Вуколов В.Ю., Жаринов И.В. Разработка алгоритмов реализации многокритериального определения оптимальной конфигурации распределительных электрических сетей 6-35 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 4-21. EDN CCOHYN

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR IMPLEMENTATION OF MULTICRITERIAL DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF 6-35 kV DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

V.Yu. Vukolov

ORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: Vvucolov@mail.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.V. Zharinov

ORCID: 0009-0003-4544-8458 e-mail: i_zharinov@mail.ru
Dzerzhinsky Polytechnic Institute (branch)
«Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev»
Dzerzhinsk, Russia

Abstract. The article presents the results of developing a multi-criteria choice problem for optimizing 6-35 kV power networks. Selecting the optimal network configuration is a critical stage in the design of an electrical network that plays a key role in shaping the economic and technical performance of the power system. The main goal is to use intelligent electronic devices, reduce losses during power transmission, ensure the required

level of network reliability, and develop a high-speed switching scheme in emergency modes that provides the disconnection of power system nodes during transition between modes and in critical situations. Functional relationships between elements of the distribution network are changed during the reconfiguration process to improve system performance. The high degree of influence of uncertainties on the stability of operation and reliability of power networks necessitates the development of methods to overcome them. One of the effective methods is the method based on Pareto optimization.

The paper presents methods for determining the optimal open configuration of an electric network that implement the Pareto principle. These methods can be implemented individually for each consumer of the distribution network under study. The developed algorithms for comparing alternative options and searching for the optimal solution are implemented using single reliability indicators that reflect various aspects of the intended purpose of the system, taking into account the operating features. The maximum reliability criterion was used as a majority criterion. The priority of power was also taken into account when determining the key consumer. The use of the Pareto optimality criterion yields a set of «less than ideal» solutions, each of which is superior to the others in at least one way. The practical implementation of the developed algorithms in automated control systems for the mode and configuration of distribution electric networks will increase the efficiency of electricity transmission, which will lead to a reduction in the consumption of primary fuel (gas, coal, fuel oil, etc.) for electricity production, and will also reduce the amount of possible damage from a power supply disruption to consumers.

Keywords: uptime, reliability category, network configuration, criterion, reliability, undersupply of energy, failure, recovery flow parameter, power losses, Pareto reliability principle, uptime, distribution network.

For citation: V.Yu. Vukolov and I.V. Zharinov, “Development of algorithms for implementation of multicriterial determination of the optimal configuration of 6-35 kV distribution electric networks”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-21, 2025. EDN CCOHYN

I. Введение

Обеспечение надежного и бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией надлежащего качества является главной задачей электроэнергетических систем. Конечным звеном передачи электроэнергии до трансформаторных подстанций являются распределительные электрические сети 6-35 кВ, самые протяженные и разветвленные (протяженность сетей 6-35 кВ в России составляет порядка 2 млн км). Одним из главных показателей систем электроснабжения является их надежность, на которую значительное влияние оказывают случайные события, происходящие в условиях реальной эксплуатации: отказы, аварии в энергосистемах, нестабильность генерации и т.п.

В современных условиях электроэнергетический комплекс характеризуется высокой степенью изношенности основных фондов. Так, по дан-

ным Министерства энергетики РФ [1], суммарная мощность генерирующего оборудования, введенного в эксплуатацию в 1961-1970 гг., составляет 42,3 тыс. МВт (17,1 %), в 1971-1980 гг. – 55,6 тыс. МВт (22,5 %) и в 1981-1990 гг. – 51,4 тыс. МВт (20,8 %). Суммарная установленная мощность генерирующего оборудования, введенного в эксплуатацию до 1961 г., составляет 14,0 тыс. МВт (5,7 %), введенного в эксплуатацию в 1991-2022 гг. – 84,3 тыс. МВт (34 %). Более 50 % оборудования работает с превышением нормативного срока эксплуатации, что приводит к снижению надежности электроснабжения конечных потребителей, отказам и убыткам [2, 3]. Текущее состояние электросетевого комплекса также характеризуется снижением инвестиций в обновление основного оборудования. Программы перспективного развития электрических сетей тоже существенно сокращены. Возникает необходимость разработки как однокритериальных, так и многокритериальных подходов, которые позволят без дополнительных капитальных затрат обеспечить повышение эффективности функционирования распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кВ. Поставленная задача достигается управлением конфигурацией сети на основе величины нагрузочных потерь мощности и показателей надежности включенных в работу элементов электропередачи в нормальном, ремонтном и послеаварийном режимах.

Вопросам повышения надежности и эффективности передачи электрической энергии в распределительных сетях 6-35 кВ посвящено большое количество работ как отечественных [4-8], так и зарубежных авторов [9-16]. В то же время при решении задачи обеспечения эффективности субъектов электроэнергетики до сих пор актуальными остаются вопросы оптимизации конфигурации и режимов электрических сетей.

При разработке алгоритмов управления конфигурацией распределительных электрических сетей требуется учитывать следующие факторы:

- соответствие напряжения в узлах подключения потребителей нормативным требованиям;
- соответствие допустимых токовых нагрузок линий электропередачи (ЛЭП) их характеристикам;
- нагрузочные потери электроэнергии в нормальном установившемся режиме сети;
- показатели надежности элементов электропередачи.

II. Применение принципа Парето при управлении конфигурацией сети

В условиях реальной эксплуатации распределительные сети 6-35 кВ либо радиальные, либо длительно работают в разомкнутом режиме [17]. Таким образом, каждый потребитель получает питание одновременно только от одного источника. Управление нормальным режимом такой сети сводится к выбору предпочтительной разомкнутой конфигурации с учетом

схемных и режимных ограничений. Решение поставленной задачи тем сложнее, чем больше элементов в электрической сети [18].

В большинстве практических задач оптимальную конфигурацию распределительной сети 6-35 кВ определяют по одному критерию (т.н. «однокритериальная оптимизация»). Данный метод прост и быстр в реализации. С другой стороны, однокритериальный подход не дает возможности эффективно учитывать множество требований со стороны различных субъектов рынка электрической энергии, которые зачастую являются противоречивыми. При решении задач управления системой электроснабжения в условиях необходимости учета интересов всех участников процесса передачи и распределения электроэнергии, которые характеризуются наличием множества критериев оптимизации, целесообразно применять многокритериальные алгоритмы, способные учитывать весь спектр характеристик системы электропередачи (т.н. «оптимизация по Парето»).

Применение критерия оптимальности по Парето дает набор «неидеальных» решений, каждое из которых превосходит остальные хотя бы по одному признаку. Количество Парето-оптимальных вариантов, как правило, достаточно велико, поэтому требуется дальнейший анализ решений с целью определения одного или нескольких наилучших вариантов [19]. Таким образом, данную теорию целесообразно использовать лишь в том случае, когда имеется явный приоритет между выбранными критериями оптимизации.

Множество Парето представляет собой множество неулучшаемых вариантов решений, т.е. вариант является Парето-оптимальным, если значение любого критерия можно улучшить, лишь ухудшая значения остальных. Это можно представить следующим выражением (1) [20]:

$$x_i^k \geq x_l^k, \quad k = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где x_i^k — значение критерия k альтернативы i ; x_l^k — значение критерия k альтернативы l ; K — множество критериев типа «выигрыш»; I — все множество сравниваемых альтернатив.

Согласно представленному подходу, для каждой точки передачи электрической энергии (узла нагрузки) определяется разомкнутая Парето-оптимальная конфигурация распределительной сети 6-35 кВ. Для окончательного определения оптимального решения используют другие методы многопараметрической оптимизации (метод последовательных уступок [21], метод главного критерия [22] и др.), т.е. применяется комбинированный подход при оптимизации сложных систем.

III. Реализация комбинированного подхода при определении оптимальной конфигурации распределительной сети 6-35 кВ

В качестве модели для апробации разрабатываемых алгоритмов выбран уже рассмотренный ранее [2] участок электрических сетей Нижегородской области номинальным напряжением 35 кВ (рис. 1). На основе однолинейной схемы строится ненаправленный граф электросетевого района. Центрами питания (ЦП) рассматриваемого участка сети являются распределительные устройства 35 кВ Новогорьковской ТЭЦ (НГ ТЭЦ) и ПС Рубин.

В качестве исходных данных для расчета параметров режима сети и определения нагрузочных потерь мощности использована следующая информация:

- марка и сечение проводов ЛЭП;
- расположение проводов на опорах ЛЭП;
- удельное активное сопротивление проводов;
- паспортные характеристики силовых трансформаторов;
- активная и реактивная мощности нагрузок на стороне низкого напряжения силовых трансформаторов (узлы 11-19).

Путем применения алгоритма построения всех деревьев графа сетевого района (позволяет автоматизировать процесс получения разомкнутых конфигураций) получено четырнадцать возможных конфигураций сети [2], обеспечивающих питание всех нагрузочных узлов (табл. 1).

Анализ полученных результатов показывает, что установленным ранее требованиям соответствуют только первые двенадцать конфигураций рассматриваемой сети 35 кВ, причем длительное использование в нормальном установившемся режиме конфигураций №7 и 8 также может быть ограничено ввиду повышенной токовой нагрузки.

Для анализа полученных конфигураций сети по критерию надежности приняты следующие показатели [2]:

- время бесперебойной работы ($t_{бр}$, год);
- параметр потока восстановлений ($\omega_{в}$ 1/год);
- интенсивность восстановления ($\mu = 1/t_{в}$, 1/ч).

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

Для представленной на рис. 1 распределительной электрической сети суммарно существует 68 разомкнутых путей питания конечных потребителей (узлы 11-19) от источников (узлы 4, 5, 7, 8). Результаты выбора Парето-оптимальных конфигураций представлены в табл. 2.

Полученные результаты показывают, что критерию Парето-оптимальности соответствуют 24 пути питания из 68. В то же время каждое из представленных решений по отдельности не позволяет получить оптимальную разомкнутую конфигурацию участка электрических сетей в целом.

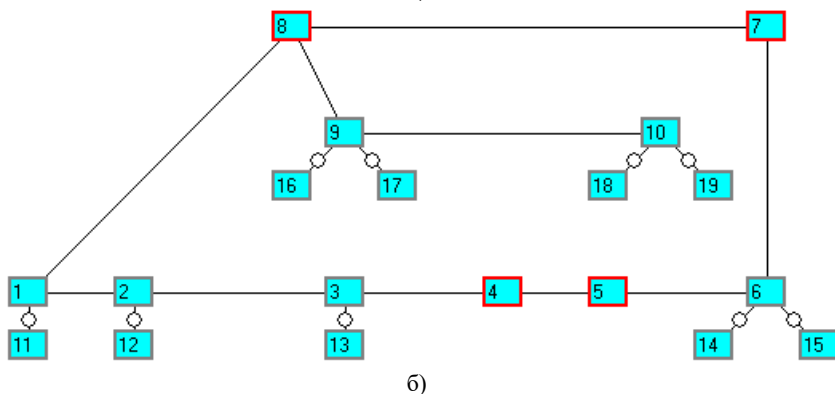
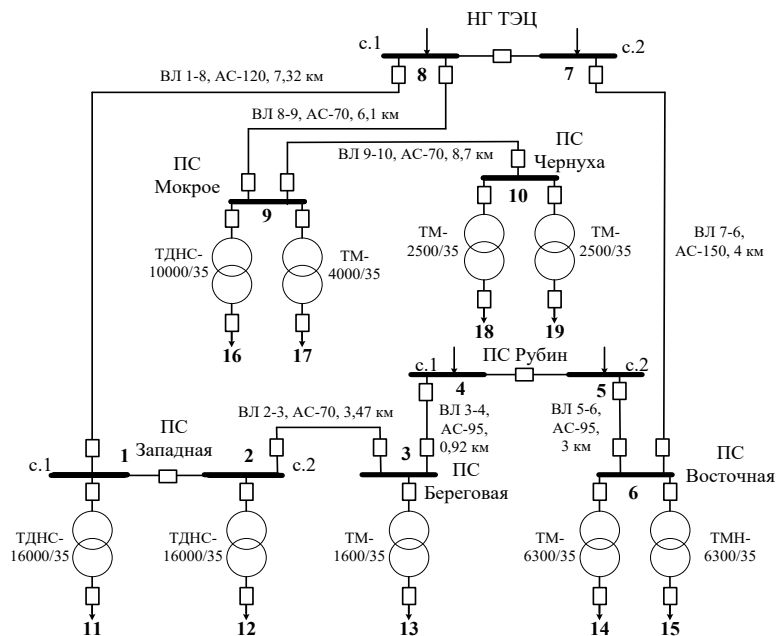


Рис. 1. Однолинейная схема (а) и граф (б) модельного участка электрических сетей напряжением 35 кВ

Fig. 1. Single-line diagram (a) and graph (b) of a model section of 35 kV electrical network

Таблица 1.
Характеристики возможных разомкнутых конфигураций сетевого района

Table 1.
Characteristics of possible open configurations of network

№ конфигурации	Отключенные ветви	Нагрузочные потери, МВт	Характеристика режима электропередачи
1	7-8, 4-5, 1-2, 5-6	0,141	Соответствует требованиям
2	7-8, 4-5, 1-2, 7-6	0,143	Соответствует требованиям
3	7-8, 4-5, 2-3, 7-6	0,181	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 1-8 (0,180 кА)
4	7-8, 4-5, 2-3, 5-6	0,174	
5	7-8, 4-5, 3-4, 5-6	0,192	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 1-8 (0,195 кА)
6	7-8, 4-5, 3-4, 7-6	0,193	
7	7-8, 4-5, 1-8, 5-6	0,182	Соответствует требованиям, сильно загружены ветви 3-4 (0,194 кА) и 2-3 (0,183 кА, нагрузка близка предельной в режиме максимума). Не желательна длительная работа.
8	7-8, 4-5, 1-8, 7-6	0,184	
9	7-8, 1-8, потеря ЦП 4 и 5	0,320	Соответствует требованиям.
10	7-8, 4-5, потеря ЦП 4 и 5	0,194	Соответствует требованиям
11	7-8, 2-3, потеря ЦП 4 и 5	0,184	Соответствует требованиям
12	7-8, 1-2, потеря ЦП 4 и 5	0,173	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 7-6 (0,139 кА)
13	7-8, 4-5, потеря ЦП 7 и 8	0,320	Не соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 3-4 (0,299 кА) и 2-3 (0,285 кА, перегрузка в режиме максимума)
14	7-8, потеря ЦП 4, 5 и 8	0,73	Не соответствует требованиям. Напряжения снижаются ниже допустимых, перегружаются ветви 7-6, 3-2

Для решения этой задачи предлагается использовать метод последовательных уступок. Его суть – разбиение процесса поиска результирующей конфигурации на этапы, на каждом из которых осуществляется сортировка возможных решений по одному приоритетному критерию от максимального значения к минимальному с учетом возможных ограничений.

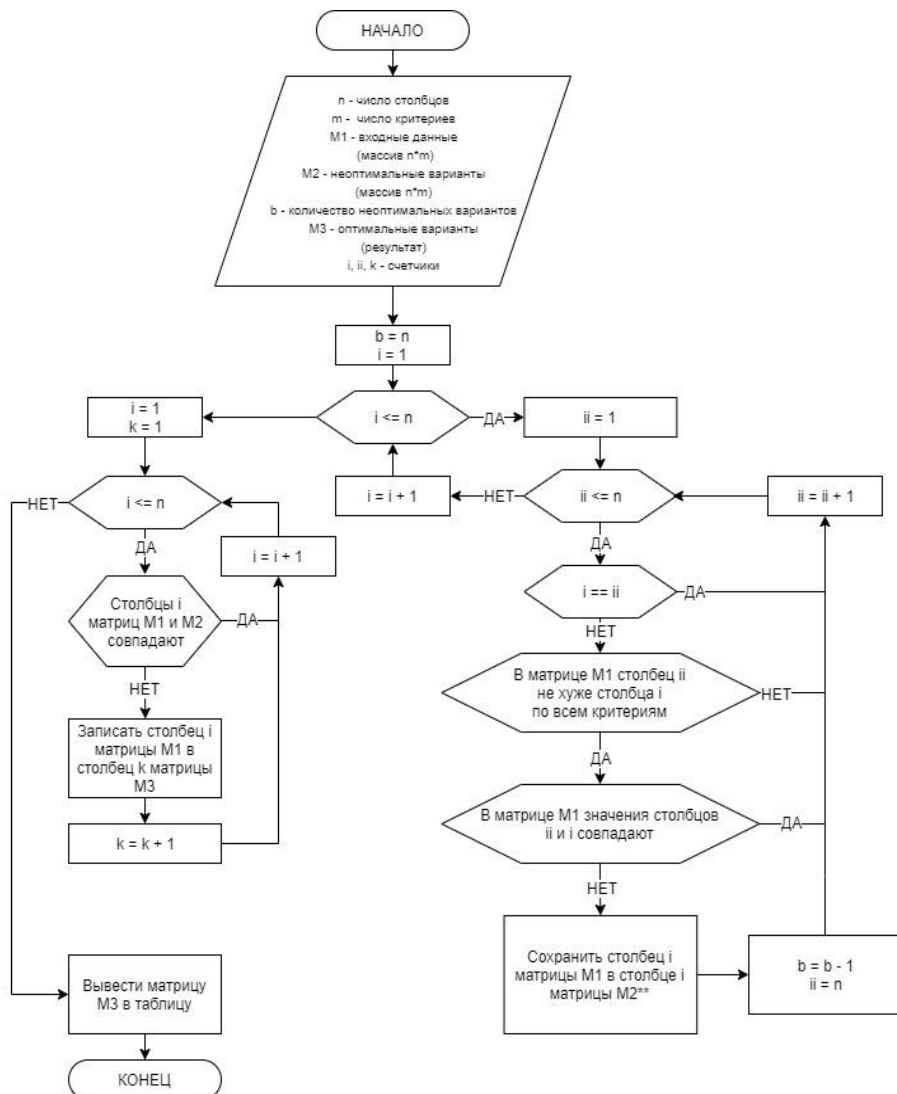


Рис. 2. Блок-схема процесса выбора
Парето-оптимальных конфигураций электрической сети

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for selecting
Pareto-optimal configurations of the electrical network

Таблица 2.
Парето-оптимальные конфигурации сети 35 кВ

Table 2.
Pareto-optimal configurations of the 35 kV network

№ узла (нагрузка)	№ конфи- гурации	Путь по узлам от источника	т _{бр} , год	Фв, 1/год	μ, 1/ч
11	3	7-8-1-11	0,15	0,14	0,17
	6	4-5-6-7-8-1-11	0,075	0,206	0,120
12	6	4-5-6-7-8-1-2-12	0,074	0,207	0,109
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164
	6	4-5-6-7-8-1-2-3-13	0,033	0,238	0,099
	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
14	8	5-4-3-2-1-8-7-6-14	0,047	0,218	0,098
15	8	5-4-3-2-1-8-7-6-15	0,047	0,218	0,098
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,20
	3	7-6-5-4-3-2-1-8-9-16	0,06	0,24	0,09
	4	4-3-2-1-8-9-16	0,09	0,19	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-16	0,088	0,192	0,136
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,20
	3	7-6-5-4-3-2-1-8-9-17	0,06	0,24	0,09
	4	4-3-2-1-8-9-17	0,09	0,19	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-17	0,088	0,192	0,136
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
	4	4-3-2-1-8-9-10-18	0,11	0,17	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-10-18	0,113	0,168	0,141
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
	4	4-3-2-1-8-9-10-19	0,11	0,17	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-10-19	0,113	0,168	0,141

Существенным аспектом при практической реализации метода последовательных уступок в задаче управления конфигурацией распределительных электрических сетей является учет ключевого потребителя. Оценка влияния ключевого потребителя на выбор оптимальной конфигурации рассматривается в двух сценариях.

1. Приоритет пути питания до ключевого потребителя по надежности с последующим построением разомкнутой оптимальной конфигурации для всего участка сети.

2. Построение разомкнутой конфигурации для всех нагрузочных узлов поочередно с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки.

Алгоритм определения оптимальной разомкнутой конфигурации распределительной сети 6-35 кВ методом последовательных уступок с приоритетом ключевого потребителя по надежности включает следующие этапы.

1. Критерии ранжируются по степени относительной значимости. Для рассматриваемого примера: на первом месте – время безотказной работы $t_{БР}$, на втором – интенсивность восстановления μ , на третьем – параметр потока восстановлений ω_B .

2. Определяется максимальное значение $t_{БР}$ (табл. 2) как наиболее значимого критерия (узел 13, конфигурация №5, маршрут 4-3-13, $t_{БР} = 0,363$).

3. Выбирается значение допустимой уступки (Δ), в рамках которого будет рассматриваться возможное снижение критерия (в примере $\Delta = 0,2$). Значение уступки принимается расчетчиком самостоятельно, однако возможное снижение критерия с учетом выбранной уступки не должно выходить за допустимые границы диапазона. При отсутствии ограничений величина уступки определяется, исходя из желаемого сокращения множества Парето-оптимальных решений. В то же время необходимо учесть, что занижение величины Δ может привести к излишнему сокращению рассматриваемой выборки и не оставить возможности для оптимизации на основе следующих по приоритету критериев. В результате из возможных Парето-оптимальных путей питания узлов нагрузки рассматриваемой сети 35 кВ (рис. 1) отбираются только те, у которых $t_{БР}$ находится в диапазоне от 0,163 до 0,363 (табл. 3). Множество Парето-оптимальных решений сокращается до 8 из начальных 24.

4. Определяется максимальное значение μ (табл. 3) как второго по значимости критерия (узлы 16 или 17, конфигурация № 2, маршруты 7-8-9-16 или 7-8-9-17, $\mu = 0,2$).

5. Назначается величина уступки ($\Delta = 0,015$). В результате диапазон возможных решений дополнительно сужается (табл. 3).

6. Этапы 4 и 5 повторяются для каждого из рассматриваемых критериев оптимизации.

Для рассматриваемого примера реализация алгоритма заканчивается на поиске максимального значения третьего по приоритету критерия (ω_B) с учетом величины уступки по второму (ранжируются только конфигурации, для которых значение μ находится в диапазоне от 0,185 до 0,2). При таком подходе узлы 18 и 19 конфигурации № 2 были определены как ключевые (пути питания от источника 7-8-9-10-18 и 7-8-9-10-19).

В то же время, поскольку все разомкнутые конфигурации рассматриваемого района распределительных сетей предусматривают отключение ветви 7-8 (табл. 1), полученные пути передачи электроэнергии от источника

к узлам 18 и 19 не могут быть задействованы в задаче управления конфигурацией. Таким образом, необходимо исключить из рассмотрения пути питания, включающие ветвь 7-8, а в качестве ключевых выбрать узлы 16 и 17 конфигурация №1 (путь питания 8-9-16 и 8-9-17).

Таблица 3.

Множество Парето-оптимальных решений с учетом оптимизации

Table 3.

A variety of Pareto-optimal solutions, taking into account the optimization

Узел	№ конфигурации	Путь по узлам от источника	$t_{БР}$, год	ω_B 1/год	μ , 1/ч
Оптимизация по времени бесперебойной работы					
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164
13	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
16	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,2
17	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,2
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
Оптимизация по интенсивности восстановления					
16	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,2
17	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,2
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
13	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164

Аналогичным образом осуществляется обеспечение связей до остальных потребителей. При этом может возникнуть ситуация, когда выбранные пути питания на этапе оптимизации по второму и последующим критериям не будут соответствовать ни одной из возможных разомкнутых конфигураций исходной распределительной сети. В этом случае следует вернуться на этап оптимизации по предыдущему критерию и увеличить значение допустимой уступки Δ . Тогда при расчете связей до узлов подключения нагрузки будет рассматриваться больший набор конфигураций, включая неоптимальные по Парето.

Необходимо отметить, что показатель надежности, несмотря на его важность, зачастую не позволяет учесть реальную картину потребления электроэнергии при определении оптимальной конфигурации сети. Необходимо учитывать также мощность нагрузки потребителя. В качестве ключевого потребителя целесообразно выбирать узел с максимальной мощностью

нагрузки с последующим расчетом связей до остальных нагрузочных узлов. Для рассматриваемой модели сети приоритетным будет узел 11.

Алгоритм построения разомкнутой конфигурации для всех нагрузочных узлов поочередно с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки включает те же этапы, но имеет ряд особенностей при реализации. Максимальная активная мощность нагрузки подключена к узлу 11, однако выбор оптимального пути питания узла 11 из числа Парето-оптимальных решений невозможен, поскольку каждое из них характеризуется включенным состоянием ветви 7-8. Поэтому выбор пути питания узла 11 необходимо производить из всех возможных вариантов. Приоритет показателей надежности при реализации метода последовательных уступок аналогичен представленному ранее. Процесс выбора оптимального пути питания подробно представлен в табл. 4.

Таблица 4.

Порядок выбора оптимального пути питания до узла нагрузки 11

Table 4.

The procedure for choosing the optimal power supply path to the load node 11

Узел	№ конфигурации	Путь по узлам от источника	$t_{бр}$, год	ОВ 1/год	μ , 1/ч
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137
11	5	4-3-2-1-11	0,18	0,044	0,126
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	4	7-6-5-4-3-2-1-11	0,08	0,11	0,09
Величина уступки времени бесперебойной работы $\Delta = 0,1$					
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137
11	5	4-3-2-1-11	0,18	0,044	0,126
Величина уступки интенсивности восстановления $\Delta = 0,03$					
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137

В табл. 4 выделены пути питания, соответствующие диапазону отклонения с учетом величины уступки. Итоговый путь от источника до ключевого узла подключения нагрузки: 8-1-11. Полученный результат позволяет из двенадцати соответствующих требованиям разомкнутых конфигураций рассматриваемой распределительной сети 35 кВ (табл. 1) исключить конфигурации № 7, 8 и 9 как не соответствующие приоритетному пути до ключевого узла нагрузки. Аналогично производится выбор оптимальных путей питания от источников до других точек подключения нагрузки (узлы 12-19) в порядке уменьшения мощности потребителей. Результаты представлены на рис. 2. Цифрами от 1 до 6 обозначена последовательность выбранных путей питания.

Полученное решение соответствует конфигурации № 4 (табл. 1) с отключенными ветвями 7-8, 4-5, 2-3, 5-6, которая характеризуется близкой к предельной нагрузке ветви 1-8. Если такой режим длительно недопустим, необходимо повторить процесс реализации метода последовательных уступок, но уже с меньшим числом исходных допустимых конфигураций.

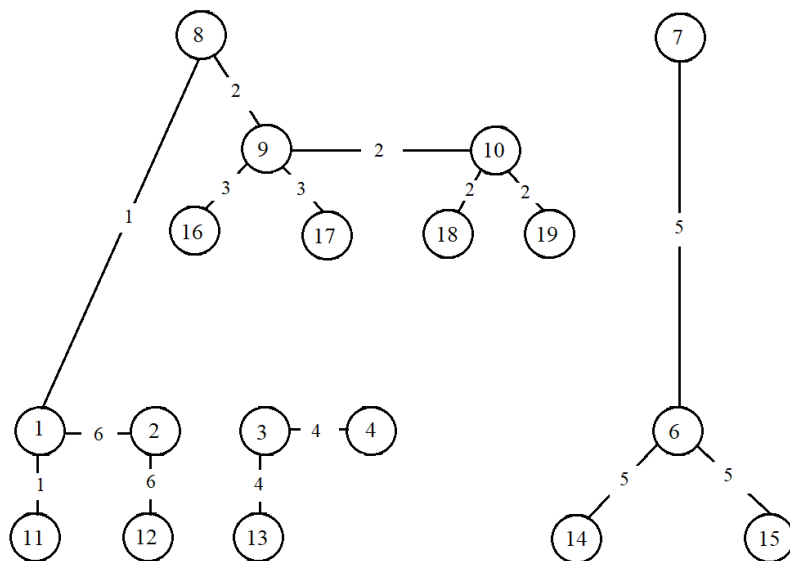


Рис. 2. Ненаправленный граф, соответствующий оптимальной разомкнутой конфигурации участка электрических сетей напряжением 35 кВ

Fig. 2 An undirected graph corresponding to the optimal open-circuit configuration of 35 kV electrical network

Результаты выбора оптимальной конфигурации сетевого района с применением стратегий приоритета ключевого потребителя по надежности/мощности нагрузки при многокритериальной оптимизации совпали. Однако нельзя говорить об их тождественности, поскольку вошедшие в итоговую разомкнутую конфигурацию пути питания узлов нагрузке сильно зависят от величин уступок, принятых на каждом этапе оптимизации. При увеличении числа узлов и ветвей рассматриваемой схемы сети, а также при иных значениях показателей надежности или уступок, результаты оптимизации могут не совпасть. Для практической реализации из двух вариантов рассмотренных вариантов алгоритма управления конфигурацией следует отдавать предпочтение вариации с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки. Поиск Парето-оптимальных путей питания узлов

нагрузки можно использовать только на первом этапе оптимизации (при выборе пути до ключевого потребителя), чтобы не ограничивать область возможных решений на последующих этапах.

IV. Заключение

Применение принципа Парето-оптимальности при выборе разомкнутой конфигурации участка распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кВ позволяет упрощать расчет путем уменьшения числа проверяемых конфигураций сети для последующего многокритериального анализа, например на основе метода последовательных уступок.

Практическая реализация разработанных алгоритмов многокритериальной оптимизации позволит повысить эффективность передачи электроэнергии, что приведет к снижению расхода первичного топлива (газ, уголь, мазут и т.п.) на производство электроэнергии, а также уменьшить возможный ущерб от нарушения электроснабжения потребителей.

© Вуколов В.Ю., 2025

© Жаринов И.В., 2025

Поступила в редакцию 15.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

Received 15.08.2025

Accepted 25.08.2025

Библиографический список

- [1] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2023 г. № 1095 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2024 – 2029 годы» // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России) [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/>
- [2] Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Кочеров С.Е., Папков Б.В. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6-35 кВ по критерию надежности // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 69. 2018. С. 89-98.
- [3] Куликов А. Л., Шарыгин М. В. Оптимизация частичных отключений мощности активных потребителей путем использования резервов их производственных систем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 1. С. 35-45.
- [4] Петрова В.А., Петров А.А. О необходимости учета вероятности отказа агрегата мини-ТЭЦ в момент его запуска при решении задач надежности // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 4. С. 48-56. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-4-48-56
- [5] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог, изд. 2-е. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 183 с.
- [6] Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 208 с.

- [7] Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1988. – 151 с.
- [8] Прусс В.Л., Тисленко В.В. Повышение надежности сельских электрических сетей. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1989. – 208с.
- [9] Гусейнов Г.Б. Рейтинговая оценка и регулирование деятельности распределительных электрических сетей в условиях нечеткости. Львов: Издательство Национального университета «Львівська політехніка», 2006.
- [10] Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- [11] Guan F.H., Zhao D.M., Zhang X., Shan B.T., Liu Z. Research on distributed generation technologies and its impacts on power system // proc. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Apr. 06-07, 2009, Nanjing, China: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241
- [12] Keogh E., Chu S., Hart D., Pazzani M. An online algorithm for segmenting time series // proc. 2001 IEEE International Conference on Data Mining, Nov. 29 – Dec. 02, 2001, San Jose, CA, USA: IEEE, 2001. DOI: 10.1109/ICDM.2001.989531
- [13] Montgomery D.C., Runger G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 706 p.
- [14] Overbye T.J., Klump R.P. Effective calculation of power system low-voltage solutions // proc. IEEE PES Winter Power Meeting, 1995.
- [15] Phadke A.G., Thorp J.S. Computer relaying for power systems. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [16] Povinelli R. Time series data mining: Identifying temporal patterns for characterization and prediction of time series events: Ph.D. thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 1999. – 193 p.
- [17] Вуколов В.Ю., Куликов А.Л., Папков Б.В. Повышение эффективности передачи электроэнергии в распределительных сетях. Ч. 1. Библиотечка электротехника. 2013. № 11. 72 с.
- [18] Правила устройства электроустановок (ПУЭ): 7-е изд. М.: ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
- [19] Kulikov A.L., Anan'ev V.V., Vukolov V.Y., Platonov P.S., Lachugin V.F. Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 49. No. 5. P. 378-385. DOI: 10.1007/s10749-016-0632-8
- [20] Воропай Н.И. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.
- [21] Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: ЛЕНАНД, 2016. – 194 с.
- [22] Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений. С.-Пб.: Лань, 2001. – 384 с.

References

- [1] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 30, 2023 no. 1095 “Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2024 – 2029 gody [On approval of the scheme and program for the development of electric power systems of Russia for 2024–2029]”, *Official website*

- of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Ministry of Energy of Russia) [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/> (in Russian).
- [2] V.Yu. Vukolov, A.A. Kolesnikov, S.E. Kocherov and B.V. Papkov, "Upravlenie konfiguraciej raspreditel'nyh elektricheskikh setej 6-35 kV po kriteriyu nadyozhnosti [Configuration management of 6-35 kV distribution electric networks by reliability criterion]", in *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [Methodological issues of reliability research of large energy systems]*, N.I. Voropai, Irkutsk, 2018, pp. 89-98 (in Russian).
- [3] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Optimization of the load shedding of active consumers through the use of the reserves of their production systems", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 35-45, 2018.
- [4] V.A. Petrova and A.A. Petrov, "On probable starting failure of mini-CHP for reliability assurance", *Energy Safety and Energy Economy*, no. 4, pp. 48-56, 2018. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-4-48-56
- [5] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, I.A. Lyubchenko and A.V. Cherepanov, *Uluchshenie kachestva ehlektroehnergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznikh dorog [Improving the quality of electricity in the power supply systems of non-traction railway consumers]*. Moscow, Berlin: DirectMedia, 2020 (in Russian).
- [6] Yu.B. Guk, *Teoriya nadozhnosti v elektroenergetike [Reliability theory in the electric power industry]*. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otd., 1990 (in Russian).
- [7] V. I. Edelman, *Nadezhnost tehnikeskikh sistem: ekonomicheskaya otsenka [Reliability of technical systems: an economic assessment]*. Moscow: Ekonomika, 1988 (in Russian).
- [8] V.L. Pruus and V.V. Tislenko, *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh elektricheskikh setej [Improving the reliability of rural electric networks]*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otделение, 1989 (in Russian).
- [9] G.B. Huseynov, *Reytingovaya otsenka i regulirovanie deyatel'nosti raspreditel'nykh elektricheskikh setey v usloviyakh nechetkosti [Rating assessment and regulation of electric distribution networks in conditions of fuzziness]*. Lviv: Lvivska politekhnika, 2006 (in Russian).
- [10] I.V. Zhezhlenko and Yu.L. Saenko, *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
- [11] F.H. Guan, D.M. Zhao, X. Zhang, B.T. Shan and Z. Liu, "Research on distributed generation technologies and its impacts on power system", in *proc. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Apr. 06-07, 2009, Nanjing, China. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241
- [12] E. Keogh, S. Chu, D. Hart and M. Pazzani, "An online algorithm for segmenting time series", in *proc. Proceedings 2001 IEEE International Conference on Data Mining*, Nov. 29 – Dec. 02, 2001, San Jose, CA, USA. DOI: 10.1109/ICDM.2001.989531
- [13] D.C. Montgomery and G.C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [14] T.J. Overbye and R.P. Klump, Effective calculation of power system low-voltage solutions, in *proc. IEEE PES Winter Power Meeting*, 1995.
- [15] A.G. Phadke and J.S. Thorp, *Computer relaying for power systems*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2009.

- [16] R.J. Povinelli, "Time Series Data Mining: Identifying temporal Patterns for Characterization and Prediction of Time Series Events", Ph. D thesis, Marquette University, Milwaukee, Wsconsin, 1999.
- [17] V.Yu. Vukolov, A.L. Kulikov and B.V. Papkov, "Povyshenie jeffektivnosti peredachi jelektroenergii v raspredelitel'nyh setjah. Ch. 1 [Improving the efficiency of power transmission in distribution networks. Part1]", *Bibliotekha Elektrotehnika [Electrical Engineering Library]*. 2013.No.11 (in Russian).
- [18] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. Moscow: Energoservis, 2007 (in Russian).
- [19] A.L. Kulikov, V.V. Anan'ev, V.Y. Vukolov, P.S. Platonov and V.F. Lachugin, "Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location", *Power Technology and Engineering*, vol. 49, no. 5, pp. 378-385, Jan. 2016. DOI: 10.1007/s10749-016-0632-8
- [20] N.I. Voropai et al., *Obosnovanie razvitiya ehlektroehnergeticheskikh sistem: Metodologiya, modeli, metody, ikh ispol'zovanie [Justification of the development of electric power systems: Methodology, models, methods, their use]*. Novosibirsk: Nauka, 2015 (in Russian).
- [21] V.V. Podinovskiy and V.M. Gavrilov, *Optimizatsiya po posledovatel'no primenyayemykh kriteriyam [Optimization according to consistently applied criteria]*. M.: LE-NAND, 2016 (in Russian).
- [22] I.G. Chernorutskiy, *Metody optimizatsii i prinyatiya reshenij [Optimization and decision-making methods]*. Saint Petersburg: Lan, 2001 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Юрьевич Вуколов, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir Y. Vukolov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Иван Викторович Жаринов, кандидат технических наук, доцент Дзержинского политехнического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Дзержинск, Российская Федерация.

Ivan V. Zharinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Dzerzhinsky Polytechnic Institute (branch) «Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev», Dzerzhinsk, Russian Federation.

УДК 621.355:621.311.236

EDN WUENUY

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО БУФЕРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ И БЛОКОВ СУПЕРКОНДЕСАТОРОВ В АСИНХРОННОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

О.С. Хватов

ORCID: 0009-0007-0345-7523 e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Д.К. Марков

ORCID:0009-0002-7702-9541 e-mail: markov0priz@gmail.com

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Т.З. Билялетдинов

ORCID:0009-0009-6526-1598 e-mail: tim.bil.99@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена перспектива использования асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в генераторных комплексах, особенно в малой энергетике. В настоящее время недостаточно изучены асинхронные дизель-генераторные электростанции, работающие при переменной частоте вращения (ДГПЧВ), и их интеграции с гибридными системами хранения энергии (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). Предложена структурная схема асинхронной ДГПЧВ с тремя контурами автоматического регулирования: механической мощности ДГПЧВ, частоты вращения ДГПЧВ и напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты. Описано назначение и состав каждого контура, а также роль гибридного накопителя энергии в стабилизации напряжения и обеспечении электроэнергией при различных режимах работы ДГПЧВ. Приведена имитационная модель асинхронной ДГПЧВ, созданная в *Matlab Simulink*, включающая в себя буферный накопитель электрической энергии (БНЭ). Выполнен имитационный эксперимент процессов заряда и разряда БНЭ при изменении нагрузки.

Ключевые слова: аккумулятор, гибридная система хранения электроэнергии, дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения, контур постоянного тока, суперконденсатор.

Для цитирования: Хватов О.С., Марков Д.К., Билялетдинов Т.З. Использование гибридного буферного накопителя электрической энергии на основе аккумуляторных батарей и блоков суперконденсаторов в асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 22-37. EDN WUENUY

UTILIZATION OF HYBRID BUFFER ENERGY STORAGE BASED ON BATTERIES AND SUPERCAPACITORS IN ASYNCHRONOUS VARIABLE-SPEED DIESEL-GENERATOR POWER PLANT

O.S. Khvatov

ORCID: 0009-0007-0345-7523 e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

D.K. Markov

ORCID:0009-0002-7702-9541 e-mail: markov0priz@gmail.com

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

T.Z. Bilyaletdinov

ORCID:0009-0009-6526-1598 e-mail: tim.bil.99@mail.ru

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

The paper considers the prospects of using asynchronous machines with a squirrel-cage rotor in generator complexes, especially in small-scale distributed generation. Currently, asynchronous diesel-generator power plants operating at variable rotational speeds (variable-speed diesel-generator sets – VSDG), and their integration with hybrid energy storage systems (batteries and supercapacitors) are insufficiently studied. A structural diagram of an asynchronous VSDG with three automatic control loops is proposed: VSDG mechanical power, VSDG rotational speed and voltage in the DC link of the frequency converter. The purpose and composition of each loop are described, as well as the role of the hybrid energy storage in stabilizing voltage and providing electrical energy under various VSDG operating modes. A Matlab Simulink simulation model of the asynchronous VSDG including a buffer energy storage (BES) is presented. A simulation experiment of the BES charging and discharging processes during load changes was performed.

Keywords: battery, hybrid energy storage system, variable-speed diesel-generator power plant, DC link, supercapacitor.

For citation: O.S. Khvatov, D.K. Markov and T.Z. Bilyaletdinov, “Utilization of hybrid buffer energy storage based on batteries and supercapacitors in asynchronous variable-speed diesel-generator power plant”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 22-37, 2025. EDN WUENUY

I. Введение

В генераторных комплексах, особенно в малой энергетике, все больше внимания привлекают асинхронные машины с короткозамкнутым ротором. Тем не менее, асинхронные дизель-генераторные электростанции, в том числе, работающие при переменной частоте вращения (ДГПЧВ), остаются недостаточно исследованными в научной литературе. Особенно перспективным, но пока малоизученным направлением, является интеграция таких ДГПЧВ с комбинированными системами хранения энергии, состоящими из аккумуляторных батарей и блоков суперконденсаторов, для обеспечения более стабильной и эффективной генерации, хранения и использования электрической энергии [1].

II. Структурная схема асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения

В качестве ДГПЧВ предложен вариант асинхронной ДГПЧВ, структурная схема которой представлена на рис. 1.

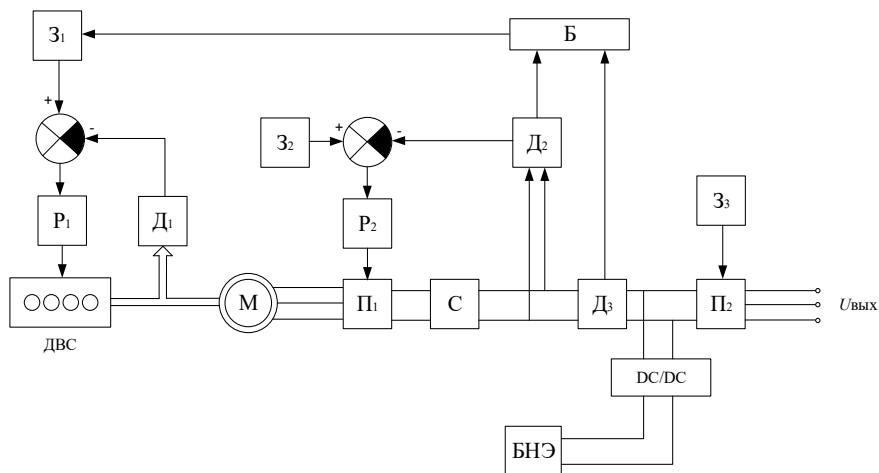


Рис. 1. Структурная схема асинхронной ДГПЧВ

Fig. 1. Block diagram of an asynchronous VSDG

На схеме можно выделить три контура:

- 1) автоматизированная система управления мощностью двигателя внутреннего сгорания (ДВС) посредством регулирования топливной смеси;
- 2) система стабилизации оборотов ДВС для максимального КПД электростанции;
- 3) система поддержания постоянного напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты (звено постоянного тока, ЗПТ).

Система управления выходной мощностью ДВС состоит из:

- устройства для измерения напряжения (D_2) и тока (D_3);
- измерителя мощности (B);
- устройства определения энергоэффективной частоты вращения

ДВС (3_1);

- устройства управления частотой вращения (P_1).

Система поддержания заданной скорости вращения ДВС состоит из:

- датчика оборотов дизельного двигателя (D_1);
- устройства управления частотой вращения (P_1).

Система поддержания постоянного напряжения на ЗПТ состоит из:

- датчика напряжения на шине постоянного тока (D_2);
- устройства регулирования напряжения (P_2);
- устройства задания напряжения на шине постоянного тока (3_2).

Преобразователь частоты включает в себя активный выпрямитель напряжения ($П_1$) и автономный инвертор напряжения ($П_2$). Активный выпрямитель, дополненный входными дросселями (не показаны на рис. 1) и конденсаторной батареей (C), обеспечивает возбуждение асинхронного генератора и поддержку напряжения постоянного тока в заданных пределах. Система использует гибридный накопитель энергии (БНЭ) – сочетание литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) и суперконденсаторов. При пиковых нагрузках блок суперконденсаторов поддерживает напряжение в заданных пределах в звене постоянного тока преобразователя частоты. При малой загрузке ДВС, когда мощность не превышает 25 % от номинала, режим работы ДВС на пониженных оборотах технологически нецелесообразен, в этом случае, функцию энергетического источника может выполнять ЛИАБ [2].

III. Математическое описание элементов силового оборудования

Математическая (динамическая) модель ДВС с турбонаддувом может быть представлена системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{a\mu}) y_0 &= k_1 y_n - \mu; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_{\tau} y_0 - y_n; \\ y_n (T_{\kappa} p + \delta_{\kappa}) &= y_{\tau} - k_{\kappa} y_0; \\ (T_{ax} p + \delta_{ax}) y_0 &= x_0 + k_{ax} y_n; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_{\tau} x_0 + k_{\tau} y_0 - y_n; \\ k_q q_{\kappa} &= x_0 + \theta_{\phi} y_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Математическое описание асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором в системе синхронно вращающихся координат $X\dot{Y}$:

$$\left. \begin{aligned} u_{SX} &= R_S i_{SX} + \frac{d\psi_{SX}}{dt} - \omega_1 \psi_{SY}; \\ u_{SY} &= R_S i_{SY} + \frac{d\psi_{SY}}{dt} + \omega_1 \psi_{SX}; \\ 0 &= R_R i_{RX} + \frac{d\psi_{RX}}{dt}; \\ 0 &= R_R i_{RX} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX}; \\ \psi_{SX} &= L_S i_{SX} + L_m i_{RX}; \\ \psi_{SY} &= L_S i_{SY} + L_m i_{RY}; \\ \psi_{RX} &= L_m i_{SX} + L_R i_{RX}; \\ 0 &= L_m i_{SY} + L_R i_{RY}. \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Уравнение нагрузки в сети:

$$U_1 = R_H I_H + L_H \frac{dI_H}{dt}. \quad (3)$$

Обозначения в (1)–(3) являются общепринятыми в теории двигателей внутреннего сгорания [3] и электрических машин [4] и в тексте статьи не приводятся.

IV. Анализ ключевых энергетических параметров гибридного накопителя электроэнергии

Работоспособность ЛИАБ определяется ее эффективной энергией – гарантированно отдаваемым объемом энергии на постоянную нагрузку $R_{п.н.}$ при заданном напряжении [5]:

$$\Delta U_{a.б.} = U_{\max.a.б.} - U_{\min.a.б.}, \quad (4)$$

где $\Delta U_{a.б.}$ – диапазон допустимых напряжений ЛИАБ; $U_{\max.a.б.}$ – максимальное допустимое напряжение ЛИАБ; $U_{\min.a.б.}$ – минимальное допустимое напряжение ЛИАБ.

При допущении о $R_{\text{внутр.}} \ll R_{п.н.}$ (что справедливо для ЛИАБ) минимальный запас энергии ($W_{\min.a.б.}$) при разряде на постоянную нагрузку $R_{п.н.}$ ($R_{п.н.} \approx \text{const}$) до $U_{\min.a.б.}$ за время τ вычисляется следующим образом:

$$W_{\min.a.б.} = \frac{\tau \cdot U_{\min.a.б.}^2}{R_{п.н.}}. \quad (5)$$

Следующая формула рассчитывает максимальный теоретически возможный объем энергии ($W_{\text{мах.а.б.}}$), отдаваемый ЛИАБ на постоянную нагрузку $R_{\text{п.н.}}$ за время τ при ограничении напряжения $U_{\text{мах.а.б.}}$:

$$W_{\text{мах.а.б.}} = \frac{\tau \cdot U_{\text{мах.а.б.}}^2}{R_{\text{п.н.}}} \quad (6)$$

Чтобы определить среднее потребление энергии постоянной нагрузкой в допустимом диапазоне напряжений ($W_{\text{ср.эф.а.б.}}$), используется формула, полученная на основе (5) и (6):

$$W_{\text{ср.эф.а.б.}} = \frac{\tau \cdot (U_{\text{мах.а.б.}}^2 + U_{\text{мин.а.б.}}^2)}{2R_{\text{п.н.}}} \quad (7)$$

Емкость – важнейшая характеристика суперконденсатора. При использовании централизованной системы суперконденсаторов накопленная в ней энергия должна быть достаточной для покрытия всех пиковых нагрузок дизель-генераторной электростанции с переменной частотой вращения (ДГПЧВ) в течение импульса [6]. Предполагаемые границы изменения напряжения при разряде данной системы суперконденсаторов составляют:

$$\Delta U_{\text{б.с.к.}} = U_{\text{мах.б.с.к.}} - U_{\text{мин.б.с.к.}}, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\text{б.с.к.}}$ – диапазон допустимых напряжений блока суперконденсаторов (БСК); $U_{\text{мах.б.с.к.}}$ – максимальное допустимое напряжение БСК; $U_{\text{мин.б.с.к.}}$ – минимальное допустимое напряжение БСК.

Если не использовать дополнительные устройства стабилизации выходного напряжения блока суперконденсаторов, необходимо увеличивать интервал допустимых напряжений по верхнему пределу, поэтому его целесообразно проектировать с условием $U_{\text{мах.б.с.к.}} > U_{\text{мах.а.б.}}$. Увеличение $U_{\text{мах.б.с.к.}}$ позволит суперконденсаторному блоку увеличить время автономной работы ДГПЧВ [7].

Для питания импульсной нагрузки ДГПЧВ ($R_{\text{имп.н.}}$) необходимо выдать n последовательных импульсов длительностью τ , разделенных интервалом T . В случае, когда интервал между импульсами пренебрежимо мал ($T \approx 0$), средняя эффективная энергия, запасаемая в блоке суперконденсаторов ($W_{\text{ср.эф.б.с.к.}}$), может быть приблизительно оценена следующим образом:

$$W_{\text{ср.эф.б.с.к.}} = \frac{n \cdot \tau \cdot (U_{\text{мах.б.с.к.}}^2 + U_{\text{мин.б.с.к.}}^2)}{2 \cdot (R_{\text{имп.н.}} + R_{\text{п.н.}})} \quad (9)$$

где $R_{\text{имп.н}}$ – сопротивление импульсной нагрузки; $R_{\text{п.н}}$ – сопротивление постоянной нагрузки.

Условие $T \approx 0$ представляет собой наихудший сценарий нагрузки для блока суперконденсаторов. Однако это упрощает процесс проектирования, поскольку позволяет игнорировать релаксационные эффекты между импульсами, реально наблюдаемые в блоке суперконденсаторов [8].

Поведение блока суперконденсаторов представляет серию из n импульсов как один импульс длительностью tn . Количество последовательных ячеек (k) зависит от характеристик нагрузки ДГПЧВ. Расчет энергии блока из k ячеек требует учета следующих факторов:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{б.с.к.}} &= C_i / k \\ U_{\text{общ.б.с.к.}} &= kU_{\text{с.к.}} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $C_{\text{б.с.к.}}$ – общая емкость БСК; $U_{\text{б.с.к.}}$ – общее напряжение БСК; C_i и $U_{\text{с.к.}}$ – характеристики емкости и максимально допустимого (для работы) напряжения одной ячейки суперконденсатора.

Необходимое количество параллельных ветвей суперконденсаторов определяется максимальным разрядным током ячейки и вычисляется по формуле:

$$П = \frac{I_{\text{max.б.с.к.}}}{I_{\text{max.Ci}}}. \quad (11)$$

Для расчета используются следующие параметры: $П$ (число параллельных ветвей, округленное до большего целого), каждая из которых содержит k последовательных суперконденсаторов; максимальный ток блока суперконденсаторов ($I_{\text{max.б.с.к.}}$); максимальный ток одной ячейки ($I_{\text{max.Ci}}$). Эффективная емкость блока $C_{\text{эф.б.с.к.}}$, рассчитанная по (9), равна:

$$C_{\text{эф.б.с.к.}} = \frac{W_{\text{ср.эф.б.с.к.}}}{U_{\text{max.б.с.к.}}^2 + U_{\text{min.б.с.к.}}^2} = \frac{\tau n}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{\text{п.н}})}. \quad (12)$$

Благодаря наличию индуктивности и емкости в кабельной сети ДГПЧВ, скачки напряжения при коммутациях отсутствуют [9]. В связи с этим, в теоретических расчетах пренебрегли завалами фронтов импульса длительностью tn . Температурные эффекты ЛИАБ и суперконденсаторов не учитывались.

V. Расчет буферной системы накопления энергии.

Учитывая технологические ограничения, связанные с эксплуатацией двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на частичных нагрузках (не более 25 % от номинальной мощности P_n), определим требуемую энергоемкость буферного накопителя энергии (БНЭ). Этот блок должен обеспечивать электроснабжение потребителей в указанном диапазоне нагрузок в течение заданного интервала времени, например, одного часа [10].

Для расчета характеристик БНЭ приведем паспортные данные асинхронного двигателя (в табл. 1 приведены только некоторые из них).

Таблица 1.
Паспортные данные двигателя

Table 1.
Engine passport data

Номинальная мощность, P_n	Номинальная частота вращения, n_n	Число пар полюсов, p	Перегрузочная способность двигателя, λ	Кратность пускового момента, $\lambda_{пуск}$
37000 Вт	1480 об/мин	2	2,2	1,8

Эффективная энергия БНЭ за указанный временной интервал (Вт·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = 0,25 \cdot P_n \cdot n_{\text{часов}} = 0,25 \cdot 37000 \cdot 1 = 9250. \quad (13)$$

С учетом потерь энергии в инверторе (сетевой блок преобразователя частоты P_2 , (рис. 1), энергоемкость БНЭ составит (Вт·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = \frac{W_{\text{БНЭ}}}{0,98} = \frac{9250}{0,98} = 9714. \quad (14)$$

Емкость БНЭ ($C_{\text{БНЭ}}$) предварительно определяем с учетом требования по поддержанию значения напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты $U_d = 700\text{В}$ (рис. 1) (А·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = U_d \cdot I_{\text{БНЭ}} \cdot t \Rightarrow C_{\text{БНЭ}} = I_{\text{БНЭ}} \cdot t = \frac{W_{\text{БНЭ}}}{U_d} = \frac{9714}{700} \approx 13,87. \quad (15)$$

С целью поддержания срока службы аккумуляторной составляющей БНЭ рекомендуется поддерживать его заряд в диапазоне от 10 до 90 %. С учетом этого, расчетная емкость БНЭ ($C_{\text{БНЭр}}$) (А·ч):

$$C_{\text{БНЭр}} = C_{\text{БНЭ}} / 0,8 = 13,87 / 0,8 = 17,3. \quad (16)$$

VI. Имитационный эксперимент буферного накопителя электрической энергии

На основе структурной схемы асинхронной ДППЧВ (рис. 1) в среде *Matlab Simulink* была создана математическая имитационная модель (рис. 2) [11].

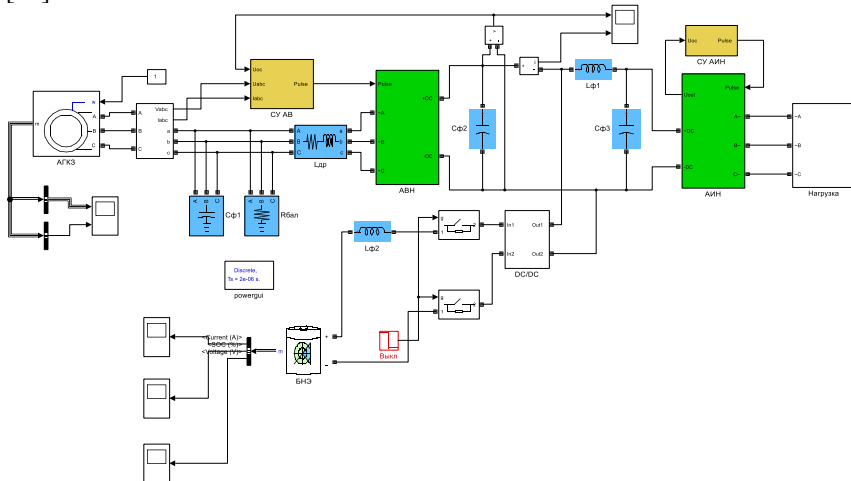


Рис. 2. Математическая имитационная модель ДППЧВ

Fig. 2. Mathematical simulation model of VSDG

Данная модель использовалась для симуляции процессов заряда и разряда буферного накопителя энергии (БНЭ). В начале моделирования БНЭ полностью заряжен и совместно с генератором обеспечивает питание нагрузки, соизмеримой с мощностью генератора. Затем, при увеличении мощности нагрузки на выходе инвертора в 1,5 раза, мощности генератора становится недостаточно, и БНЭ начинает разряжаться. Впоследствии мощность нагрузки снижается до уровня ниже номинальной мощности генератора. В результате избыточная мощность генератора используется для заряда БНЭ.

В модели *Matlab Simulink* имитация выполнялась в следующем порядке.

1. Начальное состояние: нагрузка отключена.
2. В момент времени 1,5 с. подключается номинальная нагрузка (соответствующая номинальной мощности генератора) мощностью 37 кВт.
3. В момент времени 2 с. мощность нагрузки увеличивается выше номинальной до 55 кВт.

4. В момент времени 3,5 с. мощность нагрузки уменьшается ниже номинальной до 20 кВт.

Matlab Simulink позволяет визуализировать графики мгновенных значений тока, заряда и напряжения БНЭ. Особое внимание уделялось анализу графиков тока и заряда, поскольку они позволяют однозначно определить протекающие процессы. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Их анализ показывает, что на первом этапе БНЭ разряжается, о чем свидетельствует положительное значение тока. Увеличение мощности нагрузки до 55 кВт приводит к ускорению процесса разряда. Снижение нагрузки до 20 кВт вызывает переход БНЭ в режим заряда, что отражается в отрицательном значении тока. Таким образом, при повышенной нагрузке БНЭ отдает энергию, а при наличии избыточной мощности генератора происходит его заряд [11].

DC-DC преобразователь управляет потоком электрической энергии между накопителем и шиной постоянного тока. Он может работать как в понижающем (заряд аккумулятора и/или суперконденсатора), так и в повышающем (передача энергии от накопителя в электрическую сеть) режимах. Управление потоком энергии между накопителем и сетью осуществляется с помощью полупроводникового моста, изменяющего рабочий цикл D .

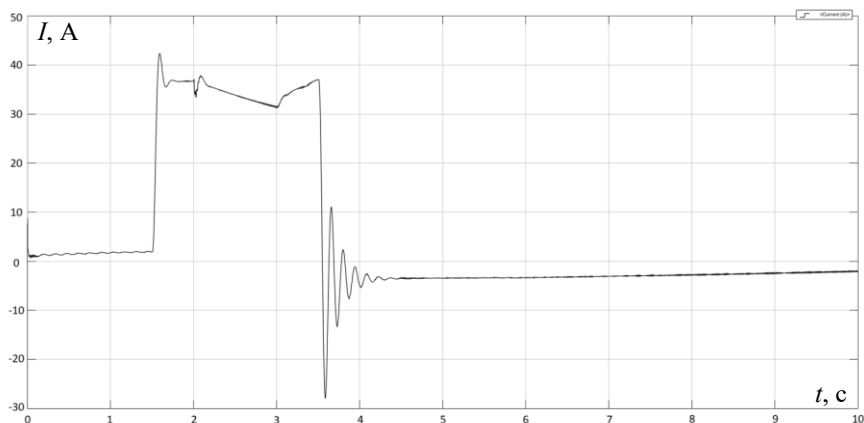


Рис. 3. Диаграмма изменения тока БНЭ

Fig. 3. Diagram of the BES current variation

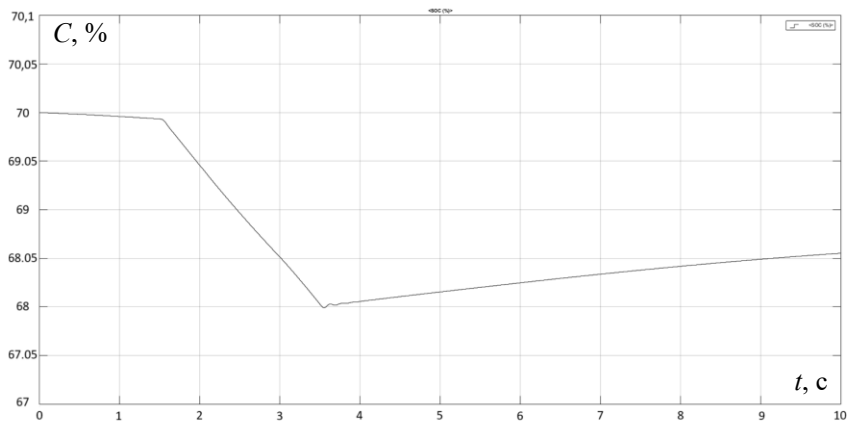


Рис. 4. Диаграмма изменения уровня заряда БНЭ

Fig. 4. Diagram of the BES state of charge variation

В режиме, когда необходимо понизить напряжение (рис. 5а), энергия передается из судовой сети в блок суперконденсаторов:

$$\frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{сети}}} = D_1, \quad (17)$$

где $U_{\text{ск}}$ – рабочее напряжение БСК; $U_{\text{сети}}$ – сетевое напряжение; D_1 – представляет собой рабочий цикл в понижающем режиме.

В режиме, когда необходимо повысить напряжение (рис. 5б), блок суперконденсаторов играет роль дополнительного источника энергии, что позволяет снизить нагрузку на основные источники, в частности на аккумуляторную батарею. Коэффициент повышения напряжения определяется следующим выражением:

$$\frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{сети}}} = \frac{1}{1 - D_2}, \quad (18)$$

где D_2 – рабочий цикл в усиливающем режиме.

Поскольку в процессе эксплуатации часто возникают ситуации, когда ДППЧВ требуется кратковременно выдавать мощность, превышающую номинальную мощность генератора, в среде *Matlab Simulink* был проведен дополнительный эксперимент для оценки возможности работы ДППЧВ с двукратной перегрузкой по мощности.

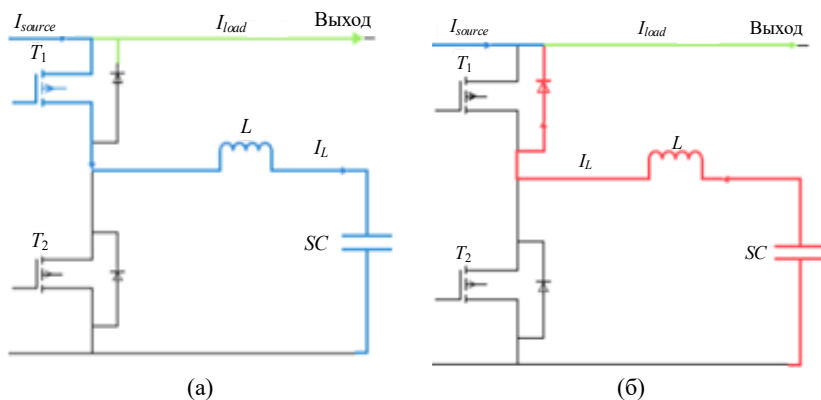


Рис. 5. Режимы преобразователя:
понижающего (а); повышающего (б)

Fig. 5. Modes:
buck converter (a); boost converter (б)

Эксперимент заключался в следующем: модель изначально работала с нагрузкой, соответствующей номинальной мощности генератора (37 кВт). Затем на 3 сек была подключена нагрузка, вдвое превышающая номинальную (74 кВт, после чего она была возвращена к исходному номинальному значению. Результаты моделирования с перегрузкой представлены на рис. 6 и 7. Исходя данных рис. 7, видно, что модель ДППЧВ с БНЭ в ЗПТ обеспечивает работу при перегрузке по мощности.

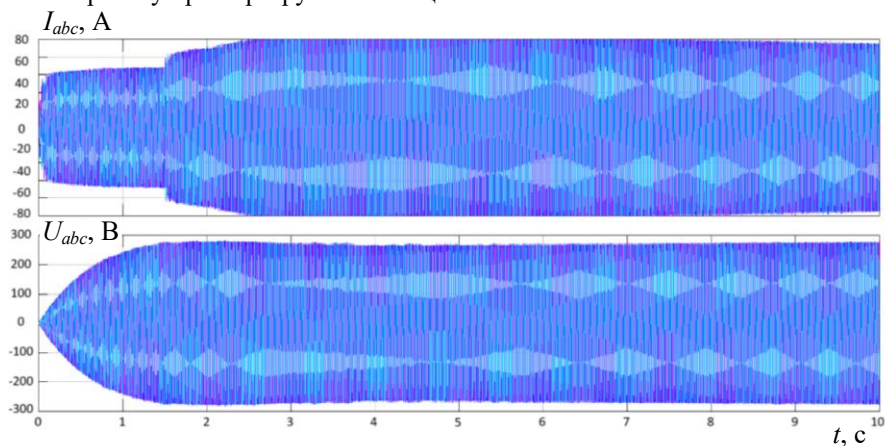


Рис. 6. Мгновенные значения тока и напряжения статора

Fig. 6. Instantaneous values of stator current and voltage

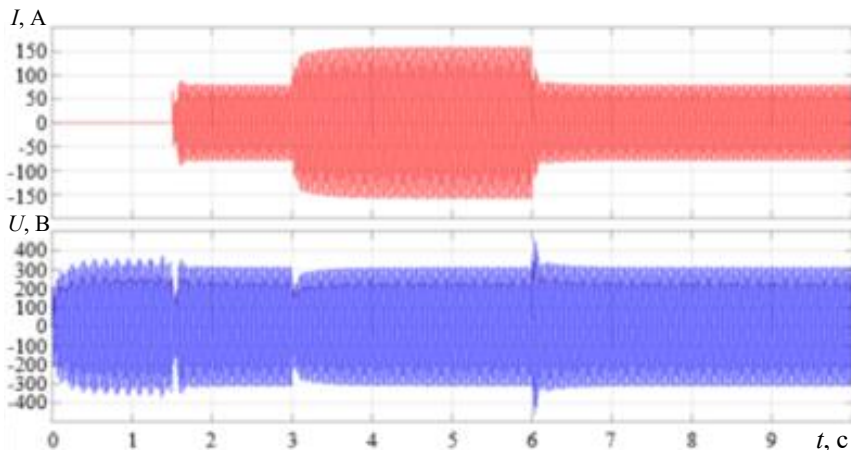


Рис. 7. Мгновенные значения тока и напряжение на выходе инвертора

Fig. 7. Instantaneous current and voltage values at the inverter output

VII. Заключение

Учитывая результаты моделирования, можно сделать вывод о высоком потенциале использования асинхронных ДГПЧВ с гибридными накопителями энергии для повышения эффективности и стабильности электроснабжения, особенно в системах малой энергетики.

Разделение нагрузки между ДВС и БНЭ в ДГПЧВ осуществляется системой управления, которая стремится поддерживать стабильную частоту вращения ДВС и напряжение в звене постоянного тока. БНЭ играет роль стабилизатора мощности, компенсируя пиковые нагрузки и обеспечивая возможность работы системы в широком диапазоне нагрузок, включая перегрузки. Логика управления опирается на ограничение по минимальной нагрузке ДВС и необходимость поддержания заряда БНЭ в оптимальном диапазоне.

Предложенная структура, математические модели и результаты имитационного моделирования являются важным шагом на пути к созданию реальных систем подобного типа. Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию параметров системы, разработку более совершенных алгоритмов управления и проведение экспериментальных исследований.

© Хватов О.С., 2025

© Марков Д.К., 2025

© Билялетдинов Т.З., 2025

Поступила в редакцию 13.05.2025

Принята к публикации 08.07.2025

Received 13.05.2025

Accepted 08.07.2025

Библиографический список

- [1] Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник, 2019. Т. 23. № 4. С. 39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48
- [2] Григорьев А.В., Малышев С.М., Зайнуллин Р.Р. Опыт проектирования и испытаний первого отечественного судового вентильного дизель-генератора // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота имени Адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 766-775. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] Виноградов А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности // XI межд. (XXII всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2020, Окт. 04-07, 2020, Санкт-Петербург, Россия: ИТМО, 2020. С. 80-86.
- [4] Виноградов А.Б. Горелкин Р.О. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета. 2023. № 3. С. 43-51. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] Taoufik M., Lassad S. Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2017. № 4 (3). P. 377-386. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] Reddy S.R.K., Subrahmanyam J.B.V., Reddy A.S. Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller // Asian Journal for Convergence in Technology (AJCT). 2023. № 9 (3). P. 71-81. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Sun Y., Hu J., Li C. Research on power generation control of asynchronous machine as main generator // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2020. № 21 (2). 20190059. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] Khamis A.A.H., Ahmed-Zaid S. Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications // proc. 2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC), Oct. 29-31, 2021, Hammamet, Tunisia: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] Хватов О.С., Кобяков Д.С. Асинхронные дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3 (19). С. 19-31. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19
- [10] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Поляков И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения. Н. Новгород: НГТУ, 2016. – 172 с.
- [11] Хватов О.С., Гарпанов И.А., Билялетдинов Т.З. Автономная дизель-генераторная электростанция на основе асинхронного генератора с вентильным возбуждением и системой автоматического регулирования напряжения с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 19-31.

References

- [1] G.V. Noskin, E.S. Khavanov and R.A. Beschastnyy, "Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of earth return spacecraft", *Forestry Bulletin*, vol. 23, no. 4, pp. 39-48, 2019. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48
- [2] A.V. Grigoriev, S.M. Malyshev and R.R. Zainullin, "Experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator", *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 11, no. 4, pp. 766-775, 2019. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] A.B. Vinogradov, "Avtonomnaya stanciya elektrosnabzheniya na osnove asinhronnogo generatora s KZ rotorom i preobrazovatelya chastoty ponizhennoj moshchnosti [Autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a squirrel-cage rotor and a low-power frequency converter]", in proc. *XI Int. (XXII All-Russ.) conf. "Avtomatizirovannyi elektropriwod AEP 2020 [Automated Electric Drive AED 2020]"*, Oct. 04-07, 2020, St. Petersburg, Russia, pp. 80-86 (in Russian).
- [4] A.B. Vinogradov and R.O. Gorelkin, "Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter", *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 3, pp. 43-51, 2023. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] M. Taufiq and S. Lassad, "Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 377-386, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] S.R.K. Reddy, J.B.V. Subrahmanyam and A.S. Reddy, "Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller", *Asian Journal for Convergence in Technology (AJCT)*, vol. 9, no. 3, pp. 71-81, 2023. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Y. Sun, J. Hu and C. Li, "Research on power generation control of asynchronous machine as main generator", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 21, no. 2, 20190059, Mar. 2020. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] A.A.H. Khamis and S. Ahmed-Zaid, "Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications", in proc. *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Oct. 29-31, Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] O.S. Khvatov and D.S. Kobayakov, "Asynchronous diesel generator sets with variable speed", *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 19, pp. 19-31, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19
- [10] O.S. Khvatov, A.B. Darienkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Avtonomnye generatorynye ustanovki na osnove dvigatelej vnutrennego sgoraniya peremennoj chastoty vrashcheniya [Autonomous generator sets based on variable-speed internal combustion engines]*. N. Novgorod: NNSTU, 2016 (in Russian).
- [11] O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and T.Z. Bilyaletdinov, "Stand alonediesel generator power plant based on asynchronous generator with valve excitation and automatic voltage control system with vector control", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 19-31, 2024.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Хватов Олег Станиславович, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg S. Khvatov, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Марков Дмитрий Константинович, аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry K. Markov, postgraduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Билиaletдинов Тимур Закарияевич, аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Timur Z. Bilyaletdinov, postgraduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 681.518.5:629.423

EDN CCTDNX

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА – МЕТОДЫ, ПРИМЕРЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е.Л. РыжоваORCID: 0000-0001-7984-255 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

Обосновывается важность развития автоматизированных систем диагностики для повышения эффективности и надежности работы электроподвижного состава (ЭПС), а также для перехода к более совершенным системам управления, основанным на прогнозировании технического состояния. Проведен анализ информационных систем контроля технического состояния ЭПС, необходимых для повышения надежности и эффективности его эксплуатации в условиях изменяющегося перевозочного процесса. В качестве развития направления исследования предлагается сравнительный анализ существующих и инновационных методов автоматизированной диагностики, их преимущества и недостатки при определении параметров и характеристик оборудования ЭПС. Показана возможность применения различных перспективных инновационных автоматизированных систем диагностирования с использованием информационных технологий для оценки реального состояния ЭПС. Переход к предиктивному управлению режимами работы ЭПС и энергетической инфраструктуры железных дорог позволит оптимизировать использование силы тяги, рекуперативного торможения и соблюдение графиков движения поездов. Обосновывается необходимость объединения интеллектуальных, технологических и технических ресурсов для создания единой системы сбора и получения объективной информации для всех уровней диагностики. Сочетание различных способов контроля и идентификации обеспечит полноту и достоверность информации о подвижном составе, улучшит информационно-управляющие системы за счет уменьшения влияния «человеческого фактора» с последующим переходом к «прогнозным» системам диагностирования.

Ключевые слова: автоматизированные системы диагностирования, большие данные, железнодорожный транспорт, интеллектуальные технологии, интернет вещей, информационные системы, надежность, нейронные сети, предиктивная аналитика, прескриптивная система диагностирования, сквозные цифровые технологии, техническое обслуживание и ремонт, электроподвижной состав.

Для цитирования: Рыжова Е.Л. Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава – методы,

примеры их реализации, перспективы развития // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 38-60. EDN CCTDNX

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGY IN DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR ELECTRIC ROLLING STOCK EQUIPMENT – METHODS, EXAMPLES OF IMPLEMENTATION, DEVELOPMENT PROSPECTS

E.L. Ryzhova

ORCID: 0000-0001-7984-2555 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article emphasizes the importance of developing automated diagnostic systems to improve the efficiency and reliability of electric rolling stock, as well as to transition to more advanced control systems based on predicting the technical condition. An analysis of the information systems for monitoring the technical condition of electric rolling stock was carried out, which are necessary to enhance the reliability and efficiency of its operation in a changing transportation environment. As a development of the research area, a comparative analysis of existing and innovative methods of automated diagnostics, their advantages and disadvantages in determining the parameters and characteristics of electric rolling stock equipment is proposed. The article demonstrates the possibility of using various promising innovative automated diagnostic systems based on information technologies to assess the real condition of electric rolling stock. The transition to predictive control of the operation modes of rolling stock and energy infrastructure of railways will optimize the use of traction force, regenerative braking and compliance with train schedules. The necessity of combining intelligent, technological and technical resources to create a unified system for collecting and obtaining objective information for all levels of diagnostics is substantiated. The combination of various methods of control and identification will ensure the completeness and reliability of information about rolling stock, improve information and control systems by reducing the influence of the “human factor” with the subsequent transition to predictive diagnostic systems.

Keywords: automated diagnostic systems, big data, railway transport, intelligent technologies, Internet of Things, information systems, reliability, neural networks, predictive analytics, prescriptive diagnostic system, end-to-end digital technologies, maintenance and repair, electric rolling stock.

For citation: E.L. Ryzhova, “Application of information technology in diagnostic systems for electric rolling stock equipment – methods, examples of implementation, development prospects”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 38-60, 2025. EDN CCTDNX

I. Введение

В процессе эксплуатации техническое состояние электропоезда ухудшается из-за износа деталей и механизмов, поломок и других факторов.

Это приводит к снижению ресурса надежности, заложенного при проектировании. Следствием являются отказы, аварии, нарушение графика движения поездов и перерасход энергии или топлива. Основная задача научно-технического развития ОАО «РЖД» – предупреждение этих явлений и обеспечение безопасности движения. Одной из ключевых целей является снижение энергоемкости перевозок, необходимость регулярной и эффективной технической диагностики, обслуживания электропоездов для поддержания их в исправном состоянии, обеспечения безопасности движения и снижения эксплуатационных затрат. Это является актуальным и требует теоретических и экспериментальных исследований.

Для решения данной задачи необходимы разработка и внедрение интеллектуальных предикативных и аналитических систем, построение которых выдвигает строгие требования к уровню цифровизации железнодорожного комплекса. Целью исследования является определение методов и технологий цифровой диагностики состояния поезда на основе анализа данных, получаемых с различных датчиков контроля состояния электроподвижного состава (ЭПС). На сегодняшний день существующий ручной контроль состояния поездов подвержен человеческим ошибкам. В рамках цифровой трансформации необходима устойчивая работа и совершенствование автоматизированных систем диагностики (СД). Использование современных мобильных, стационарных и встроенных средств контроля и передачи информации в диагностические центры минимизирует влияние человеческого фактора [1]. Для успешной автоматизации необходимы актуализация нормативной базы, повышение квалификации персонала и внедрение инновационных информационных технологий. Использование автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) состояния поездов и переход от планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к обслуживанию по фактическому состоянию, основанному на данных, полученных от этих систем, позволяет осуществлять прогнозирование технического состояния оборудования, повысить безопасность и эффективности контроля состояния ЭПС, сократить затраты на обслуживание и ремонт [2].

II. Объект и методика

Эффективность перевозочного процесса напрямую зависит от характеристик и надежности ЭПС, которая, в свою очередь, определяется качеством технического обслуживания и ремонта. Усложнение конструкции электропоездов и электропоездов увеличивает значимость повышения технической и экономической эффективности оборудования ЭПС. Отказы электрооборудования, особенно в системах автоматического регулирования и управления, приводят к ощутимому материальному ущербу. Обострение проблемы надежности оборудования ЭПС объясняется увеличением сложности технических систем и повышением требований к качеству их работы,

экстремальными условиями эксплуатации (высокие скорости, ускорения, температуры, вибрация и т.д.), полной или частичной автоматизацией и, как следствие, исключением прямого контроля человеком систем и оборудования ЭПС [3, 4].

Наиболее распространенными проблемами эксплуатационного характера, влияющими на износ оборудования ЭПС, являются факторы, которые ускоряют износ деталей и узлов локомотивов:

- перепады температур, например, низкие температуры вызывают обледенение контактных частей аппаратов или высокие температуры приводят к пересыханию изоляции;

- влажность воздуха влияет на состояние изоляции токоведущих частей и лакокрасочных покрытий, особенно сильно при резких перепадах температуры;

- запыленность воздуха повышает электропроводимость поверхности изоляции;

- вибрационные и динамические нагрузки ускоряют износ изоляции, нарушают плотность соединений, разрушают сварные швы и детали [5, 6].

Для анализа влияния эксплуатационных факторов используются методы и исследования, направленные на снижение их негативного воздействия на износ оборудования ЭПС. Методы технической диагностики дают возможность оценивать техническое состояние изделий, обнаруживать и определять место нахождения неисправностей, прогнозировать остаточный ресурс [7]. Математическое моделирование позволяет разрабатывать математические модели для выявления видов отказов и учета технических характеристик оборудования [8]. Экспериментальные исследования также определяют влияние эксплуатационных факторов на износ оборудования ЭПС. Например, для определения интенсивности изнашивания щеток тяговых электродвигателей используют метод гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа [9]. При исследовании износа бандажей колесных пар выявлено, что на участках со сложным профилем пути (с долей кривых более 25 %) в условиях тяжеловесного движения и повышения скоростей наблюдается высокая интенсивность и неравномерность изнашивания гребней бандажей [8]. Исследование влияния токовой нагрузки на износ контактных элементов токоприемника установило, что повышение плотности тягового тока до 1000 А/см увеличивает износ угольных вставок токоприемника в 3,13 раза, металлокерамических на железной основе – в 2,6 раза, на медной основе – в 2,75 раза [10].

Согласно ГОСТ 34709-2021 и ГОСТ 34913-2022, системы диагностики железнодорожного подвижного состава должны соответствовать требованиям:

- сохранять работоспособное состояние во всех заданных условиях и режимах эксплуатации;

- обеспечивать надежное хранение информации, исключающее ее потерю в случае технических сбоев;

- представлять информацию о результатах диагностирования пользователю в форме, удобной для восприятия;

- соответствовать требованиям законодательства и нормативных документов по обеспечению защиты информации и соблюдению коммерческой тайны;

- обеспечивать автоматизацию контроля основных технологических процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта устройств по фактическому техническому состоянию;

- гарантировать техническую диагностику и мониторинг технических средств с целью обеспечения заданных параметров функционирования, оперативной реакции на возникновение нештатных ситуаций, прогнозирования поведения систем [11, 12].

При очевидной эффективности применения систем диагностики существуют и проблемы:

- низкая эффективность традиционных методов контроля и сложности проведения диагностики вручную, что не обеспечивает оперативность и точность диагностики;

- сложности обеспечения информационной безопасности при интеграции автоматизированного рабочего места линейного электромеханика с системой диагностики;

- проблематичность правильной интерпретации момента возникновения того или иного события при анализе журналов работы системы;

- сложности в измерении высокочастотной вибрации подшипниковых узлов некоторых машин [13-15].

На железнодорожном транспорте в России и в целом по миру поезда отправляются в депо для ремонта, но каждый лишний проведенный там день становится источником прямых потерь и дополнительных расходов из-за простоя локомотивов. Еще несколько лет назад телеметрические данные поездов обрабатывались вручную инженерами-диагностами. Они просматривали отчеты о работе поезда за несколько суток. Это подвергало информацию риску некорректной интерпретации, и часть ошибок могла быть упущена. Разработанная двухуровневая система технического диагностирования и текущего ремонта электронных устройств ЭПС с применением АСТД определила стратегию развития диагностических комплексов. Чтобы компенсировать снижение надежности из-за усложнения конструкции, необходимо увеличивать объем контроля состояния деталей, узлов и агрегатов, а также повышать качество и эффективность этого контроля. При существующем процессе технического обслуживания и текущего ремонта большая часть времени обслуживания тратится на выявление и локализацию неис-

правностей, а не на их устранение. Поэтому совершенствование систем диагностики, позволяющих эффективно выявлять и прогнозировать неисправности, повышает эффективность использования времени и ресурсов на техническое обслуживание [16].

III. Результаты исследования

ОАО «РЖД» постоянно улучшает системы диагностики, предлагая также сторонним разработчикам участвовать в этом процессе. Для прогнозирования поведения железнодорожных транспортных средств современные системы предиктивной аналитики вовлекают искусственный интеллект, машинное зрение, дополненную реальность и другие технологии, чтобы повысить надежность локомотивов. С использованием искусственного интеллекта, больших данных и машинного обучения на основе алгоритмов, предиктивная аналитика способна предсказывать сбои и поломки. Чем больше данных доступно для анализа, тем более точными становятся прогнозы. Локомотив, оснащенный современными сенсорами, передает огромные объемы данных, невозможные для анализа человеком. Обработка этих данных с использованием систем искусственного интеллекта позволяет оптимизировать параметры надежности и уменьшить количество поломок [17].

Методы цифровой диагностики включают функциональное и тестовое диагностирование, использование диагностических моделей, которые воспроизводят процессы отказов и восстановления работоспособности оборудования ЭПС. Функциональное диагностирование ЭПС заключается в исполнении системой заданных функций при заданных параметрах и позволяет выявить причины нарушения ее функционирования. Тестовое диагностирование позволяет проверить техническое состояние и параметры системы и ее элементов по тестовому воздействию на нее, а также причины их отклонения от заданных значений. В качестве диагностических используются логические модели, графы причинно-следственных связей, с помощью которых воспроизводят процессы отказов и восстановления работоспособности оборудования ЭПС. С помощью математической модели объекта контроля можно создать наиболее рациональные методы диагностирования системы в целом или отдельных ее функциональных узлов и блоков [18].

Примером реализации цифровой диагностики является система диагностики состояния токоприемников ЭПС, к неисправности которых могут привести следующие факторы:

- воздействие экстремальных ударных нагрузок и давление воздушной среды;
- воздействие атмосферных явлений (токоприемники подвержены влиянию дождя, снега, ледообразования и ветра);

– ненормальное взаимодействие с деталями контактной сети или плохое качество ремонта, например, из-за этого перекашиваются подвижные рамы токоприемника;

– удары полоза о контактный провод, когда контактный провод не натянут по всей длине равномерно: в некоторых местах он провисает, а в некоторых, наоборот, слишком сильно натянут;

– дефекты полоза и угольной вставки, что приводит к некорректному нажатию полоза на контактный провод;

– изнашивание накладок или ухудшение контакта из-за нарушения регулировки токоприемника;

– некорректное регулирование клапана может стать причиной ударов токоприемника и возникновению отколов и трещин.

Для диагностики токоприемников применяются различные методы: измерения значений статического нажатия с помощью электромеханических датчиков, контроль температуры системы подвижных рам токоприемников во время движения, измерение времени подъема и опускания токоприемников с помощью секундомера, использование стрелочного динамометра – для контроля статической характеристики нажатия токоприемника [18-21].

Система диагностики [23] основана на визуально-программной обработке данных с видеокамер для отслеживания перемещения контактного провода и выявления неисправностей токоприемника. Своевременное определение неисправности токоприемников локомотивов позволяет предотвратить обрыв контактного провода и повысить безопасность движения на магистрали [18, 22, 23].

СД токоприемников имеет преимущества по сравнению с другими методами диагностики оборудования ЭПС:

– своевременное выявление неисправностей токоприемника и предотвращение повреждений контактной сети;

– автоматическое поддержание оптимальных параметров взаимодействия токоприемника и контактного провода;

– снижение эксплуатационных расходов за счет точной диагностики и оптимизации ТООР.

Некоторые недостатки систем диагностики токоприемников:

– чувствительность к погодным условиям и уровню освещенности – снег, сильный дождь и вспышки молний могут приводить к ложному срабатыванию;

– дестабилизирующие факторы в условиях проведения измерений (климат, электромагнитные поля, аэродинамика);

– необходимость в широкополосном канале передачи данных до контрольного пункта установки системы, что дорого и не всегда технически реализуемо;

– сложность в реализации алгоритмов распознавания изображений и обнаружения дефектов токоприемников в автоматическом режиме, что требует участия оператора;

– сложность видеорегистрации из-за высокой скорости движения ЭПС, что усложняет обработку данных;

– необходимость обеспечения необходимого уровня освещенности токоприемника в любое время суток для непрерывной работы диагностического комплекса. Применение мощного прожектора в темное время суток ослепляет машинистов проходящих локомотивов.

Поэтому требуется дальнейшая проработка методов прогнозирования и диагностики, а также способов предиктивного поиска оптимальных состояний оборудования ЭПС в современных условиях процесса перевозок [19, 24, 25].

Системы диагностики токоприемников успешно применяются в ряде зарубежных компаний: предиктивная аналитика системы *Alstom HealthHub* с использованием датчиков и *TrainScanner*, китайские автоматизированные диагностические тоннели *CRRC* с тепловизорами и лазерными сканерами, системы с использованием камер с ИИ в метро Сингапура и Гонконга, шведская система автоматического мониторинга *Sensys* с использованием цифрового фотоаппарата [14, 19].

Интеллектуальные датчики, которые используются для автоматической диагностики оборудования ЭПС, позволяют автоматически обрабатывать результаты измерений, выполнять самодиагностику оборудования ЭПС, сократить затраты на установку и обслуживание оборудования, повысить надежность за счет возможности самостоятельно обрабатывать результаты измерений, сокращая влияние человеческого фактора. При выборе интеллектуального датчика важно убедиться, что датчик подходит для конкретной системы, с которой он будет интегрироваться. Необходимо выбирать датчики с точными показателями, чтобы повысить стабильность в заданной среде. Также нужно учитывать радиус связи датчика, чтобы обеспечить его достаточную протяженность до необходимого места. Примером успешного применения интеллектуальных датчиков на ЭПС является комплексная СД электропоездов «КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-ТР3», предназначенная для диагностирования колесно-моторных блоков, тормозного оборудования, токоприемника, изоляции силовых и вспомогательных электрических цепей [21].

Для дистанционного контроля состояния подвижного состава используются искусственные нейронные сети, которые быстро обрабатывают большие объемы информации, снижая влияния человеческого фактора, сокращая затраты на техническое обслуживание и устранение неисправностей и улучшая общую эффективность работы железнодорожной инфраструктуры. Для реализации нейросетевых моделей диагностики оборудования

ЭПС разработана автоматизированная система «Доверенная среда локомотивного комплекса», в которой используются алгоритмы и модели прогнозирования отказов оборудования локомотивов на основе обработки бортовой телеметрии и данных. Искусственный интеллект (ИИ) выявляет аномалии в работе оборудования электровозов и тепловозов, а затем оценивает остаточный ресурс. Система диагностики технического состояния вагонов и локомотивов с помощью ИИ позволяет предотвращать потенциальные поломки и проводить сервисные работы до возникновения аварийных ситуаций. Дальнейшее развитие этих систем и применение передовых технологий позволит значительно улучшить процессы технического обслуживания и ремонта ЭПС. Однако использование нейронных сетей в контроле состояния подвижного состава имеет некоторые ограничения. Для работы нейросетевых диагностических комплексов необходимы мощные аппаратные средства. Также могут возникать ошибки из-за сложности настройки модели для работы в режиме реального времени, а также отсутствия обучающих данных или неправильных настроек сети. Необходимость принятия решений в условиях неопределенности связано с нестационарностью физических процессов в движении транспортных потоков, сложностью их математического описания и зависимостью характеристик от внешних условий. Кроме того, для применения нейронных сетей в железнодорожной отрасли остаются неизученными некоторые вопросы, связанные с архитектурой сетей, способами обучения, объемом обучающей выборки и программными продуктами для реализации моделей [26-29].

Еще несколько лет назад телеметрические данные поездов обрабатывались людьми. Примером успешного внедрения искусственного интеллекта в железнодорожную отрасль является система «Умный локомотив», внедрение которой началось в 2016 г. Система не только автоматизировала сбор и обработку данных о состоянии поездов и инфраструктуры, но и позволила значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожных перевозок. Данные о состоянии техники поступают от датчиков, сенсоров и микропроцессорных систем управления, которые регистрируют параметры работы ЭПС. Каждый раз, когда локомотив направляется в депо на обслуживание или ремонт, телеметрические данные, записанные в пути следования, считываются с бортовой системы и загружаются в программу «Умный локомотив». Там они автоматически конвертируются и обрабатываются, запуская алгоритмы для выявления неисправных датчиков. Это позволяет в режиме реального времени оценивать состояние локомотивов и прогнозировать потенциальные отказы узлов локомотива до возможного возникновения аварии. Таким образом, риск происшествий и аварий в пути уменьшается до минимума, поскольку большинство поломок обнаруживается за месяц до их фактического возникновения. На текущий момент система «Умный локомотив» анализирует 23 вида оборудования поездов по

более чем 300 параметрам, что позволяет выявить около 60 категорий сбоев и автоматически выявлять нарушения эксплуатации, связанные с ошибками персонала. Только за 2024 г. использование системы «Умный локомотив» предотвратило аварии, выявив 100 тыс. потенциальных поломок [30, 31]. Некоторые компании уже используют нейросетевые технологии в железнодорожной отрасли. Концерн «Телематика» разработал комплексы для диагностики подвижного состава и грузов, используя нейросетевые разработки. Технология позволяет в режиме реального времени создавать 3D-модель составов, определять габариты, вес, нагревы, отрицательную динамику. Искусственный интеллект использует данные о погоде для автоматической корректировки планов поездок и скоростей движения поездов на основе метеоданных [30, 32, 33].

В дополнение к «Умному локомотиву», РЖД активно внедряет и другие системы диагностики, основанные на нейросетевых технологиях и предназначенные для мониторинга состояния подвижного состава. Эти системы позволяют автоматизировать процессы, выявлять дефекты на ранних стадиях и прогнозировать отказы, что способствует повышению безопасности и эффективности железнодорожных перевозок:

- автоматизированная система определения вагонов с отрицательной динамикой выявляет вагоны с повышенными колебаниями, что может указывать на проблемы с ходовой частью;

- система «Техновизор» автоматизирует визуальный контроль элементов подвижного состава с использованием технического зрения и высокоскоростных камер;

- пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях выполняет комплексную оценку состояния подвижного состава, прогнозирует ресурс грузовых вагонов и автоматизирует процессы на сортировочных станциях;

- система лазерного контроля отрицательной динамики и габарита выявляет негабарит подвижного состава и его локализацию на 3D-модели, а также опасные колебания;

- система контроля веса и вертикальных динамических нагрузок измеряет массу подвижного состава в режиме движения, определяет неравномерную загрузку вагонов и выявляет дефекты колес;

- комплекс технических измерений геометрических параметров колесных пар вагонов измеряет геометрические параметры колес, выявляет износ и дефекты;

- универсальный мобильный прибор «Доктор-100У» осуществляет технический контроль и диагностирование параметров электрического оборудования [34].

Исследования в области ИИ на железных дорогах в основном находятся на ранних стадиях. Система «Умный локомотив» и другие нейросетевые технологии являются ярким примером успешного применения ИИ в данной отрасли. Они демонстрируют потенциал ИИ для повышения безопасности, эффективности и снижения затрат. Однако для широкого внедрения ИИ в железнодорожной отрасли необходимо решать существующие вызовы, такие как высокие начальные затраты, необходимость инвестиций в разработку и внедрение ИИ-систем и обучения персонала для работы с новыми технологиями, проблемы интеграции ИИ в устаревшие системы существующей инфраструктуры и обеспечения защиты данных от киберугроз. Также необходимо развитие стандартизированной методологической базы применения ИИ [28, 29, 35]. Для минимизации рисков необходимо проводить тщательное планирование внедрения ИИ, учитывать возможные проблемы и разрабатывать меры по их устранению.

ОАО «РЖД» активно внедряет различные системы диагностики на основе нейросетей, что позволяет значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожных перевозок. Наиболее инновационным проектом в области диагностирования оборудования ЭПС является разработка прескриптивной системы диагностирования (ПСД). Эта система представляет собой программно-аппаратный комплекс с цифровым двойником электропоезда, который использует нейронные сети для анализа данных о техническом состоянии электропоезда, поступающих в режиме реального времени. Разработка ПСД является одним из наиболее перспективных направлений в этой области, поскольку она позволяет прогнозировать отказы оборудования и принимать превентивные меры, что снижает риски аварий и сокращает эксплуатационные расходы. В дальнейшем развитие и масштабирование этой технологий позволит создать более надежную и эффективную железнодорожную систему. К ключевым особенностям ПСД относятся: раннее обнаружение дефектов на стадии их формирования, повышение достоверности и точности диагностики технического состояния оборудования, прогнозирование безаварийной работы оборудования, снижение риска отказов и unplanned остановок ЭПС, уменьшение затрат на ремонт и обслуживание. Разработка системы ПСД электропоезда ЭС2Г «Ласточка» ведется при участии АО «Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ) и других организаций. Система может отправить предупреждающий сигнал машинисту и диспетчеру при обнаружении отклонений в работе оборудования ЭПС, даже если параметры находятся в пределах нормальных значений [36]. Планируется установка системы на подвижные составы с разным уровнем автоматизации. Разработка аналогичных систем прескриптивной диагностики также ведется компаниями *Mitsubishi Rail GE Transportation* (Япония), *Siemens* (Германия), *Sung Shin Rolling Stock Technology Limited* (Южная Корея) [34].

Преимуществами прескриптивных систем диагностики являются:

- точное планирование ремонта и снижение количества простоев ЭПС, что уменьшает количество и время задержек поездов, а значит, и затраты, связанные с их неплановым простоем: исключены издержки, вызванные нарушением графика движения;
- выявление расхождения параметров и своевременное планирование ремонтных работ: эффективная и регулярная диагностика помогает обнаружить неисправность еще до ее проявления, снижая тем самым количества отказов.

Вместе с тем, эффективность прескриптивных систем диагностики зависит от качества входных данных: если входные предположения неверны, то результаты на выходе будут неточными. Кроме того, прескриптивная аналитика подходит только для краткосрочных решений, а не для долгосрочных, так как становится менее надежной, если требуется больше времени [37-40].

ОАО «РЖД» стали одной из первых компаний России, начавших процесс использования больших данных и предиктивной аналитики, что позволяет прогнозировать отказы железнодорожного ЭПС на основе анализа закономерностей, выявленных в процессе эксплуатации. Переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому состоянию становится возможным благодаря развитию технологий «Интернета вещей», искусственного интеллекта и анализу больших данных. Они позволяют своевременно выявлять неисправности, минимизировать простои и снижать затраты на ремонт. Большие данные позволяют прогнозировать отказы на основе анализа закономерностей, выявленных в процессе эксплуатации. «Интернет вещей» (*IoT*) обеспечивает сбор данных в режиме реального времени от оборудования, установленного на подвижном составе и инфраструктуре. Система «Доверенная среда локомотивного комплекса», основанная на больших данных и предиктивной аналитике, обеспечивает защиту данных от неправомерного доступа, выявляет аномалии, указывающие на потенциальные неисправности, и составляет прогнозы о вероятности отказа оборудования в будущем, позволяет проводить профилактические работы до того, как проблема приведет к серьезным последствиям. Чем больше информации доступно искусственному интеллекту (ИИ), тем точнее будет прогноз. Для анализа используются как ранее внесенные данные, так и информация, собранная в режиме реального времени [41-43].

Можно привести следующие примеры использования предиктивной аналитики в железнодорожном транспорте.

1. Система «Умный локомотив» позволяет в режиме реального времени оценивать состояние машины и прогнозировать отказ узлов еще до поломки. Когда локомотив заезжает в депо, с его бортовой системы считы-

вают информацию, которую он записал в процессе пути, и загружают в программу для обработки. Алгоритмы выявляют неисправные датчики и прогнозируют вероятность отказа какого-либо узла в ближайшем будущем.

2. Программный комплекс AURORAi выявляет дефекты колесных пар и прогнозирует их поломки. Когда локомотив заезжает в депо, технология с помощью сканеров определяет состояние тормозной колодки, а предиктивная аналитика прогнозирует вероятность поломки деталей и помогает принимать решения о необходимости их замены [44, 45].

В ОАО «РЖД» ведется разработка технических требований к перспективным локомотивам, в которых будут использоваться интеллектуальные технологии при проведении ремонта. Замена планово-предупредительного ремонта на ремонт только тех деталей, которые действительно нуждаются в нем на данный момент, на основе данных о их фактическом состоянии с использованием «Интернета вещей» и ИИ является перспективным направлением развития железнодорожной отрасли, которое позволяет повысить надежность, оптимизировать затраты и увеличить срок службы оборудования. Внедрение этих технологий требует значительных инвестиций и разработки новых алгоритмов и методик, но в долгосрочной перспективе может принести значительные экономические и эксплуатационные выгоды. Такой подход помогает экономить на эксплуатационных и трудовых затратах, сократить время простоя оборудования и продлить его срок службы. Например, интеллектуальный автоматизированный прогностический комплекс оборудования, оснащенный программным обеспечением с элементами искусственного интеллекта, электронной базой по всем видам отказов оборудования и собственной сенсорной системой. Специальные датчики размещаются на движущихся частях оборудования и считывают различные дефекты с помощью инновационной импульсно-волновой технологии. Благодаря этому методу диагностики, комплекс безошибочно определяет ресурс техники и прогнозирует оставшийся срок службы оборудования и позволяя перейти на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию [43, 46].

Преимуществами перехода к ремонту по фактическому состоянию являются:

- *экономия средств*: избегая ненужные ремонты и замены, можно снизить эксплуатационные затраты, поломки устраняются до того, как они приведут к дорогим простоям или повреждениям;
- *продление срока службы оборудования*: благодаря своевременному выявлению проблем можно избежать серьезных повреждений и поломок, что увеличивает срок службы оборудования;
- *минимизация простоя*: обслуживание проводится по мере необходимости, до появления критических неисправностей;

- *улучшение безопасности и надежности*: точное отслеживание состояния оборудования позволяет уменьшить вероятность аварий и сбоев;
- *сокращение потребности в запасных частях, материалах и оборудовании*: планирование сроков приобретения запасных частей происходит по мере их необходимости;
- *избавление от «внезапных» поломок механизмов* и остановок производства;
- *возможность планировать сроки и содержание* технического обслуживания и ремонта;
- *повышение общей культуры производства* и квалификации персонала [47, 48].

Внедрение сквозных цифровых технологий является новым перспективным направлением в технологии диагностирования объектов железнодорожной инфраструктуры в целом и позволяет мониторить и управлять различными аспектами железнодорожного транспорта в режиме реального времени. Это дает возможность получать актуальную информацию о состоянии путей, локомотивов, вагонов и грузов, а также обеспечивать их взаимодействие и координацию. Например, согласно одному из исследований, контроль состояния контактной сети с помощью автономных аэромобильных систем, используется для автоматического определения состояния несущего троса, струн, грузов компенсаторов, измерения толщины контактного провода и габаритных размеров зигзага контактного провода [43, 49].

Ожидается, что применение предиктивной аналитики в железнодорожной отрасли будет расширяться путем развития нейросетевых моделей:

- беспилотные авиационные системы диагностики смогут полностью автоматизировать процесс технического контроля, заменив ручной осмотр подвижного состава;
- интеграция нейросетевых технологий с блокчейн-технологиями позволит обеспечить полную прозрачность учета данных о состоянии техники и истории ремонтов;
- развитие самовосстанавливающихся технологий самодиагностики позволит автоматически устранять мелкие неисправности оборудования без вмешательства человека;
- безопасная обработка данных, основанная на последних тенденциях в области облачных вычислений.

Использование подобных систем помогает контролировать состояние контактной сети, оборудования ЭПС, оперативно устранять неисправности и повышать безопасность движения поездов [42, 43, 50, 51].

IV. Заключение

Ключевым фактором перехода к автоматизированным и интеллектуальным системам технической диагностики ЭПС является использование информационно-управляющих комплексов на базе ПЭВМ и

дистанционно управляемых цифровых измерительных приборов, что существенно ускоряет процесс автоматизации. При внедрении новых информационных технологий в системы технического диагностирования ЭПС необходимо учитывать, что программное обеспечение систем автоматизированной диагностики устаревает, и их необходимо заменять новыми. Использование инновационных технологий диагностики состояния оборудования ЭПС на железнодорожном транспорте даст возможность оценить не только реальное состояние системы в целом, учитывая всевозможные связи между событиями, но и ее ресурс, своевременно определить неисправность и существенно снизить затраты на содержание и ремонт подвижного состава, обеспечить быструю проверки исправности локомотива, выбрать рациональной системы ремонта с учетом фактического технического состояния узлов и агрегатов, повысить надежности подвижного состава в эксплуатации. Создание единой системы автоматического сбора исходных данных путем объединения интеллектуальных, технологических и технических ресурсов позволит отказаться от традиционных методов диагностирования, упростить процесс проектирования и эксплуатации диагностических систем, расширить множество диагностических признаков, повышая полноту и глубину диагностирования и прогнозирования. Развитие интеллектуальных и автоматизированных систем диагностики ЭПС является приоритетным направлением для повышения надежности, безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. Поэтому информационные технологии в системах диагностирования оборудования ЭПС будут внедряться на большом числе технически сложных и уникальных транспортных средств. Использование передовых информационных технологий позволит перейти к более эффективным системам ремонта и обслуживания подвижного состава, что приведет к снижению эксплуатационных расходов и повышению конкурентоспособности железнодорожного транспорта. Перспективы внедрения этих технологий в транспортной отрасли – ближайшее десятилетие.

© Рыжова Е.Л., 2025

Поступила в редакцию 29.07.2025

Принята к публикации 15.08.2025

Received 29.07.2025

Accepted 15.08.2025

Библиографический список

- [1] Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. – М.: ОАО «РЖД», 2017. – 92 с.

- [2] Семенов А. П., Валинский О. С., Лубягов А. М. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 26–32.
- [3] Галкин В.Г., Парамзин В.П., Четвергов В.А. Надежность тягового подвижного состава. М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
- [4] Худоногов А.М., Исмаилов Ш.К., Смирнов В.П. Надежность предельно нагруженного оборудования электровозов Восточного региона // Актуальные аспекты организации работы железнодорожного транспорта. Иркутск, 2006. – С. 36.
- [5] Буйносов А.П., Стаценко К.А. Надежность электроподвижного состава. Екатеринбург, 2016. – 34 с.
- [6] Находкин В.М., Яковлев Д.В., Черепашенцев Р.Г. Ремонт электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1989. – 295 с.
- [7] Карпов В.А. Определение ресурса деталей и узлов тягового подвижного состава по результатам инструментального и неразрушающего контроля (на примере элементов колёсной пары электровоза ВЛ80С): дис. канд. техн. наук, РУТ (МИИТ), Москва, 2020. – 131 с.
- [8] Иванов П.Ю. Повышение эксплуатационной надежности асинхронных вспомогательных машин магистральных электровозов переменного тока: дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2015. – 198 с.
- [9] Байсадыков М.Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей: дис. канд. техн. наук, ОмГТУ, Омск, 2020. – 156 с.
- [10] Ступаков С. А. Филиппов В. М. Исследование влияния токовой нагрузки на износ контактных элементов токоприемника электроподвижного состава // Известия Трансиба. 2011. № 1 (5). С. 37-42.
- [11] ГОСТ 34709–2021. Стационарные средства диагностики железнодорожного подвижного состава на ходу поезда. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2021.
- [12] ГОСТ 34913-2022. Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
- [13] Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 3. С. 333-354.
- [14] Владимиров Д. С. Анализ мирового опыта применения систем предиктивной диагностики железнодорожного транспорта // Молодой ученый. 2025. № 23 (574). С. 71-76.
- [15] Чайковская Г.А. Интеграция средств диагностики и контроля в микропроцессорных системах ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 6. С. 8-9.
- [16] Герцензон М.А., Тумашевич А.А., Борисов А.А. Контроль состояния подвижного состава железнодорожного транспорта. М.: Юрайт, 2016. – 240 с.
- [17] Замятина Н.В., Камаев В.И. Контроль технического состояния электрифицированных железных дорог. М.: МЭИ, 2016. – 176 с.

- [18] Пышный И. М. Информационные технологии и системы диагностирования при эксплуатации и обслуживании электроподвижного состава. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. – 65 с.
- [19] Дорошук Д.В. Перспективы развития диагностики состояния токоприемников // Межд. науч.-практ. конф. «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов», Ноябрь 16-17, 2023, Гомель, Беларусь: БелГУТ, 2023. С. 33-34.
- [20] Слатин А.И. Совершенствование методов диагностирования токоприемников электрического транспорта: автореф. дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2024. – 20 с.
- [21] Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Стариков В.А. Мониторинг состояния токоприемников МВПС с помощью системы интеллектуальных датчиков // Датчики и Системы. 2007. № 10. С. 33-38.
- [22] Лелеков В.Б., Кулев Ю.В. Система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава, Пат. №113498 RU, заявл. 01.09.2011; опубл. 20.02.2012.
- [23] Кулев Ю.В., Лелеков В.Б. Способ диагностики неисправности токоприёмников локомотивов и устройство для его осуществления, Пат. № 2722761 RU, заявл. 07.02.2019; опубл. 03.06.2020.
- [24] Смердин А.Н., Голубков А.С., Найденов С.Н. Автоматизированная система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава на основе видеоизмерительного комплекса // Известия Транссиба. 2012. № 2(10). С. 103-109.
- [25] Костюков В.Н., Костюков А.В., Стариков В.А. Система диагностики токоприемников, Пат. № 2315275 RU, заявл. 26.06.2006, опубл. 20.01.2008.
- [26] Язынин В.С., Барановский А.М., Забродин А.В. Модель системы дистанционного контроля состояния электроподвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (33). С. 27-37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37.
- [27] Сидоров А.В., Михеев С.В., Осьмушин А.А. Диагностика состояния транспортной инфраструктуры с использованием нейронных сетей // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 215.
- [28] Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(57). С. 33-41. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33
- [29] Скворцова И.В., Чаюк С.В., Багаева И.В., Нурулин М.Ю. Интеграция искусственного интеллекта в железнодорожный транспорт: вызовы, возможности и перспективы развития // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2025. № 3-1. С. 156-160. DOI 10.17513/vaael.4040
- [30] Бочегов М.А., Медникова О.В. Искусственный интеллект на железной дороге // Проблемы науки. 2024. № 4(85). С. 7-12.
- [31] Лакин И.К., Павлов В.В., Мельников В.А. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. №1. С. 53–56.

- [32] Как искусственный интеллект захватил железную дорогу // РЖД Цифровой. [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZYUnZTnG4kyL3Tk8> (дата обращения: 29.07.2025).
- [33] Алексей Нащекин: «Дорогам нужен интеллект». [Электронный ресурс]. URL: https://www.vedomosti.ru/technologies/industries_and_markets/characters/2023/12/24/1012718-dorogam-nuzhen-intellekt (дата обращения: 29.07.2025).
- [34] Универсальный мобильный прибор технического контроля и диагностирования параметров электрического оборудования с прогнозированием остаточного ресурса (Доктор-100У) // [Электронный ресурс]. URL: <https://zterail.ru/generate-pdf/37> (дата обращения: 29.07.2025).
- [35] Sarp S., Kuzlu M., Jovanovic V., Polat Z., Guler O. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains // European Transport Research Review. 2024. Vol. 16. 58. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5
- [36] Ададуров А.С., Федорова В.И., Бойко А.М. Общее принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные // Национальная Ассоциация Ученых. 2022. № 75-2. С. 14-22.
- [37] Прогноз отличный: как предсказать необходимость ремонта поездов. [Электронный ресурс]. URL: <https://rzddigital.ru/projects/prognoz-otlichnyy-kak-predskazat-neobkhodimost-remonta-poezdov/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [38] В России разрабатывают систему диагностики для оценки состояния электропоездов. [Электронный ресурс]. URL: <https://www1.ru/news/2024/05/29/v-rossii-razrabatyvaiut-sistemu-diagnostiki-dlia-ocenki-sostoianiiia-eletropoezdov.html> (дата обращения: 29.07.2025).
- [39] ВНИИЖТ разработал систему диагностики для беспилотных «Ласточек». [Электронный ресурс]. URL: https://gudok.ru/content/science_education/1616519/ (дата обращения: 29.07.2025).
- [40] Прескриптивная аналитика: определение, принцип работы и примеры. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.investopedia.com/terms/p/prescriptive-analytics.asp> (дата обращения: 29.07.2025).
- [41] Как цифровизация меняет железные дороги в России и мире. [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/6842d77e9a79477d0ae68392?from=copy> (дата обращения: 29.07.2025).
- [42] Как искусственный интеллект меняет техническое обслуживание ЖД транспорта? [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyat-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (дата обращения: 29.07.2025).
- [43] Фроленков С.А. Совершенствование диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог на основе сквозных цифровых технологий: дис. канд. техн. наук, СамГУПС, Самара, 2023. – 181 с.
- [44] 10 новых технологий и инноваций в железнодорожной отрасли в 2025 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://innovanews.ru/info/innovations/10-novykh-tekhnologij-i-innovatsij-v-zheleznodorozhnoj-otrasli-v-2025-godu/> (дата обращения: 29.07.2025).

- [45] Прескриптивная аналитика. [Электронный ресурс]. URL: <https://rzdigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [46] Ростех разработал «умный» комплекс для предиктивной диагностики оборудования. [Электронный ресурс]. URL: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-razrabotal-umnyy-kompleks-dlya-prediktivnoy-dagnostiki-oborudovaniya/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [47] Что такое обслуживание по фактическому техническому состоянию? [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.vibray.ru/post/14/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [48] Система технического обслуживания и ремонта оборудования по фактическому состоянию. [Электронный ресурс]. URL: <https://rempromob.ru/obsluzhivanie-po-fakticheskomu-sostojaniyu-ofs/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [49] Внедрение технологий цифровой железной дороги – как новые инновации изменят транспортную отрасль. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusbiletnapoezd.ru/tickets/articles/vnedrenie-texnologii-cifrovoy-zeleznoy-dorogi/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [50] Озеров А.В., Куроптева А.П. Современные системы технической диагностики и мониторинга на железнодорожном транспорте // Наука и технологии железных дорог. 2024. Т. 8. № 1(29). С. 3-13.
- [51] Стадниченко С.Ю. Интеллектуальные компоненты для системы автоматизированного мониторинга и диагностики на железнодорожном транспорте // Молодой ученый. 2012. № 11 (46). С. 98-102.

References

- [1] The concept of implementation of the complex scientific and technical project “Digital Railway” No. 1285r. Approved by the order of JSC Russian Railways dated 05.12.2017. Moscow: JSC Russian Railways, 2017.
- [2] A.P. Semenov, O.S. Valinsky and A.M. Lubyagov, “Cifrovoe depo – tekhnologicheskaya osnova cifrovoj transformacii lokomotivnogo kompleksa [Digital depot – the technological basis of the digital transformation of the locomotive complex]”, *Zheleznodorozhnyj transport [Railway transport]*, no. 3, pp. 26-32, 2020 (in Russian).
- [3] V.G. Galkin, V.P. Paramzin and V.A. Chetvergova, *Nadyozhnost' tyagovogo podvizhnogo sostava [Reliability of traction rolling stock]*. Moscow: Transport, 1981 (in Russian).
- [4] A.M. Khudonogov, Sh.K. Ismailov, and V.P. Smirnov, “Nadyozhnost' predel'no nagruzhennogo oborudovaniya elektrovozov Vostochnogo regiona [Reliability of the maximum-load equipment of electric locomotives in the Eastern region]”, *Aktual'nye aspekty organizacii raboty zheleznodorozhnogo transporta [Actual Aspects of Railway Transport Organization: Collection of Scientific Articles]*, pp. 36-40, 2006 (in Russian).
- [5] A.P. Buinosov and K.A. Statsenko, *Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of Electric Rolling Stock]*. Yekaterinburg: USURT, 2016 (in Russian).
- [6] V.M. Nakhodkin, D.V. Yakovlev and R.G. Cherepashenets, *Remont elektropodvizhnogo sostava [Repair of Electric Rolling Stock]*. Moscow: Transport, 1989 (in Russian).

- [7] V.A. Karpov, “*Opređenje resursa detalj i uzlov tyagovogo podvizhnogo sostava po rezul'tatam instrumental'nogo i nerazrushayushchego kontrolya (na primere elementov kolyosnoj pary elektrovoza VL80S) [Determination of the Resource of Parts and Units of Traction Rolling Stock Based on the Results of Instrumental and Non-Destructive Testing (Using the Example of the Wheelset Elements of the VL80S Electric Locomotive)]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, 2020 (in Russian).
- [8] P.Yu. Ivanov, “*Povyshenie ekspluatacionnoj nadezhnosti asinhronnyh vspomogatel'nyh mashin magistral'nyh elektrovozov peremennogo toka [Increase of operational reliability of asynchronous auxiliary machines of mainline AC electric locomotives]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, 2015 (in Russian).
- [9] M.F. Baisadykov, “*Razrabotka metoda ocenki intensivnosti iznashivaniya i algoritma prognozirovaniya ostatochnogo resursa shchetok tyagovyh elektrodvigatelej [Development of a method for estimating the intensity of wear and an algorithm for predicting the residual life of brushes of traction electric motors]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2020 (in Russian).
- [10] S.A. Stupakov and V.M. Filippov, “Research of influence of current load on deterioration of contact elements of the current collector of the electrorolling stock”, *Journal of Transsib Railway Studies*, no. 1 (5), pp. 37-42, 2011.
- [11] Stationary Means of Diagnostics of Railway Rolling Stock on the Move of a Train. General Technical Requirements, GOST 34709-2021, 2021.
- [12] Systems of technical diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics of high-speed railway lines. General technical requirements, GOST 34913-2022, 2023.
- [13] D.V. Efanov, “Features of the functioning of technical diagnosis and monitoring systems of railway infrastructure objects”, *Automation in Transport*, vol. 4, no. 3, pp. 333-354, 2018.
- [14] D.S. Vladimirov, “Analiz mirovogo opyta primeneniya sistem prediktivnoj diagnostiki zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the global experience in applying predictive diagnostics systems for railway transport young scientist]”, *Molodoj uchenyj [Young scientist]*, no. 23 (574), pp. 71-76, 2025 (in Russian).
- [15] G.A. Tchaikovskaya, “Integraciya sredstv diagnostiki i kontrolya v mikroprocesornyyh sistemah ZhAT [Integration of Diagnostics and Control Tools in Microprocessor-Based Automotive Systems]”, *Automation, communications, informatics*, no. 6, pp. 8-9, 2012 (in Russian).
- [16] M.A. Gertsenzon, A.A. Tumashevich, A.A. Borisov, *Kontrol' sostoyaniya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Control of the state of rolling stock of railway transport]*. Moscow: Yurayt, 2016 (in Russian).
- [17] N.V. Zamyatina and V.I. Kamaev, *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya elektrificirovannyh zheleznnyh dorog [Control of the technical condition of electrified railways]*. Moscow: MPEI, 2016 (in Russian).
- [18] I.M. Pyshny, *Informacionnye tekhnologii i sistemy diagnostirovaniya pri ekspluatatsii i obsluzhivanii elektropodvizhnogo sostava [Information technologies and diagnostic systems for the operation and maintenance of electric rolling stock]*. Yekaterinburg: USURT, 2016 (in Russian).

- [19] D. V. Doroshchuk, "Perspektivy razvitiya diagnostiki sostoyaniya tokopriemnikov [Prospects for the development of current collector condition diagnostics]", in proc. *Innovacionnoe razvitie transportnogo i stroitel'nogo kompleksov [Innovative Development of the Transport and Construction Complexes]*, Nov. 16-17, 2023, Gomel, Belarus, pp. 33-34 (in Russian).
- [20] A.I. Slatin, "Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya tokopriemnikov elektricheskogo transporta [Improvement of methods for diagnosing electric transport current collectors]", Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, 2024 (in Russian).
- [21] V.N. Kostyukov, A.V. Kostyukov and V.A. Starikov "Monitoring the condition of current collectors of the MBPS using the system of intelligent sensors", *Sensors and Systems*, no. 10, pp. 33-38, 2007.
- [22] V.B. Lelekov, Yu.V. Kulev, "Sistema diagnostiki sostoyaniya tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava [Diagnostic system for the condition of electric rolling stock pantographs]", Patent RU 113498 U1, Sept. 01, 2011 (in Russian).
- [23] Yu.V. Kulev, V. B. Lelekov, "Method of diagnosing faults of locomotive current collectors and device for implementation thereof", Patent RU 2722761 C1, Feb. 07, 2019.
- [24] A.N. Smerdin, A.S. Golubkov and S.N. Nayden, "Automated system for diagnosis of state pantograph based on computer vision complex", *Journal of Transsib Railway Studies*, no. 2(10), pp. 103-109, 2012.
- [25] V.N. Kostyukov, A.V. Kostyukov and V.A. Starikov, "System of diagnostics of current collectors", Patent RU 2315275 C1, Jun. 26, 2006.
- [26] V.S. Yazynin, A.M. Baranovsky and A.V. Zabrodin, "The model of remote monitoring system for electric rolling stock condition using artificial neural networks", *Intellectual Technologies on Transport*, no. 1 (33), pp. 27-37, 2023. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37
- [27] A.V. Sidorov, S.V. Mikheev and A.A. Osmushin, "Diagnostics of the transport infrastructure condition using neural networks", *Modern Problems of Science and Education*, no. 6, pp. 215, 2013.
- [28] D.A. Sivitsky, "Experience analysis and using prospects of artificial neural networks on railway transport", *The Siberian Transport University Bulletin*, no. 2(57), pp. 33-41, 2021. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33
- [29] I.V. Skvortsova, S.V. Chayuk, I.V. Bagaeva and M.Yu. Nurulin, "Integration of artificial intelligence into railway transport: Challenges, opportunities, and development prospects", *Vestnik Altajskoj Akademii Ekonomiki i Prava [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]*, no. 3-1, pp. 156-160, 2025. DOI 10.17513/vaael.4040 (in Russian).
- [30] M.A. Bochegov and O.V. Mednikova, "Iskusstvennyj intellekt na zheleznoj doroge [Artificial intelligence on the railway]", *Problemy nauki [Problems of Science]*, no. 4(85), pp. 7-12, 2024 (in Russian).
- [31] I.K. Lakin, V.V. Pavlov and V.A. Melnikov, "«Umnyj lokomotiv»: diagnostirovanie tyagovyh elektrodvigatelej teplovozov s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya [«Smart locomotive»: diagnostics of traction electric motors of diesel locomotives using machine learning methods]", *Transport Rossijskoj Federacii*, no. 1, pp. 53-56, 2018 (in Russian).

- [32] Kak iskusstvennyj intellekt zahvatil zheleznuyu dorogu [How artificial intelligence has taken over the railroad]. [Online]. Available at: <https://dzen.ru/a/ZYUnZTnG4kyL3Tk8> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [33] Aleksej Nashchekin: «Dorogam nuzhen intellekt» [Alexey Nashchekin: “Roads need intelligence”]. [Online]. Available at: https://www.vedomosti.ru/technologies/industries_and_markets/characters/2023/12/24/1012718-dorogam-nuzhen-intellekt (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [34] Universal'nyj mobil'nyj pribor tekhnicheskogo kontrolya i diagnostirovaniya parametrov elektricheskogo oborudovaniya s prognozirovaniem ostatochnogo re-sursa (Doktor-100U) [Universal mobile device for technical control and diagnostics of electrical equipment parameters with residual resource forecasting (Doctor-100U)]. [Online]. Available at: <https://zterail.ru/generate-pdf/37> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [35] S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanović, Z. Polat and O. Guler, “Digitalization of railway transport using AI-based services: digital twin trains”, *European Transport Research Review*, vol. 16, 58, 2024. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5
- [36] A.S. Adadurov, V.I. Fedorova and A.M. Boyko, “General principles of building a predictive diagnostic system for the new electric train ES2G “Lastochka” and the first experimental data”, *National Association of Scientists*, no. 75-2, pp. 14-22, 2022.
- [37] Prognoz otlichnyj: kak predskazat' neobkhodimost' remonta poezdov [The forecast is excellent: how to predict the need for train repairs]. [Online]. Available at: <https://rzdigital.ru/projects/prognoz-otlichnyy-kak-predskazat-neobkhodimost-remonta-poezdov/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [38] V Rossii razrabatyvayut sistemu diagnostiki dlya ocenki sostoyaniya elektropoezdov [Russia is developing a diagnostic system for assessing the condition of electric trains]. [Online]. Available at: <https://www1.ru/news/2024/05/29/v-rossii-razrabatyvaiut-sistemu-diagnostiki-dlia-ocenki-sostoianiiia-eletropoezdov.html> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [39] VNIIZHT razrabotal sistemu diagnostiki dlya bespilotnyh «Lastochek» [Railway Research Institute of JSC Russian Railways has developed a diagnostic system for unmanned Lastochki]. [Online]. Available at: https://gudok.ru/content/science_education/1616519/ (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [40] Preskriptivnaya analitika: opredelenie, princip raboty i primery [Prescriptive Analytics: Definition, Working Principle, and Examples]. [Online]. Available at: <https://www.investopedia.com/terms/p/prescriptive-analytics.asp> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [41] Kak cifrovizaciya menyaet zheleznnye dorogi v Rossii i mire [How digitalization is changing railways in Russia and around the world]. [Online]. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/6842d77e9a79477d0ae68392?from=copy> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [42] Kak iskusstvennyj intellekt menyaet tekhnicheskoe obsluzhivanie ZHD transporta? [How is artificial intelligence changing the maintenance of railway transport?]. [Online]. Available at: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).

- [43] S.A. Frolenkov, “*Sovershenstvovanie diagnostiki kontaktnoj seti elektrificirovannyh zheleznih dorog na osnove skvoznyh cifrovih tekhnologij [Improvement of Diagnostics of the Contact Network of Electrified Railways Based on End-to-End Digital Technologies]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia, 2024 (in Russian).
- [44] 10 novyh tekhnologij i innovacij v zhelezнодороzhnoj otrasli v 2025 godu [10 New Technologies and Innovations in the Railway Industry in 2025]. [Online]. Available at: <https://innovanews.ru/info/innovations/10-novykh-tekhnologij-i-innovatsij-v-zhelezнодороzhnoj-otrasli-v-2025-godu/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [45] Preskriptivnaya analitika [Prescriptive analytics]. [Online]. Available at: <https://rzdigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/> (Accessed on 29.07.2025) (in Russian).
- [46] Rostekh razrabotal «umnyj» kompleks dlya prediktivnoj diagnostiki oborudovaniya [Rostec has developed a smart complex for predictive diagnostics of equipment]. [Online]. Available at: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-razrabotal-umnyy-kompleks-dlya-prediktivnoj-diagnostiki-oborudovaniya/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [47] Chto takoe obsluzhivanie po fakticheskomu tekhnicheskomu sostoyaniyu [What is actual technical condition maintenance?] [Online]. Available at: <https://blog.vibray.ru/post/14/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [48] Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya po fakticheskomu sostoyaniyu [The system of maintenance and repair of equipment based on its actual condition]. [Online]. Available at: <https://rempromob.ru/obsluzhivanie-po-fakticheskemu-sostojaniyu-ofs/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [49] Vnedrenie tekhnologij cifrovoy zheleznoj dorogi – kak novye innovacii izmenyat transportnuyu otrasl' [The introduction of digital railway technologies – how new innovations will change the transportation industry]. [Online]. Available at: <https://rusbiletnapoezd.ru/tickets/articles/vnedrenie-tekhnologii-cifrovoy-zeleznoj-dorogi/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [50] A.V. Ozerov and A.P. Kuropteva, “Advanced diagnostic and monitoring systems for railways”, *Nauka i tekhnologii zheleznih dorog [Railway Science and Technology]*, vol. 8, no. 1(29), pp. 3-13, 2024 (in Russian).
- [51] S.Yu. Stadnichenko, “Intelligent components for the system of automated monitoring and diagnostics in railway transport”, *Molodoj uchenyj [Young scientist]*, no. 11 (46), pp. 98-102, 2012 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Рыжова Елена Львовна, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Elena L. Ryzhova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.316.9:622

EDN CKNLDB

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ШАХТНОГО КАБЕЛЯ

А.И. БелошистовORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: BeloshAlex@yandex.ruНаучно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного электрооборудования*Донецк, Россия***А.Л. Серов**ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ruНаучно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного электрооборудования*Донецк, Россия***А.А. Белошистов**ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ruНаучно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного электрооборудования*Донецк, Россия*

Разработано микропроцессорное устройство опережающего защитного отключения шахтного кабеля, предназначенное для защиты от аварийных и нештатных режимов работы подземных электрических сетей с изолированной нейтралью и служащее для встраивания в рудничные коммутационные аппараты управления. Разработанное устройство сопоставлено с имеющимися на рынке аналогами. Приведены результаты испытаний параметров микропроцессорного устройства в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: защита кабеля, комплексная защита отходящего присоединения кабеля, микропроцессорные устройства защиты, опережающее отключение.

Для цитирования: Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорное устройство опережающего защитного отключения шахтного кабеля // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 61-73. EDN CKNLDB

MICROPROCESSOR DEVICE FOR ADVANCE PROTECTIVE DISCONNECTION OF SHAFT CABLE

A.I. Beloshistov

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: BeloshAlex@yandex.ru

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment
Donetsk, Russia

A.L. Serov

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ru

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment
Donetsk, Russia

A.A. Beloshistov

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ru

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment
Donetsk, Russia

Abstract. The paper presents a microprocessor device of advanced protective disconnection of mine cable designed for protection against emergency and non-operational modes of operation of underground electric networks with isolated neutral. The device is used for integration into mine switching devices of control. The developed device is compared with analogs available on the market. The results of testing the parameters of the microprocessor device under various operating conditions are presented.

Keywords: cable protection, integrated protection of outgoing cable connection, microprocessor protection devices, advance disconnection.

For citation: A.I. Beloshistov, A.L. Serov, A.A. Beloshistov, "Microprocessor device for advance protective disconnection of shaft cable", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 61-73, 2025. EDN CKNLDB

I. Введение

Тяжелые условия эксплуатации в подземных выработках предъявляют к рудничному электрооборудованию ряд требований, соблюдение которых обеспечивает безопасность и надежность его обслуживания. Статистически наиболее частое воспламенение метановоздушной смеси в шахтах происходит из-за повреждения силового кабеля [1]. Основным источником возгорания нередко является открытая электрическая дуга, которая возникает в месте повреждения изоляции токопроводящей жилы. В соответствии с действующими правилами безопасности, подземные участковые сети должны оборудоваться защитным отключением, обеспечивающим постоянный контроль изоляции и автоматическим отключением сети при возникновении опасных утечек. Из-за серии крупных аварий, в частности, на шахте «Северная», приказом Ростехнадзора от 31 октября 2016 г. № 450 (введен в действие с 31 мая 2017 г.) был изменен первый абзац пункта 417 «Правил

безопасности в угольных шахтах» [2]. Изменения вступили в силу с 01.01.2020 г. Пункт 417 «Правил безопасности в угольных шахтах» требует защиты, которая обеспечивает при повреждении наружной оболочки кабеля опережающее отключение напряжения с кабеля до повреждения изоляции основных жил и возникновения короткого замыкания. На данный момент ни один коммутационный аппарат, выпускаемый нашими заводами, не обладает такой защитой, что сужает диапазон их применения.

В 1970-80-х гг. была разработана система электроснабжения с быстродействующим отключением места повреждения шахтного кабеля от источников питания за 3-5 мс. Она могла обеспечивать надежную взрывозащиту для гибких шахтных кабелей, однако ввиду сложности элементов так и не получила своего развития [3, 4].

Решение проблемы взрывозащиты шахтных кабелей возможно при создании оболочки, которая объединяет в себе гибкость резины и прочность металла. Однако на сегодняшний день нет материала, удовлетворяющего этим качествам. Для решения данной проблемы разрабатывались технические решения, позволяющие вводить в конструкцию кабеля защитные элементы, которые делают возможным получение сигналов на отключения поврежденного кабеля до пробоя его изоляции.

В современных зарубежных системах для угольных шахт фирм *Promos, Endis, Joy, Pirelli* применяют кабели с двумя экранами. Так, например, в кабеле для питания передвижных горных машин и трансформаторных подстанций *PROTOMONT(V)* между оболочкой и заполнителем размещен изолированный от земли экран в виде оплетки из медных и стальных проволок. Конструкция такого кабеля приведена на рис. 1.

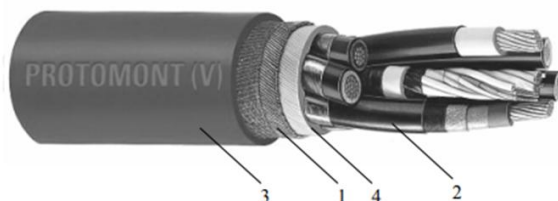


Рис. 1. Кабель с двойным экраном PROTOMONT(V) фирмы Pirelli:

1 – внешний защитный экран в виде концентрической оплетки из медных и стальных проволок, 2 – заземляющий экран из токопроводящей резины для каждой из основных жил, 3 – наружная оболочка из специальной полихлорвиниловой смеси, 4 – наполнитель Gm1b

Fig. 1. Pirelli PROTOMONT (V) dual shield cable:

1 – an external protective screen in the form of a concentric braid of copper and steel wires, 2 – an earthing screen of conductive rubber for each of the main conductors, 3 – an outer shell of a special PVC mixture, 4 – a filler Gm1b

При повреждении наружной оболочки кабеля происходит замыкание защитного экрана с заземляющим экраном основных жил. В результате срабатывает защитное устройство, снимая напряжение с кабеля до момента повреждения изоляции основных жил и возникновения короткого замыкания.

Действующими «Правилами безопасности в угольных шахтах» (с изменениями на 25 сентября 2018 г.) предусматривается защита работников от поражения электрическим током в подземных электроустановках с изолированной нейтралью аппаратами защиты от утечек тока с автоматическим отключением поврежденной сети. При этом защита электрической сети от опасных утечек тока на землю осуществляется одним отключающим аппаратом в комплексе с аппаратом защиты от утечки тока на всю электрически связанную сеть (подключенную к одному трансформатору). Данные требования обусловлены необходимостью обеспечить безопасные условия эксплуатации электрооборудования при стабильных защитных характеристиках аппаратов защиты от токов утечки. При параллельной работе нескольких аппаратов защиты происходит изменение защитных характеристик, обусловленное взаимным влиянием источников оперативного тока и внутренним сопротивлением самого аппарата защиты [5].

Создание средств защиты, имеющих высокую устойчивость против ложных срабатываний, имеет большое значение для обеспечения стабильной работы угольных предприятий.

Переходные процессы, обусловленные контакторной коммутацией электропотребителей шахтных участковых сетей, сопровождаются кратковременным повышением тока в оперативной цепи устройства контроля сопротивления, что способно вызвать ложное срабатывание последнего. Практический интерес представляет исследование воздействия коммутационных процессов в участковой электросети на устойчивость работы устройства контроля сопротивления изоляции дополнительного экрана кабеля относительно заземляющей жилы.

Одной из основных причин ложных срабатываний аппаратов защиты от токов утечки на землю является возникновение напряжения между нейтралью сети и заземляющим проводом при переходном процессе, связанном с отключением электродвигателей. Это обусловлено тем, что при отключении контактором двигателя дуга гаснет в одной из фаз ранее, чем в двух остальных, трехфазная система превращается в двухфазную, и в сети происходит переходной процесс.

Цель исследований – уточнение специфики влияния факторов, обусловленных конфигурацией электросети участка шахты, на изменение оперативного тока устройства контроля сопротивления изоляции при коммутациях электродвигателя.

II. Описание разработанных решений

Исследования проводились на макете низковольтных кабельных электрических сетей, применяемом в горнорудной промышленности с использованием кабеля типа КГВЭУШ, конструкция которого содержит защитный экран и асинхронный электродвигатель мощностью 55 кВт.

В соответствии с правилами безопасности, кабельные линии электро-снабжения должны снабжаться средствами защиты от токов утечки, обеспечивающими условия безопасной эксплуатации электротехнических комплексов за счет постоянного контроля сопротивления изоляции. Поэтому, макет сети содержит аппарат защиты от токов утечки типа АЗУР-1 [6,7].

Изменяемые параметры электрической сети электрической сети приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры сети при коммутации электродвигателя

Table 1.
Network parameters during electric motor switching

Параметр	Длина кабеля, км				
	~0,9	~2,8	~4,7	~6,1	~8,5
Емкость силовых фаз относительно заземляющей жилы, мкФ/фаза	0,14	0,39	0,64	0,84	1,14
Емкость заземляющего провода относительно защитного экрана, мкФ	0,26	0,73	1,19	1,56	2,12
Емкость силовых фаз относительно защитного экрана, мкФ/фаза	0,09	0,34	0,59	0,76	1,09

Приведенные длины рассчитаны на основе типичных удельных емкостей кабеля КГВЭУШ. В макетной установке увеличение емкости достигалось параллельным подключением эталонных конденсаторов к жилам кабеля для имитации протяженных линий.

На рис. 2 приведена схема замещения электрической сети с аппаратом защиты и устройством защитного отключения кабеля. Используются следующие обозначения: $L_{к1}$ – суммарная индуктивность присоединительного трансформатора и компенсирующего дросселя аппарата защиты; $R_{к1}$ – активное сопротивление суммарной индуктивности $L_{к1}$; R_1 – ограничивающий резистор источника оперативного тока U_1 ; C_1 – емкость разделительного конденсатора аппарата защиты; C_{ϕ} – суммарная емкость силовых жил кабеля относительно заземляющего провода; $R_{из1}$ – суммарное сопротивление изоляции жил кабеля относительно заземляющего провода; C_3 – суммарная емкость жил кабеля относительно защитного экрана; $R_{из2}$ – суммарное сопротивление жил кабеля, относительно защитного экрана; $R_{(z1-z2)}$ – сопротивление изоляции заземляющего провода и защитного экрана; $C_{(z1-z2)}$ – емкость заземляющего провода относительно защитного экрана; $U_{сн}$ – напряжение смещения нейтрали; U_1 – напряжение оперативного источника

аппарата защиты от токов утечки на землю; U_2 – напряжение оперативного тока блока защиты кабеля; C_2 – емкость разделительного конденсатора блока контроля кабеля; R_{yt} – сопротивление утечки кабеля.

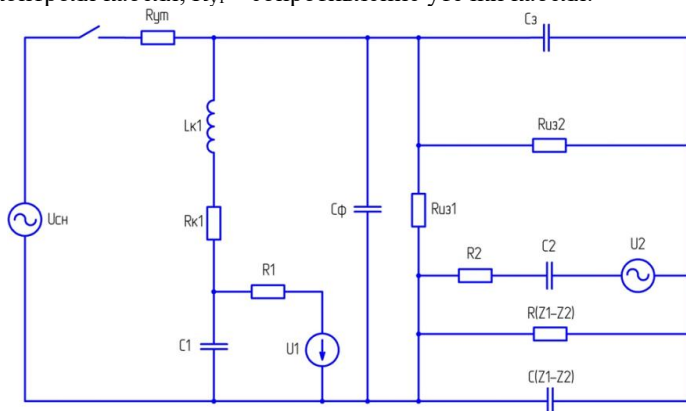


Рис. 2. Схема замещения электрической сети

Fig. 2. Electrical network diagram

Характерная осциллограмма переходных процессов, происходящих при включении электродвигателя, представлена на рис. 3.

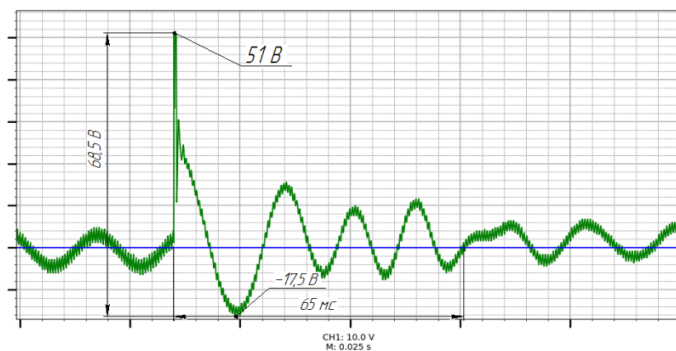


Рис. 3. Осциллограмма переходного процесса при включении электродвигателя

Fig. 3. Oscillogram of the transient process when the electric motor is turned on

На рис. 4 представлена характерная осциллограмма переходного процесса, происходящего при отключении электродвигателя.

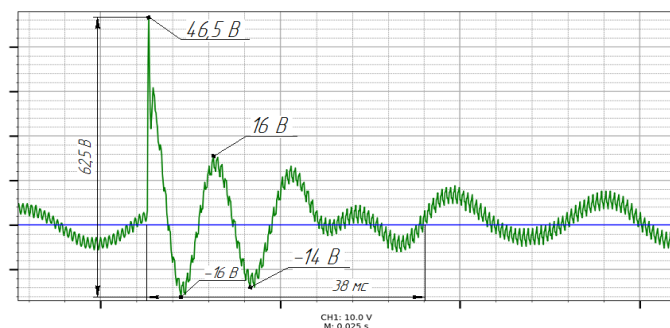


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса при отключении электродвигателя

Fig. 4. Oscillogram of transient process in case of electric motor shutdown

Осциллограммы переходных процессов были зарегистрированы на контролируемой линии кабеля между фазным проводником и цепью заземления.

Анализ полученных результатов показал, что размах переходного напряжения при коммутации электродвигателя не превышает 63 В. При этом остаточное напряжение в контролируемой цепи, обусловленное емкостью кабеля, не превышает 6,9 В. Длительность переходного периода при коммутации электродвигателя находится в пределах 40÷65 мс в зависимости от емкости кабеля.

Исходя из проведенного анализа, был предложен следующий алгоритм работы устройства защиты кабеля.

1. Контроль целостности цепи «защитный экран – заземляющая жила» выполнять на оперативном токе повышенной частоты. Данный способ контроля позволяет с большой достоверностью контролировать выше-названную цепь с обеспечением самоконтроля элементов схемы.

2. Состояние сопротивления изоляции цепи «защитный экран – заземляющая жила» осуществлять постоянным оперативным током, непосредственно при включении коммутационного аппарата, при отключенном блоке предварительного контроля изоляции коммутационного аппарата, с задержкой на включение, достаточной для измерения.

С учетом проведенных исследований и полученных результатов в ГБУ «НИИВЭ» разработано микропроцессорное устройство опережающего защитного отключения шахтного кабеля, выполненного в виде блока, встраиваемого в рудничный коммутационный аппарат – блок БЗК. Конструктивно он выполнен в виде пластмассового корпуса, на основании которого крепится вилка соединителя и печатная плата с элементами (рис. 5) и также ключ для безошибочной установки блока на свое место в аппарате. После

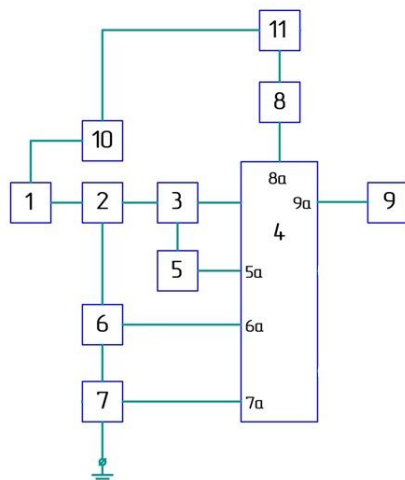


Рис. 6. Структурная схема блока БЗК:

1 – источник питания; 2 – источник питания усилителя; 3 – стабилизированный источник питания микроконтроллера; 4 – микроконтроллер; 5 – формирователь уставок срабатывания; 6 – усилитель оперативного переменного напряжения; 7 – измерительный трансформатор; 8 – узел управления; 9 – исполнительное реле; 10 – источник оперативного тока; 11 – коммутирующее реле

Fig. 6. Block diagram of BZK block:

1 – power supply; 2 – amplifier power supply; 3 – stabilized microcontroller power supply; 4 – microcontroller; 5 – trigger setting generator; 6 – operational alternating voltage amplifier; 7 – measuring transformer; 8 – control unit; 9 – executive relay; 10 – operational current source; 11 – switching relay

Измерение состояния изоляции происходит до момента включения коммутационного аппарата от источника оперативного тока, через узел управления реле коммутации цепи предварительного контроля изоляции К1.1. Величина, пропорциональная сопротивлению изоляции, поступает на вход микроконтроллера. Если в период измерения сопротивление изоляции соответствует заданным параметрам, выдается разрешительный сигнал на включение коммутационного аппарата. При включенном коммутационном аппарате контроль сопротивления осуществляется общесетевым аппаратом защиты от токов утечки [9, 10].

Уставка срабатывания блока определяется величиной падения напряжения на резисторе R2, R3 и устанавливаются регулировочными резисторами R1. Фирма *BENDER* (БЕНДЕР) выпускает для кабелей с двумя экранами специальные блоки защиты RM475 – устройство для контроля шлейфов. Сравнительные характеристики блока защиты кабеля БЗК и устройство для контроля шлейфов RM475 представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Сравнительные характеристики блоков БЗК и RM475

Table 2.
Comparative characteristics of BZK and RM475 blocks

Параметры	Блок БЗК	Блок RM475
Номинальное напряжение, В	36/12	230
Потребляемая мощность, В·А, не более	8	-
Сопротивление срабатывания при сопротивлении цепи «защитный экран – заземляющая жила», Ом, не более	10	200
Сопротивление срабатывания при сопротивлении заземляющей жилы относительно защитного экрана, кОм, не менее: – для силовых цепей напряжением 660 В – для силовых цепей напряжением 1140 В	35±5* и 110±30** 110±10* и 300±60**	1
Контроль обрыва цепи заземления	Да	Да

* – уставка «Аварийная», ** – уставка «Предупредительная»

Устройство защитного отключения кабеля совместно с аппаратом защиты от токов утечки на землю обеспечивают комплексную защиту отходящего присоединения кабеля с элементами селективной защиты.

Зоны действия аппарата защиты от утечки тока на землю:

- 1) зона защиты человека (ток утечки не превышает 25 мА);
- 2) зона защиты от пожара (ток утечки не превышает 25 мА);
- 3) контроль состояния изоляции кабеля (сопротивление симметричной трехфазной утечки, предварительный контроль изоляции кабеля).

Зона действия устройства опережающего защитного отключения включает:

- 1) состояние цепи «заземляющий провод – дополнительный экран» (замыкание, увеличение сопротивления цепи);
- 2) сопротивление изоляции цепи «заземляющий провод – дополнительный экран»;
- 3) обрыв цепи «заземляющий провод – дополнительный экран».

Проведенные лабораторные испытания блока БЗК подтвердили соответствие основных технических характеристик проекта ТУ 27.12.23-002-00217159-2023. Эксперименты проводились на двух стандартных уровнях напряжения промышленных сетей – 660 В и 1140 В, для которых предназначен блок БЗК. Результаты, полученные в ходе испытаний, представлены в виде диаграмм на рис. 7.

Испытания подтвердили стабильность параметров блока защиты кабеля БЗК при изменении напряжения питания и температуры отгружающей среды в диапазонах, предусмотренных ТУ.

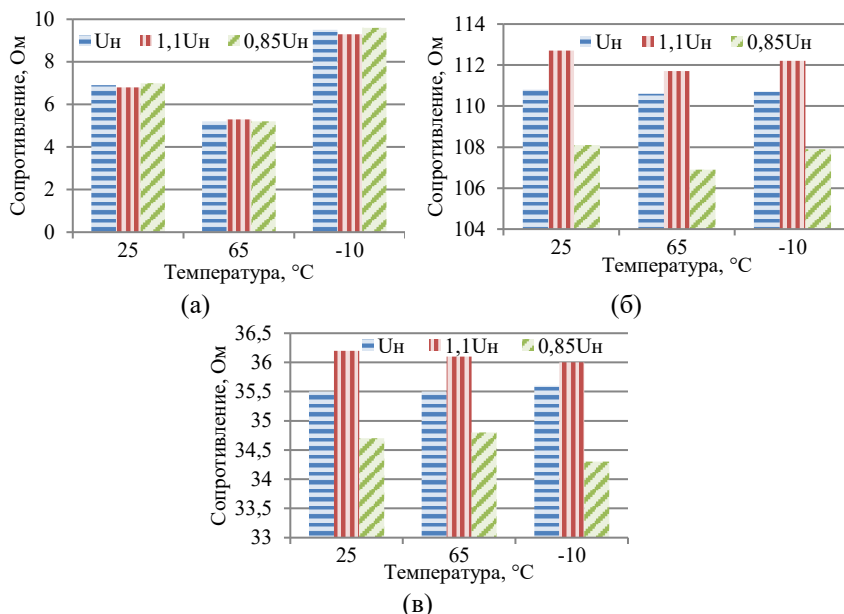


Рис. 7. Сопротивления срабатывания в зависимости от температуры окружающей среды и напряжения питания при: сопротивлении цепи «защитный экран – заземляющая жила» (а); сопротивлении заземляющей жилы относительно защитного экрана при напряжении 1140 В (б) и 660 В (в)

Fig. 7. Response resistances depending on the ambient temperature and supply voltage: resistance of the circuit «protective screen – grounding conductor» (a); resistance of the grounding conductor relative to the protective screen at 1140 V (b) and 660 V (в)

V. Заключение

Применение устройства БЗК позволяет расширить функциональные возможности рудничных коммутационных аппаратов и обеспечивает более полную защиту обслуживающего персонала. Решение проблемы защиты кабелей при повреждении оболочки позволяет выполнить требования п. 417 Правил безопасности в угольных шахтах РФ.

© Белошистов А.И., 2025

© Серов А.Л., 2025

© Белошистов А.А., 2025

Поступила в редакцию 09.06.2025

Принята к публикации 20.06.2025

Received 09.06.2025

Accepted 20.06.2025

Библиографический список

- [1] Гришин М.В. Исследование защитных свойств экранов шахтных кабелей // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2007. С. 54-60.
- [2] Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изм. 25.09.2018), 2018. – 113 с.
- [3] Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. М.: Недра, 1980. – 334 с.
- [4] Фролкин В.Г. Быстродействующая защита шахтных участковых сетей. М.: Недра, 1986. – 125 с.
- [5] Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М.: Недра, 1982. – 151 с.
- [6] Приказ Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. №507 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Введ.: 01.01.2021. – 120 с.
- [7] ГОСТ Р 58585-2019. Оборудование горно-шахтное. Общие требования безопасности к системам электроснабжения и управления. Введ.: 09.10.2019. М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.
- [8] Слесарев А.И., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров. Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 136 с.
- [9] Горобец А.И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы). Киев: «Техника», 1985. – 311 с.
- [10] Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Киев: МК-Пресс, 2005. – 279 с.

References

- [1] M.V. Grishin, "Issledovanie zashchitnykh svoystv ekranov shahtnykh kabelej. [Study of the protective properties of mine cable screens]", *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*, pp. 54-60, 2007 (in Russian).
- [2] Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shahtah [Safety rules in coal mines]", 2018 (in Russian).
- [3] V.P. Kolosyuk, *Zashchitnoe otklyuchenie rudnichnykh elektroustanovok [Protective shutdown of mine electrical installations]*. Moscow: Nedra, 1980 (in Russian).
- [4] V.G. Frolkin, *Bystrodejstvuyushchaya zashchita shahtnykh uchastkovykh setej [Fast-acting protection of mine district networks]*. Moscow: Nedra, 1986 (in Russian).
- [5] V.S. Dzyuban, *Apparaty zashchity ot tokov utechki v shahtnykh elektricheskikh setyah [Devices for protection against leakage currents in mine electric networks]*. Moscow: Nedra, 1982 (in Russian).
- [6] Order of Rostekhnadzor dated Dec. 8, 2020 no. 507 "Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shahtah [On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety Rules in Coal Mines"]", 2021 (in Russian).
- [7] Mining equipment. General safety requirements for power supply and control systems, GOST R 58585-2019. Moscow: Standartinform, 2019.

- [8] A.I. Slesarev, E.V. Moisejkin and Yu.G. Ust'yancev, *Aspekty proektirovaniya el-ektronnyh skhem na osnove mikrokontrollerov* [Aspects of designing electronic circuits based on microcontrollers]. Ekaterinburg: UrFU, 2018 (in Russian).
- [9] A.I. Gorobec, *Spravochnik po konstruirovaniyu radioelektronnoj apparatury (pechatnye uzly)* [Reference book on radio electronic equipment design (printing units)]. Kiev: Tekhnika, 1985 (in Russian).
- [10] M. Braun, *Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovanie*. [Power supplies. Calculation and design]. Kiev: MK-Press, 2005 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белошистов Александр Иванович, заведующий комплексным научно-исследовательским отделом электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Aleksandr I. Beloshistov, head of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

Серов Андрей Леонидович, заведующий лабораторией комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Andrey L. Serov, head of the laboratory of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

Белошистов Алексей Александрович, инженер-конструктор комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Alexey A. Beloshistov, design engineer of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

УДК 537.86

EDN KIWFY

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВУХОСНОГО МАГНИТНОГО
ИЗЛУЧАТЕЛЯ КИЛОМЕТРОВОГО
(ДЛИННОВОЛНОВОГО) ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Л.П. Барабанова

ORCID: 0000-0002-3784-3787 e-mail: pbarabanova@yandex.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

Н.А. Кузнецов

ORCID: 0000-0001-6378-1156 e-mail: nick_phys@mail.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

В.С. Леонтьева

ORCID: 0009-0002-4118-1357 e-mail: leon@dksta.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

Разработан программно-аппаратный комплекс для реализации метода навигации беспилотных средств, одним из ключевых компонентов является двухосный магнитный излучатель километрового (длинноволнового) диапазона частот. Излучатель предназначен для создания переменного магнитного поля с характеристиками, позволяющими определять положение приемника относительно передатчика. При этом актуальным является определение охранной зоны излучателя. Для решения этой задачи выполнено математическое моделирование магнитного поля магнитного излучателя на основе использования закона Био-Савара-Лапласа. Полученные результаты моделирования были подтверждены путем экспериментальных исследований напряженности магнитного поля излучателя с помощью измерителя электромагнитного поля. Определена санитарная охранная зона в соответствии с требованиями п. 7.4. СанПиН 2.2.4.3359-16.

Ключевые слова: излучатель, магнитное поле, математическая модель, навигация, охранная зона.

Для цитирования: Барабанова Л.П., Кузнецов Н.А., Леонтьева В.С. Математическое моделирование магнитного поля двухосного магнитного

излучателя километрового (длинноволнового) диапазона частот системы электромагнитного позиционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 74-83. EDN KIWUFY

MATHEMATICAL SIMULATION OF MAGNETIC FIELD OF KILOMETER (LONG-WAVE) FREQUENCY RANGE BIAxIAL MAGNETIC EMITTER OF ELECTROMAGNETIC POSITIONING SYSTEM

L.P. Barabanova

ORCID: 0000-0002-3784-3787 e-mail: pbarabanova@yandex.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

N.A. Kuznetsov

ORCID: 0000-0001-6378-1156 e-mail: nick_phys@mail.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

V.S. Loenteva

ORCID: 0009-0002-4118-1357 e-mail: leon@dksta.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

Abstract. The paper is devoted to the development of a software and hardware complex for the implementation of the unmanned vehicle navigation method, one of the key components of which is a biaxial magnetic emitter of a kilometer (long-wave) frequency range. The emitter is designed to create an alternating magnetic field with characteristics that allow determining the position of the receiver relative the transmitter. The definition of the emitter's protection zone is relevant. Mathematical modeling of the magnetic field of a magnetic emitter is performed to solve this problem based on the use of the Biot-Savart law. The obtained simulation results were confirmed by experimental studies of the intensity of the magnetic field of the emitter using an electromagnetic field meter. The sanitary protection zone was determined in accordance with the requirements of paragraph 7.4. of the Sanitary Rules and Regulations of the Russian Federation (SanPiN) 2.2.4.3359-16.

Keywords: emitter, magnetic field, mathematical model, navigation, protective zone.

For citation: L.P. Barabanova, N.A. Kuznetsov and V.S. Loenteva, "Mathematical simulation of magnetic field of kilometer (long-wave) frequency range biaxial magnetic emitter of the electromagnetic positioning system", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 74-83, 2025. EDN KIWUFY

I. Введение

Расчет магнитных полей катушек с заданными параметрами и пространственным расположением является актуальной задачей, решаемой при создании измерительных приборов и систем различного назначения.

В КГТА им. Дегтярева ведется разработка программно-аппаратного комплекса, реализующего метод навигации с использованием поля двух магнитных диполей [1-3]. Частью разрабатываемого комплекса является двухосный магнитный излучатель километрового (длинноволнового) диапазона частот, назначением которого является создание переменного магнитного поля с особыми характеристиками, позволяющими в окружающем пространстве однозначно определять пространственное положение приемника относительно передатчика. Данный элемент комплекса попадает под требования эксплуатации, регламентируемые п.7.4. и СанПиН 2.2.4.3359-16 [4].

Целью данной работы является определение охранной зоны излучателя на основе математического моделирования его магнитного поля, последующая экспериментальная апробация полученного результата.

II. Объект исследования

Выполнено математическое моделирование магнитного поля двухосного излучателя на предмет определения зоны с величиной предельно допустимой напряженности для нахождения человека.

Двухосный магнитный излучатель выполнен в виде двух круглых взаимно перпендикулярных рамок, каждая имеет 20 витков из медного провода диаметром 2,0 мм, выполненного в шелкоковой изоляции, диаметр средней линии катушки составляет 60 см. Внешний вид катушек излучателей представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид катушек излучателей

Fig. 1. Appearance of radiator coils

Источником энергии излучения выступает генератор сигналов низкочастотный, его ЭДС создает ток в катушке излучателя. Величина тока измеряется при помощи измерительного шунта и милливольтметра. Частота излучения определяется частотометром. Для компенсации индуктивной составляющей импеданса излучателя служит, включенный последовательно с ним, магазин емкостей, настройка передатчика сводится к подбору величины электроемкости посредством установления нулевого сдвига фаз тока и напряжения, детектируемого при помощи осциллографа. Структурная схема передатчика (один канал) представлена на рис. 2. Основные характеристики передатчика представлены в табл. 1.

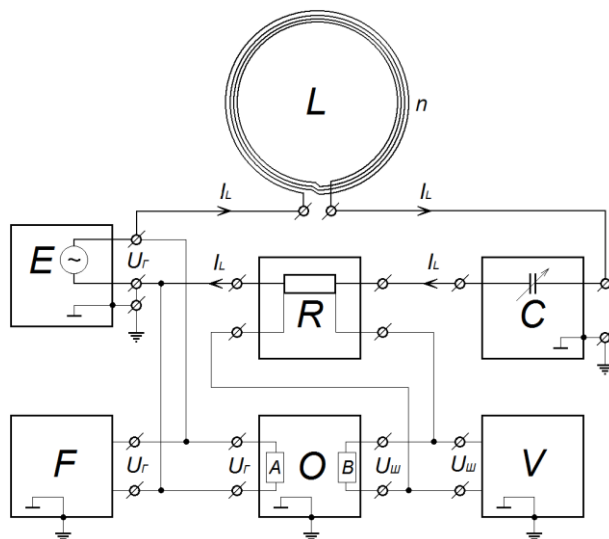


Рис. 2. Структурная схема передатчика (один канал):

L – катушка излучателя; E – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;
 R – шунт измерительный 75ШСМЗ-20-0.5; C – магазин емкостей P544;
 F – частотометр ЧЗ-57; O – осциллограф С1-157; V – милливольтметр ВЗ-38В

Fig. 2. Transmitter block diagram (one channel):

L – emitter coil; E – low-frequency signal generator ГЗ-109; R – measuring shunt 75ШСМЗ-20-0.5; C – capacities magazine P544; F – frequency meter ЧЗ-57; O – oscilloscope С1-157; V – millivoltmeter ВЗ-38В

Основные характеристики передатчика представлены в табл. 1.

Требования эксплуатации данного излучателя регламентируются п.7.4. и СанПиН 2.2.4.3359-16, где величина предельно допустимого уровня напряженности магнитного поля диапазона частот 30 кГц...3 МГц составляет 50 А/м.

Таблица 1.
Основные характеристики передатчика

Table 1.
Main characteristics of the transmitter

№ п/п	Координата	Частота излучения, Гц	Напряжение на шунте, мВ	Ток рамки излучателя, А	Эквивалентный ток рамки излучателя, А*виток
1.	X (красная)	96 153,84	15,0	4,0	80,0
2.	Y (зеленая)	104 166,66	15,0	4,0	80,0

III. Численный эксперимент

Математическое моделирование магнитного поля излучателя производилось с помощью программного обеспечения - приложения созданного в интегрированной среде разработки *Visual Studio* [5, 6] с использованием языка алгоритмического программирования C++ [7, 8], основой которого является использование закона Био-Савара-Лапласа [9], согласно которому элементарным участком проводника $d\vec{l}$ в точке определяемой $\vec{r}$ создается магнитное поле напряженностью $d\vec{H}$ (1).

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. \quad (1)$$

Согласно (1), в произвольной точке пространства величина вектора напряженности излучателей определится как:

$$\vec{H}_1 = \frac{I_1}{4\pi} \oint_{L_1} \frac{[d\vec{l}_1, \vec{r}_1]}{r_1^3}; \quad (2)$$

$$\vec{H}_2 = \frac{I_2}{4\pi} \oint_{L_2} \frac{[d\vec{l}_2, \vec{r}_2]}{r_2^3}, \quad (3)$$

где I_1 и I_2 – ток первого и второго излучателя.

На рис. 3 показано пространственное расположение магнитных диполей, ориентированных по направлениям создаваемым ими магнитных моментов – вдоль осей координат X и Y, им соответствуют замкнутые контуры L_1 и L_2 с направлениями обхода обозначенными векторами $d\vec{l}_1$ и $d\vec{l}_2$. Радиус векторы $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ определяют положение рассматриваемой точке пространства, для которой определяются значения напряженности магнитного поля создаваемое каждым из диполей.

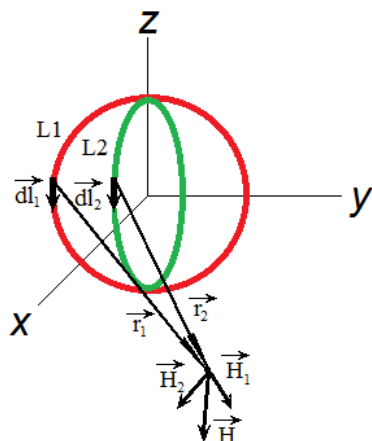


Рис. 3. Пространственное расположение векторных величин для произвольной точки пространства:
красный контур – первый излучатель; зеленый контур – второй излучатель

Fig. 3. Spatial arrangement of vector quantities for an arbitrary point in space:
red contour – first emitter; green contour – second emitter

Выражения (2) и (3) не позволяют аналитически определить значения вектора напряженности излучателей во всех точках окружающего пространства, однако позволяют определить его численно [10, 11].

В ходе численного математического моделирования были приняты следующие допущения:

- при численном определении значений интегралов (2) и (3) производилось разбиение протяженности контуров на 360 частей;
- расчет производился для пространства вне дистанции 3 см от рамок излучателей;
- шаг сетки пространственного разбиения был принят равным 2 мм;
- растр поля расчета 512 x 512 точек.

Проверка точности используемой математической модели осуществлялась по сличению результатов ее расчета с величинами напряженности магнитного поля, определенными на осях координат с использованием существующих аналитических выражений. С учетом принятых допущений математической модели, расхождение в расчетных величинах составило менее 0,1 %.

На рис. 4 и 5 приведен результат численного математического моделирования в сечении плоскости XOY – цветовые поля компонент вектора напряженности магнитного поля первого и второго излучателя соответственно. Места пересечения рамок излучателей с рассматриваемой плоскостью обозначены точками и перекрестьями соответствующие направлениям

протекания токов рамок I_1 и I_2 . Белыми точками ограничены замкнутые пространства, в которых величина рассматриваемой компоненты вектора напряженности магнитного поля превышает пороговое значение 50 А/м, определенное в [4].

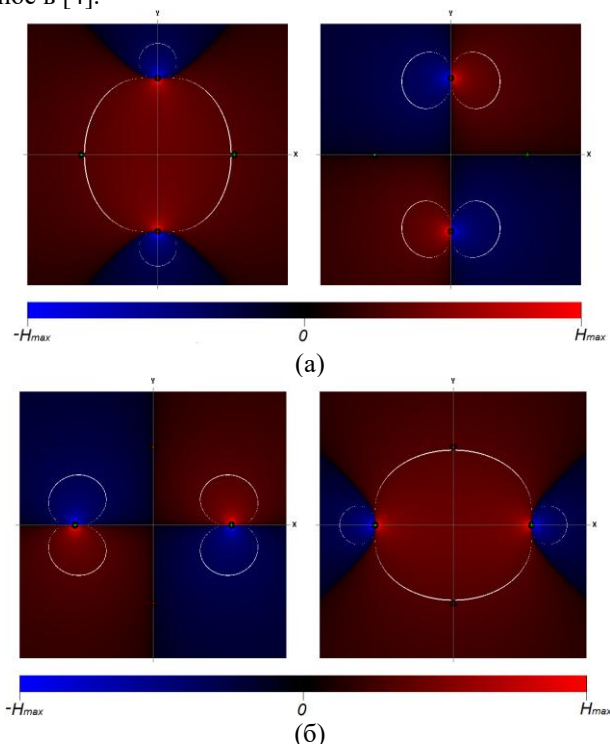


Рис. 4. Магнитное поле:
первого излучателя – слева $\vec{H}_{1x}(x,y)$, справа $\vec{H}_{1y}(x,y)$ (а);
второго излучателя – слева $\vec{H}_{2x}(x,y)$, справа $\vec{H}_{2y}(x,y)$ (б)

Fig. 4. Magnetic field of:
the first radiator – left $\vec{H}_{1x}(x,y)$, right $\vec{H}_{1y}(x,y)$ (a);
the second radiator – left $\vec{H}_{2x}(x,y)$, right $\vec{H}_{2y}(x,y)$ (b)

Результирующее значение вектора напряженности магнитного поля системы двух излучателей определяется по принципу суперпозиции магнитных полей, создаваемых каждым из излучателей в отдельности:

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2. \quad (4)$$

На рис. 5 представлено цветовое поле модуля напряженности магнитного поля системы двух излучателей. Белыми точками ограничено замкнутое пространство, в котором величина модуля вектора напряженности магнитного поля превышает допустимое пороговое значение.

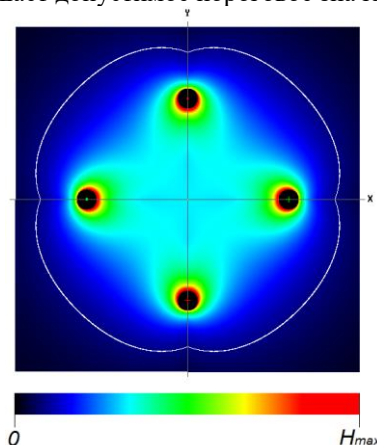


Рис. 5. Магнитное поле излучателя $\left|\vec{H}(x,y)\right|$ в горизонтальной плоскости, проходящей через его центр – белым показана линия уровня 50 А/м

Fig. 5. The magnetic field of the emitter $\left|\vec{H}(x,y)\right|$ in the horizontal plane passing through its center – white shows a level line of 50 A/m

Таким образом, по результатам численного математического моделирования предельная дистанция санитарной охранной зоны излучателя составляет 0,5 м. Полученный результат расчета экспериментально подтвержден измерением напряженности магнитного поля излучателя с помощью измерителя электромагнитного поля GM3120.

IV. Заключение

По результатам математического моделирования поля двухосного магнитного излучателя километрового (длинноволнового) диапазона частот системы электромагнитного позиционирования с дальнейшей экспериментальной апробацией определена охранный зона в соответствии с требованиями п. 7.4. СанПиН 2.2.4.3359-16 – зона с максимальным удалением от центра излучателей 0,5 метра для случая величины эквивалентного тока витка 80 А.

Полученный результат также может быть использован в оценке электромагнитной совместимости излучателя с иной аппаратурой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FZEF–2024–0001.

© Барабанова Л.П., 2025

© Кузнецов Н.А., 2025

© Леонтьева В.С., 2025

Поступила в редакцию 09.06.2025

Принята к публикации 24.07.2025

Received 09.06.2025

Accepted 24.07.2025

Библиографический список

- [1] Барабанова Л.П., Барабанов О.О. Эффективное решение задачи электромагнитного позиционирования на базе двухосного излучателя // Проблемы математического анализа. 2021. Вып. 109. С. 17-25.
- [2] Abrudan T.E., Xiao Z., Markham A., Trigoni N. Underground incrementally deployed magneto-inductive 3-d positioning network traian // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2016. Vol. 54. No. 8. P. 4376-4391. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2540722
- [3] Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С. 3-11.
- [4] СанПиН 2.2.4.3359-16. «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
- [5] Джонсон Б., Скибо К., Янг М. Основы Microsoft Visual Studio.NET 2003. М.: Русская Редакция, 2022. – 773 с.
- [6] Хандхаузен Р. Знакомство с Microsoft Visual Studio 2005 Team System. М.: Питер, Русская Редакция, 2021. – 402 с.
- [7] Понамарев В. Программирование на C++/C# в Visual Studio.NET 2003. М.: БХВ-Петербург, 2021. – 322 с.
- [8] Биллинг В.А. Основы программирования на C#. М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2021. – 488 с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. «Теоретическая физика», том II. 7-е. изд. М.: Наука, 1988. – С. 512.
- [10] Прудников А.П., Бычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981.
- [11] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. – 720 с.

References

- [1] L.P. Barabanova and O.O. Barabanov, “Effective solution of the problem of electromagnetic positioning based on two-axial radiator”, *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 255, no. 5, pp. 551-560, June 2021.
- [2] T.E. Abrudan, Zhuoling Xiao, A. Markham and N. Trigoni, “Underground incrementally deployed magneto-inductive 3-d positioning network traian”, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 54, no. 8, pp. 4376-4391, Aug. 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2540722
- [3] B.V. Pavlov, A.K. Volkovickij and E.V. Karshakov, “Nizkochastotnaya elektromagnitnaya sistema otnositel'noj navigacii i orientacii [Low-frequency electromagnetic

- relative navigation and orientation system]”, *Gyroscopy and Navigation*, no. 1, pp. 3-11, 2010 (in Russian).
- [4] SanPiN 2.2.4.3359-16, “«Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary and epidemiological requirements for physical factors at workplaces]”, (in Russian).
- [5] B. Johnson, M. Young and C. Skibo, *Osnovy Microsoft Visual Studio .NET 2003 [Bases of Microsoft Visual Studio .NET 2003]*. Moscow: Russian Edition, 2022 (in Russian).
- [6] R. Hundhausen, *Znakomstvo s Microsoft Visual Studio 2005 Team System [Introduction to Microsoft Visual Studio 2005 Team System]*. Moscow: Peter, Russian Edition, 2021 (in Russian).
- [7] V. Ponamarev, *Programmirovaniye na C++/C# v Visual Studio .NET 2003 [C++/C# Programming in Visual Studio .NET 2003]*. Moscow: BHV-Petersburg, 2021 (in Russian).
- [8] V.A. Billig, *Osnovy programmirovaniya na C# [Fundamentals of programming in C#]*. Moscow: Internet University of Information Technologies, Binom. Knowledge Laboratory, 2021 (in Russian).
- [9] L.D. Landau and E.M. Lifshic, *Teoriya polya [Field theory]*. Moscow: Science, 1988 (in Russian).
- [10] A.P. Prudnikov, Yu.A. Bychkov and O.I. Marichev, *Integraly i ryady [Integrals and series]*. Moscow: Nauka, 1981 (in Russian).
- [11] G. Korn and T. Korn, *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers]*. Moscow: Nauka, 1968 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Барабанова Любовь Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Lyubov P. Barabanova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), associate professor of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.

Кузнецов Николай Александрович, кандидат технических, заведующий кафедрой Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Nikolay A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.

Леонтьева Виктория Станиславовна, старший преподаватель Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Victoria S. Loenteva, senior lecturer of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.355:621.311

EDN OFUTYE

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

И.С. Токарев

ORCID: 0009-0003-2172-3830 e-mail: i.s.tokarev@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

В газовой отрасли широкое применение получили автономные электростанции с приводом от газопоршневых и дизельных двигателей. Газопоршневые электростанции, как правило, работают в постоянном режиме основного источника электроснабжения на производственном объекте. Дизельные электростанции применяются в качестве аварийного источника для поддержания основных систем жизнедеятельности объекта и нормального останова производственного процесса при потере питания от основного источника. В некоторых случаях они могут применяться для поддержания работы производства не на полную мощность. Для обеспечения бесперебойной работы автономной энергосистемы необходимо постоянно задействовать большее количество агрегатов электростанции, чем потребляемая мощность нагрузки – вращающийся резерв. Для решения задач оптимизации работы автономных энергосистем предлагается интеллектуальная система оптимального управления автономными энергоузлами, в которых буферные накопители энергии становятся ключевым элементом для динамической поддержки электрических генераторов, а предиктивный контроль на основе прогнозирования нагрузки обеспечивает проактивное управление всем энергоузлом.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, предиктивная аналитика, система накопления энергии, электростанция, энергоузел.

Для цитирования: Токарев И.С. Многофункциональная система накопления электрической энергии в газовой отрасли // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 84-97. EDN OFUTYE

MULTIFUNCTIONAL ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEM IN GAS INDUSTRY

I.S. Tokarev

ORCID: 0009-0003-2172-3830 e-mail: i.s.tokarev@gmail.com

Saint Petersburg Mining University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. Autonomous power plants powered by gas-piston and diesel engines are widely used in the gas industry. Gas-piston power plants, as a rule, operate in the constant mode of the main power source at the production facility. Diesel power plants are mainly used as an emergency power source to maintain the main systems of vital activity of the facility and the normal shutdown of the production process in case of loss of power from the main source. In some cases, they can be used to maintain the production process at less than full capacity. To ensure uninterrupted operation of an autonomous power system, it is necessary to constantly use a greater number of power plant units than the consumed load power – a spinning reserve. An intelligent system for optimal control of autonomous power units is proposed to solve the problems of optimizing the operation of autonomous power systems. Buffer energy storage is a key element for dynamic support of electric generators in this system, and predictive control based on load forecasting ensures proactive control of the entire power unit.

Keywords: intelligent control system, predictive analytics, energy storage system, power plant, energy hub.

For citation: I.S. Tokarev, “Multifunctional electric energy storage system in gas industry”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 84-97, 2025. EDN OFUTYE

I. Введение

Особенности функционирования автономных (изолированных) систем энергообеспечения связаны с конечным значением критериев мощности источников и потребителей. В первую очередь, на устойчивой работе такой энергосистемы сказываются статические и динамические характеристики мощности, в том числе, номиналы подключенных энергоустановок, показатели маневренности источников, т.е. их способность обеспечивать снижение и повышение нагрузки, а также параметры энергоприемников определяющие потребность в энергии в каждый момент времени, включая переходные процессы при включении, отключении и изменении полезной нагрузки.

Пример такой энергосистемы – типовой вахтовый поселок. Он представляет собой современный вахтовый комплекс при терминале и служит центром отгрузки углеводородного сырья, добываемого в прилегающей нефтегазоносной зоне. В непосредственной близости расположены несколько нефтяных месторождений. На территории действуют морской порт

и аэропорт, функционирует специализированная перевалочная база для обслуживания морской стационарной платформы. Транспортная инфраструктура включает:

- основной аэропорт;
- вертодром для оперативного обслуживания.

В поселке функционирует производственный комплекс. Терминал представляет собой современную морскую инфраструктуру, включающую:

- стационарный ледостойкий причал;
- подводную систему транспортировки сырья;
- комплекс береговых резервуаров;
- инженерные сооружения для швартовки и погрузки;
- вертолетную площадку;
- жилой модуль для персонала.

Терминал работает в круглосуточном режиме. В зимний период обеспечивается навигация с привлечением специализированных ледокольных судов для поддержания транспортной доступности. Производственный комплекс оснащен современным оборудованием соответствует всем требованиям промышленной безопасности и экологическим стандартам.

Климат поселка характеризуется суровостью с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Формирование климата происходит под влиянием арктических и атлантических воздушных масс.

Температурный режим:

- средняя температура в июле (самый теплый месяц): $+9,3^{\circ}\text{C}$;
- абсолютная максимальная температура воздуха: $+32,0^{\circ}\text{C}$;
- средняя температура в январе: $-17,9^{\circ}\text{C}$;
- абсолютная минимальная температура воздуха: $-44,0^{\circ}\text{C}$;
- продолжительность зимнего периода: 220-240 дней.

II. Постановка цели и задач исследования

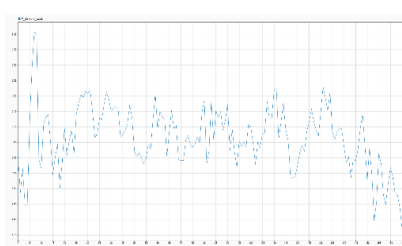
Параметры энергосистемы, включая характеристики источников, приведены в табл. 1.

Данные суточного, недельного и месячного профилей нагрузки подтверждают круглосуточный режим работы объекта без привязки к началу и окончанию трудового дня, а также показывают отсутствие зависимости от светового дня, что указывает на незначительную долю нагрузки на освещение и бытовые нужды (рис. 1). Особенности годового профиля определены географическим положением объекта, в связи с чем значительную долю мощности составляет обеспечение нагрузки на обогрев, в том числе, бытовых помещений и технологических линий. Минимальная мощность составляет 0,7 МВт, а максимальная – 7,5 МВт.

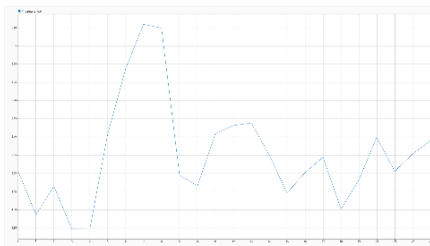
Таблица 1.
Параметры энергосистемы вахтового поселка

Table 1.
Parameters of the energy system of the rotational camp

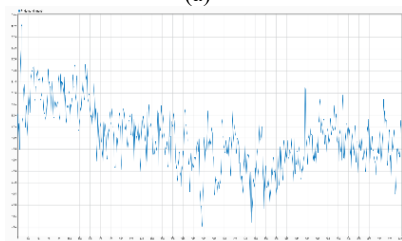
Источник энергии	МиниТЭЦ на базе газопоршневых агрегатов (ГПА)
Установленная мощность, МВт	9
Тип генераторов	DM5467
Электрическая мощность (кВт), $\cos\varphi=1,0$	1175
Электрическая мощность (кВА), $\cos\varphi=0,8$	1456
Количество генераторов, шт.	8



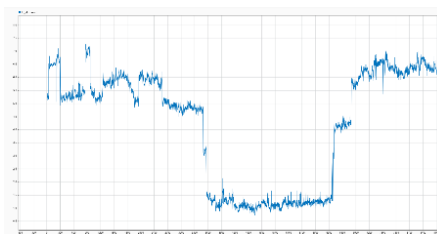
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. Профиль энергопотребления вахтового поселка:
суточный (а); недельный (б); месячный (в); годовой (г)

Fig. 1. Energy consumption profile of the rotational camp:
daily (a); weekly (b); monthly (v); annual (r)

Режим работы электростанции, обеспечивающий данную нагрузку, приведен на рис. 2. На рис. 3 представлен график использования мощности электростанции согласно профилю нагрузки.

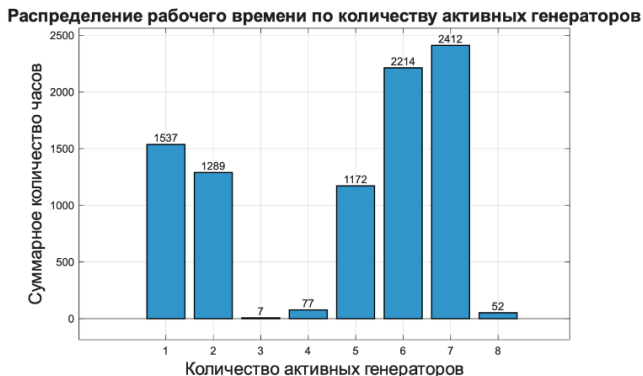


Рис. 2. Режим работы электростанции вахтового поселка.

Fig. 2. Operating mode of the power plant of the rotational camp

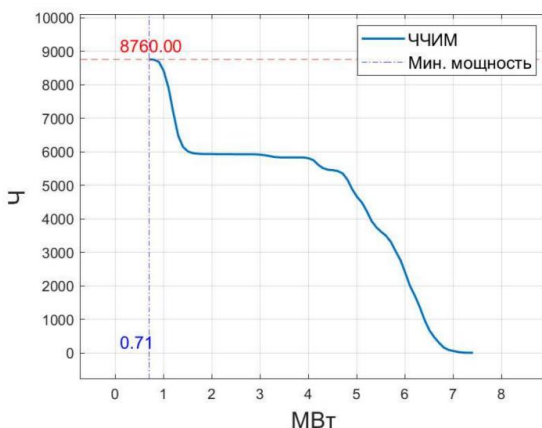


Рис. 3. График использования мощности электростанции

Fig. 3. Power plant capacity utilization schedule

III. Описание и обоснование предлагаемых методов решения поставленных задач

Согласно графикам загрузки генераторов и использования мощности, количество постоянно установленных генераторов превышает количество постоянно задействованных. Так, суммарное время работы электростанции на восьми генераторах составляет 52 часа в год. Также на количестве единовременно задействованного оборудования сказывается сезонность. Особенно это проявляется во времени работы на одном и двух генераторах. Это позволяет сделать вывод о том, что существует возможность

оптимизации технологического процесса данной мини-ТЭЦ путем перераспределения мощности по времени [1]. Техническим решением для этой проблемы является применение буферного накопителя (БНЭ) [2].

Применение БНЭ предъявляет требования к автоматике энергообъекта и, в первую, очередь к системе управления. На рис. 4 приведена типовая схема буферного накопителя, состоящего из сетевого инвертора, блока ограничителя перенапряжения, шины постоянного тока, блок накопителя на суперконденсаторах и блока аккумуляторных батарей. Данное решение зарекомендовало себя при подключении возобновляемых источников энергии. Наличие блока накопителей на основе суперконденсаторов обеспечивает выдачу большой мощности в течении короткого времени, а аккумуляторная батарея обеспечивает выдачу ограниченной мощности в течение длительного времени [3, 4].

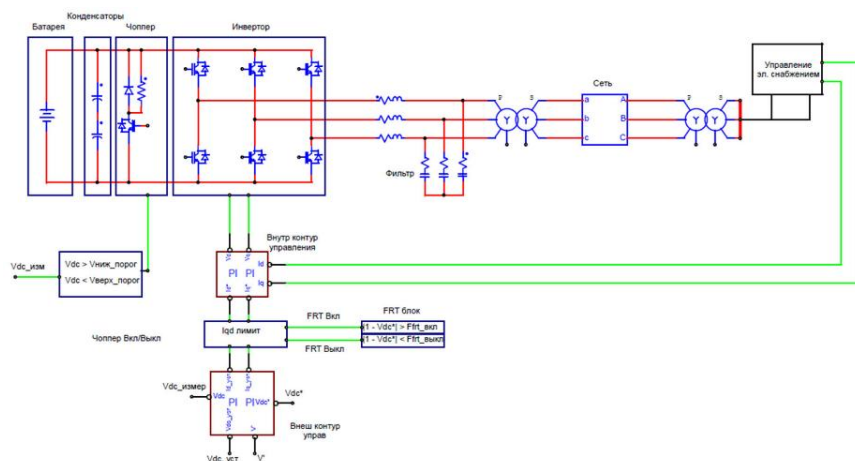


Рис. 4. Типовая схема буферного накопителя [3]

Fig. 4. Typical diagram of a buffer energy storage system [3]

Стандартные алгоритмы управления приведены на рис. 5. Данные решения обеспечивают только техническую возможность выдачи/приема мощности накопителем и формируют первый контур управления, при этом полноценное его использование возможно только при четком понимании состояния энергоузла.

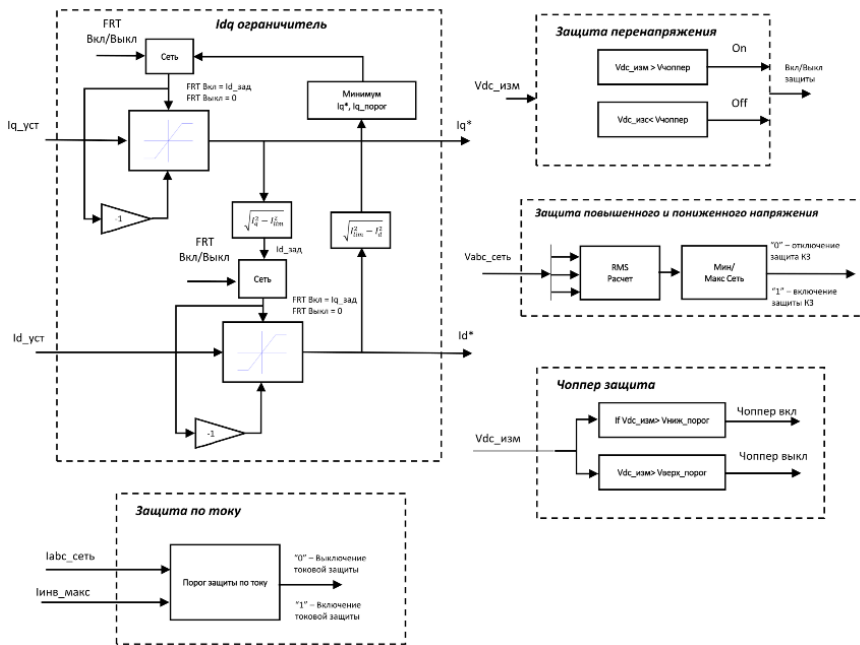


Рис. 5. Стандартные алгоритмы управления системой накопления энергии [5-7]

Fig. 5. Standard control algorithms for energy storage systems [5-7]

Вторым контуром управления, обеспечивающим основной экономический эффект, является модель узла электросети, которая учитывает экономические составляющие эксплуатации энергооборудования. Следует заметить, что условно быстрые процессы, соответствующие перекоммутации оборудования и резким изменениям режима технологического оборудования, оказывают значительное влияние на стоимостные характеристики, поскольку, требуют обеспечения резерва мощности, и их необходимо учитывать при моделировании. Контроль баланса энергопотребления позволяет исключить значительные искажения при верификации модели.

Параметры оптимизации модели включают:

- минимизацию количества запусков;
- минимизацию мощности;
- минимизацию стоимости энергии.

Основная задача моделирования системы электроснабжения – сформировать алгоритмы прогнозирования потребления энергии и мощности. Применение методов спектрального анализа позволяет получить дополнительную информацию о технологическом объекте, что обеспечит более достоверный прогноз.

На рис. 6 изображено представление дискретной функции, заданной на основании фактического профиля энергопотребления в виде гармонического ряда.

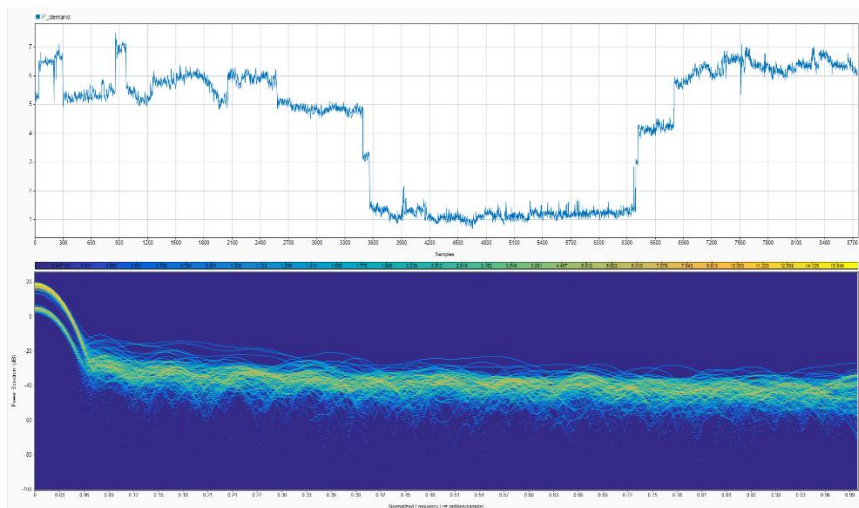


Рис. 6. Отображение функции профиля энергопотребления в виде гармонического ряда [8, 9]

Fig. 6. Displaying the energy consumption profile as a harmonic series [8, 9]

IV. Результаты расчета

В результате применения вышеупомянутых методов формируется модель, которая описывает характер поведения объекта во времени, что позволяет сделать прогноз потребления мощности, а также определить параметры буферного накопителя. Ниже представлены данные о работе буферного накопителя, функционирующего согласно прогнозу (рис. 7).

Диаграмма на рис. 7а показывает, что с внедрением буферного накопителя отпала необходимость включения восьмого генератора. Помимо этого, на рис. 7б представлены данные по количеству запусков генераторов за календарный год. Они существенно снизились.

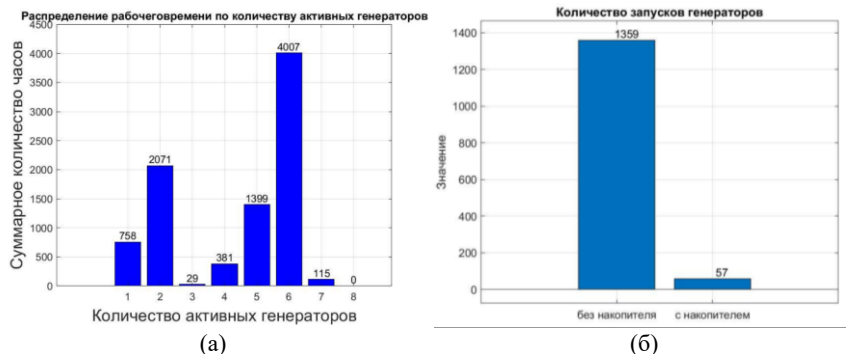


Рис. 7. Режим работы электростанции вахтового поселка с применением систем накопления энергии (а); зависимость количества включений генераторов от применения системы накопления энергии (б)

Fig. 7. Operating mode of the power plant of the rotational camp using energy storage systems (a); dependence of the number of generator starts on the use of the energy storage system (b)

На рис. 8 приведены данные по мощности (а) и энергии (б) буферного накопителя и их использования во времени.

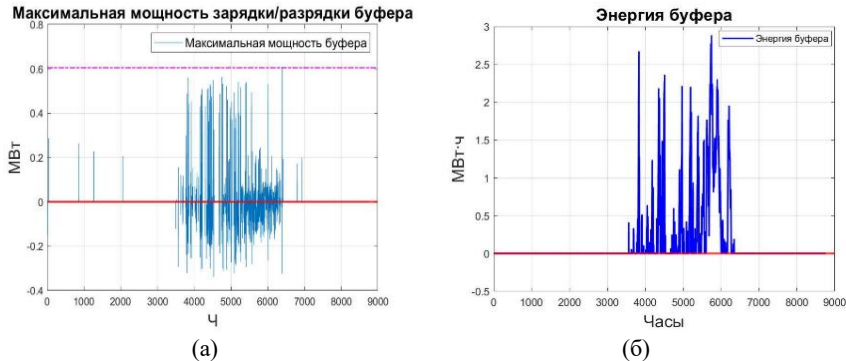


Рис. 8. Профиль мощности (а) и энергии (б) системы накопления энергии

Fig. 8. Power (a) and energy (b) profile of energy storage system

Необходимая мощность системы накопления энергии составляет 0,6055 МВт, необходимая энергоемкость – 2,8853 МВт·ч.

V. Обсуждение

Алгоритм управления силовым блоком на базе предиктивной диагностики обеспечивает глобальную оптимизацию на основе прогноза.

Алгоритм управления ГПА целенаправленно поддерживает стабильную высокую нагрузку (вблизи точки максимального КПД), используя прогноз для заблаговременного планирования. БНЭ берут на себя всю динамическую составляющую нагрузки, освобождая ГПА от необходимости маневрирования.

Предиктивная диагностика радикально изменила роль ДГ. Вместо частых включений для компенсации краткосрочных провалов или пиков (из-за инерции ГПА), ДГ включаются стратегически только для покрытия прогнозируемого длительного базиса или значительных отклонений, которые экономически невыгодно покрывать ГПА+БНЭ. Алгоритм минимизирует количество пусков как дорогостоящую операцию.

Алгоритм управления БНЭ (АКБ + СК) оптимально распределяет функции между компонентами БНЭ. Суперконденсаторы (СК) используются исключительно для мгновенной компенсации кратковременных (секунды) пиков мощности и пусковых токов, защищая генераторы и сеть.

Литий-ионные АКБ используются для сглаживания среднесрочных (минуты-десятки минут) колебаний нагрузки, компенсируя инерционность ГПА и позволяя ДГ включаться реже и работать стабильнее. Алгоритм активно управляет состоянием заряда (*SOC*) АКБ в рамках безопасных пределов (оптимизированный *DoD*) для продления срока службы.

Достижение критериев оптимизации узла сети:

1) сокращение числа запусков ДГ агрегатов (40-60 %) достигнуто благодаря двум ключевым факторам:

- прогнозирование позволяет заранее оценить необходимость включения ДГ и избежать его для краткосрочных нужд;
- буферизация БНЭ (в первую очередь СК и АКБ) берет на себя пики и провалы, которые раньше требовали пуска ДГ;

2) снижение расхода топлива более чем на 20 % получено за счет комбинации эффектов:

- ГПА работают постоянно в оптимальном по КПД режиме (высокая стабильная нагрузка);
- резкое сокращение работы ДГ на неэффективных низких нагрузках;
- минимизация энергозатратных пусков ДГ;
- исключение работы генераторов в режиме «горячего резерва» только для покрытия пиков;

3) снижение пиковой мощности и требуемой установленной мощности генераторов (*CAPEX*). Гибридная система БНЭ (СК+АКБ) позволила эффективно «срезать» пики нагрузки. Это дает возможность проектировать энергоузел с меньшей установленной мощностью генераторов на 15-20 %, так как пиковая мощность теперь определяется мощностью СК, а не генераторов;

4) повышение срока службы оборудования:

- ГПА и ДГ работают в более стабильных режимах, без резких скачков нагрузки и температурных перепадов, снижая механический и термический износ;
- оптимизация циклов работы БНЭ (особенно контроль *DoD* и токов для АКБ) максимизирует их жизненный цикл;
- снижение числа пусков ДГ напрямую уменьшает износ их пусковых систем и двигателя;

5) снижение углеродного следа. Значительное снижение расхода топлива (особенно ДГ) и оптимизация режимов работы напрямую ведут к сокращению выбросов *CO2* и других вредных веществ.

Тестирование на реальных эксплуатационных данных подтвердило высокую эффективность предложенной интегрированной системы управления. Алгоритмы успешно сгладили профиль потребляемой мощности генераторов, снизив его пиковость и волатильность. Наблюдалось устойчивое снижение пиковой мощности, потребляемой от генераторов на 15-30 %.

Достигнута высокая степень оптимизации работы энергоузла в соответствии с заданными критериями: подтверждено прогнозируемое сокращение пусков ДГ и расхода топлива, а также снижение требуемой установленной мощности. Значительно повысилось качество электроэнергии: отклонения частоты и напряжения были снижены до уровней, соответствующих жестким промышленным стандартам 60-70 % и 40-50 % снижения соответственно.

Наблюдалась эффективная и безопасная работа БНЭ: СК надежно обрабатывали пики, АКБ работали в заданных оптимальных пределах *SOC* и *DoD*, подтверждая правильность стратегии управления их ресурсом.

Экономические выводы.

1. Значительное снижение совокупной стоимости владения (TCO).

1.1. Капитальные затраты (*CAPEX*). Возможность уменьшения установленной мощности генераторного парка на 15-20 % за счет компенсации пиков СК приводит к прямой экономии на закупке дорогостоящих генераторов и сопутствующей инфраструктуры. Оптимальный подбор БНЭ (соотношение СК/АКБ) под конкретный профиль нагрузки минимизирует их стоимость при максимальном эффекте.

1.2. Операционные затраты (*OPEX*). Экономия топлива 18-25 % – основная статья снижения *OPEX*. Дополнительно – сокращение затрат на техобслуживание и ремонт генераторов (за счет снижения износа) и БНЭ (за счет щадящих режимов). Устранение штрафов за некачественную электроэнергию. Снижение затрат на резервные мощности («горячий резерв»).

1.3. Срок окупаемости. Интеграция БНЭ и системы предиктивного управления демонстрирует привлекательный срок окупаемости 2-5 года, в основном, за счет значительной экономии топлива и снижения затрат на обслуживание/ремонт.

2. Повышение надежности и снижение рисков.

- 2.1. Стабилизация работы генераторов и сети снижает риск аварийных остановов и связанных с ними простоев производства и убытков.
- 2.2. Продление срока службы основного оборудования (генераторы, БНЭ) отсрочивает крупные капитальные затраты на их замену.
- 2.3. Повышение качества электроэнергии снижает риск повреждения чувствительного нагрузочного оборудования.

3. Стратегическая ценность для автономных объектов.

- 3.1. Повышение рентабельности и конкурентоспособности удаленных объектов (шахты, буровые, острова), для которых энергетическая автономия и стоимость энергии критичны.
- 3.2. Снижение зависимости от дорогостоящих и логистически сложных поставок топлива (особенно дизельного) повышает энергетическую безопасность.
- 3.3. Снижение углеродного следа становится важным фактором соответствия экологическим стандартам и требованиям инвесторов.

VI. Заключение

Разработанная математическая модель энергообъекта, интегрирующая динамические характеристики всех ключевых компонентов (инерционные ГПА, более маневренные ДГ, высокодинамичные БНЭ с отдельными моделями литий-ионных АКБ и СК), доказала свою адекватность. Модель корректно отражает причинно-следственные связи между управляющими воздействиями и откликом системы на возмущения (изменения нагрузки).

Модель учитывает ограничения компонентов (максимальная/минимальная мощность ГПА/ДГ, токи заряда/разряда и глубину разряда (*DoD*) АКБ, энергоемкость и скорость отклика СК), что является критическим для практической реализуемости алгоритмов управления. Включение модели прогнозирования нагрузки как входного воздействия для управления позволило перейти от реактивного к проактивному управлению всей системой.

Адаптивный ПИД-регулятор напряжения продемонстрировал высокую эффективность в стабилизации напряжения в реальном времени. Его адаптивность позволила автоматически подстраивать коэффициенты при изменении режимов работы энергоузла (например, при переключении ведущего генератора или резком броске нагрузки), обеспечивая устойчивое качество электроэнергии даже при действии высокочастотных возмущений, которые не могут быть скомпенсированы медленными генераторами.

© Токарев И.С., 2025

Поступила в редакцию 14.07.2025

Принята к публикации 22.07.2025

Received 14.07.2025

Accepted 22.07.2025

Библиографический список

- [1] Беркович М.А., Крылов В.В. Накопители энергии в электроэнергетических системах М.: Энергоатомиздат, 2019. – 320 с.
- [2] Ильинский Н.Ф., Котеленец Н.Ф. Системы накопления энергии в распределённой энергетике СПб.: Политехника, 2020. – 288 с.
- [3] Prabhu J.A.X., Sharma S., Nataraj M., Tripathi D.P. Design of electrical system based on load flow analysis using ETAP for IEC projects // proc. IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), March 04-06, 2016, New Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584103
- [4] Соколов В.И., Тарасов В.И. Электрохимические накопители энергии М.: Химия, 2020. – 198 с.
- [5] Banerjee B., Jayaweera D., Islam S. Modelling and Simulation of Power Systems // Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration Studies in Systems, Decision and Control, vol 57, Jayaweera D. Cham: Springer International, 2016. – P. 15-26. DOI: 10.1007/978-3-319-30427-4_2
- [6] Voznesensky A., Kaplun D. Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 171313-171321. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956077.
- [7] Nithya C. and Preetha J. Roselyn, Development of grid-side converter-based FRT control and protection in a grid-connected solar photovoltaic park system under different control modes // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. 1009196. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1009196
- [8] Klionskiy D., Kupriyanov M., Kaplun D. Signal denoising based on empirical mode decomposition // Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19. No. 7. P. 5560–5570. DOI: 10.21595/jve.2017.19239
- [9] Kanatov I., Kaplun D., Butusov D., Gulvanskii V., Sinitca A. One technique to enhance the resolution of discrete fourier transform // Electronics. 2019. Vol. 8. 330. DOI: 10.3390/electronics8030330

References

- [1] M.A. Berkovich and V.V. Krylov, *Nakopiteli energii v elektroenergeticheskikh sistemah* [Energy storage devices in electric power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 2019 (in Russian).
- [2] N.F. Ilyinsky and N.F. Kotelenets, *Sistemy nakopleniya energii v raspredelyonnoy energetike* [Energy storage systems in distributed energy]. St. Petersburg: Polytechnic, 2020 (in Russian).
- [3] J.A.X. Prabhu, S. Sharma, M. Nataraj and D.P. Tripathi, “Design of electrical system based on load flow analysis using ETAP for IEC projects”, in proc. *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, March 04-06, 2016, New Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584103
- [4] V.I. Sokolov and V.I. Tarasov, *Elektrohimicheskie nakopiteli energii* [Electrochemical energy storage devices]. Moscow: Chemistry, 2020 (in Russian).
- [5] B. Banerjee, D. Jayaweera and S. Islam, “Modelling and Simulation of Power Systems”, in *Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration Studies in Systems, Decision and Control*, vol 57, D. Jayaweera, Cham: Springer International, 2016, pp. 15-26. DOI: 10.1007/978-3-319-30427-4_2

- [6] A. Voznesensky and D. Kaplun, "Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171313-171321, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956077.
- [7] C. Nithya and J.P. Roselyn, "Development of grid-side converter-based FRT control and protection in a grid-connected solar photovoltaic park system under different control modes", *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 1009196, Sept. 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1009196
- [8] D. Klionskiy, M. Kupriyanov and D. Kaplun, "Signal denoising based on empirical mode decomposition", *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, no. 7, pp. 5560–5570, Nov. 2017. DOI: 10.21595/jve.2017.19239
- [9] I. Kanatov, D. Kaplun, D. Butusov, V. Gulvanskii and A. Sinitca, "One technique to enhance the resolution of discrete fourier transform", *Electronics*, vol. 8, 330, March 2019. DOI: 10.3390/electronics8030330

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Сергеевич Токарев, кандидат технических наук, старший преподаватель Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия Федерация.

Ivan S. Tokarev, Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.315.687.22

EDN QGCCLD

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В.Н. Вариводов

ORCID: 0009-0003-1400-2322 e-mail: vvarivodov@gmail.com

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***Д.И. Ковалев**

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm1@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***Д.В. Голубев**

ORCID: 0000-0002-4258-8741 e-mail: golubevdl1@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***С.А. Елфимов**

ORCID: 0009-0001-5226-904X e-mail: sa.elfimov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***А.Э. Сергеева**

ORCID: 0009-0006-5344-1928 e-mail: SergeevaAE@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Работа посвящена исследованию развития высоковольтных технологий применительно к кабельным муфтам с полимерной изоляцией. Представлен аналитический обзор применения различных конструктивных и технологических решений по повышению электрической прочности концевых и соединительных кабельных муфт. Рассмотрены распределения напряженностей электрического поля в концевых муфтах и возможности их регулирования. Продемонстрированы оптимальные в настоящее время изоляционные материалы для применения в муфтах для кабелей с полимерной изоляцией. Выделены основные направления совершенствования изоляции кабельных муфт.

Ключевые слова: изоляционные материалы, кабельная муфта, полимерная изоляция, распределение электрического поля, электрическая прочность.

Для цитирования: Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В., Елфимов

С.А., Сергеева А.Э. Современное состояние развития кабельных муфт с полимерной изоляцией // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 98-116.
EDN QGCCLD

CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF POLYMER-INSULATED CABLE JOINTS

V.N. Varivodov

ORCID: **0009-0003-1400-2322** e-mail: **vvarivodov@gmail.com**

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

D. I. Kovalev

ORCID: **0009-0009-0920-5129** e-mail: **kovalevdm@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

D.V. Golubev

ORCID: **0000-0002-4258-8741** e-mail: **golubevdl@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

S.A. Elfimov

ORCID: **0009-0001-5226-904X** e-mail: **sa.elfimov@yandex.ru**

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

A.E. Sergeeva

ORCID: **0009-0006-5344-1928** e-mail: **SergeevaAE@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

Abstract. The paper is devoted to the study of the development of high-voltage technologies applied to polymer-insulated cable joints. An analytical review of the application of various design and technological solutions for increasing the electrical strength of cable end and connecting joints is presented. The distributions of electric field strengths in end joints and the possibilities of their regulation are considered. The optimal insulating materials for use in joints for polymer-insulated cables are demonstrated. The main directions for improving the insulation of cable joints are highlighted.

Keywords: insulating materials, cable joint, polymer insulation, electric field distribution, electrical strength.

For citation: V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, D.V. Golubev, S.A. Elfimov and A.E. Sergeeva, "Current state of development of polymer-insulated cable joints", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 98-116, 2025. EDN QGCCLD

I. Введение

Устойчивое электроснабжение с наименьшими потерями является актуальной задачей для энергетической отрасли. Важным элементом в цепочке передачи электроэнергии являются высоковольтные кабельные муфты, служащие для соединения концов силового кабеля между собой, а также кабельной линии к воздушной линии электропередачи (ЛЭП), трансформатору или комплектно-распределительному устройству (КРУ).

Опыт показывает, что кабельные муфты являются наиболее слабым звеном в системе кабельных линий [1], что требует особенно пристального внимания к их совершенствованию. Современные тенденции в развитии технологий высоковольтной изоляции открывают новые горизонты в обеспечении надежности, безопасности, эффективности этих устройств и, как следствие, электрических сетей в целом.

Внедрение инновационных материалов и технологий, позволяет не только повысить эксплуатационные характеристики высоковольтных устройств, но и способствует снижению их экологического воздействия на окружающую среду.

II. Анализ применяемых технических решений для улучшения конструкции кабельных муфт

Традиционным направлением оптимизации кабельных муфт является применение термоусаживающихся изоляционных и полупроводящих трубок. Термоусадка изоляционных трубок позволяет обжать внутренние элементы муфт и минимизировать возможность появления газовых прослоек [2].

Муфты для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция) с термоусаживающимися трубками производятся в двух основных разновидностях – термической и холодной усадки.

Современная технология холодной усадки позволяет установить трубку на муфту путем простого извлечения спиралевидного корда. Такие трубки усаживаются на кабелях 6-35 кВ, создавая остаточное радиальное прижимное давление на весь срок службы.

Муфты с холодной усадкой трубок не требуют источника тепла для монтажа. Трубки достаточно надеть на место стыка двух кабелей и плотно затянуть крепежный механизм. Для большей эффективности внутреннюю часть муфты заливают специальным гелем, препятствующим проникновению влаги и воздуха.

Производство термоусаживаемой арматуры основано на технологии «сшивки» полимеров с пластической памятью формы [3]. По сравнению с

обычными полимерами такие образцы обладают улучшенными механическими свойствами, химической и термической стойкостью. Сшитый полимер перестает быть термопластиком. Новоприобретенная «сшитая» структура полимера позволяет нагревать его выше температуры плавления, при этом он не теряет своей формы, не плавится и приобретает каучуко-подобную консистенцию. В таком состоянии можно подвергать изменению его геометрию. После охлаждения полимер сохраняет новые размеры и приданную ему форму. При повторном нагреве, обладая «эффектом памяти формы», полимер возвращается к первичным размерам и форме. В этом и заключается процесс термоусадки.

Термоусаживающиеся изоляционные и полупроводящие трубы активно применяются в кабельных муфтах при номинальных напряжениях 6-35 кВ. Однако, при проектировании муфт для больших классов напряжения вышеописанных технологий будет недостаточно. В таких случаях широкое распространение получили стресс-конусы.

Стресс-конус – это специальная изоляционная вставка между соединяемыми смежными слоями изоляции отдельных частей кабеля или кабеля с другим оборудованием, где для повышения электрической прочности места соединения используется коническая форма торцов этой вставки, а плотное прилегание вставки к смежным слоям изоляции обеспечивается плотным их сжатием [18, 29]. Эта конструкция исключает возможность появления газовых включений на границе раздела отдельных слоев изоляции. Как правило, внутри таких стресс-конусов заливаются электроды (экраны), регулирующие электрическое поле.

Принципиальная конструкция стресс-конуса [7] и распределение электрического поля в нем [4] при воздействии напряжения приведена на рис. 1 и 2. Изменяя форму и расположение залитых в стресс-конусе электродов можно оптимизировать распределение электрического поля в кабельных муфтах.

Концевые кабельные муфты на напряжение 35-110 кВ и выше, как правило, имеют в качестве основной изоляционной конструкции стресс-конуса жесткий литой эпоксидный конический изолятор, который иногда заполнен маслом или высокопрочным газом, например – элегазом [16]. Принципиальная конструкция таких устройств подобна модели, представленной на рис. 1. Однако часто используются сухие муфты – без заполнения жидкостью или газом [19, 24].

В качестве примера использования данной технологии можно рассмотреть концевую муфту типа *PHVS-245*. Приведенная на рис. 3 [5, 6] муфта предназначена для работы в распределительных устройствах с элегазовой изоляцией, компактных РУ и трансформаторах на напряжение до 245 кВ, а также в разных изолирующих средах.



Рис. 1. Соединительная муфта 110 кВ

Fig. 1. Connection coupling for 110 kV

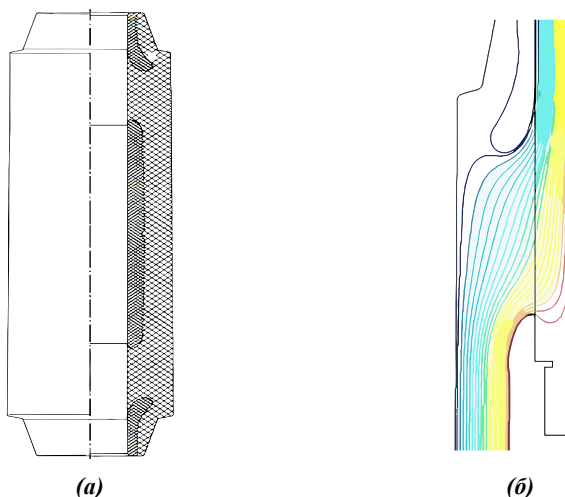


Рис. 2. Конструкция стресс-конуса (а); распределение электрического поля при воздействии напряжения (б)

Fig. 2. Stress cone design (a); electric field distribution under voltage (b)

Данная муфта является муфтой «сухого» исполнения без каких-либо жидких наполнителей. Герметичный эпоксидный корпус предназначен для работы в элегазовых и других изолирующих средах. Внутренняя силиконовая коническая вставка – стресс-конус – служит также для выравнивания напряженности электрического поля и исключения разрядов вдоль поверхности эпоксидного изолятора.



Рис. 3. Концевая муфта штекерная муфта PHVS-245 сухого исполнения для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Fig. 3. End coupling plug-in coupling PHVS-245 dry version for cables with cross-linked polyethylene insulation

При сжатии с помощью болтов жесткого изолятора с металлическим корпусом внутренняя его коническая поверхность плотно насаживается на коническую поверхность упругой вставки – стресс-конуса, что устраняет возможность появления нежелательных газовых включений в этой области, способных вызвать частичные разряды. Для повышения надежности эти поверхности перед монтажом покрываются силиконовой смазкой. В результате исключаются электрические разряды по этим поверхностям.

Кабельные контакты – штекеры в данных муфтах представляет собой высококачественный разъем, который обеспечивает надежную и безопасную передачу тока от токоведущей жилы кабеля на сборные шины. Дополнительно на стык металлического фланца с кабелем монтируется термоусаживаемая трубка. [10]

Общими конструктивными элементами концевых кабельных муфт на напряжение 35 кВ и выше являются [15, 27, 28, 31]:

- внешний жесткий полый конический изолятор из эпоксидного компаунда;

- силиконовый стресс-конус;
- штекерный разъем;
- залитые полупроводящие упругие экраны в стресс-конусах;
- залитые экраны в эпоксидном компаунде;
- подпружиненные болтовые крепления изоляторов;
- металлический корпус;
- токопроводящие элементы;
- крепление кабеля и корпуса муфты.

Для данных классов напряжения соединительные муфты могут иметь более существенные различия в конструкции, связанные с тем, что выпускаемые модели изготавливаются как с одинарными стресс-конусами, так и с двойными.

В табл. 1 представлены характеристики изоляционных материалов, использующихся в зарубежных кабельных муфтах со стресс-конусом [8].

Таблица 1.
Материалы, используемые в зарубежных кабельных муфтах со стресс-конусом

Table 1.
Materials used in foreign cable couplings with stress cone

Сокращение в литературе	Материал (используемый в данной работе)	Сокращение (используемое в данной работе)	DIN ISO 1629 Март 1992	DIN EN ISO 1043 Часть 1 январь 2000
<i>SiR, SIR, MVQ, VMQa</i>	Силиконовый каучук	<i>SiR</i>	<i>MVQ, VMQ</i>	<i>SI</i>
<i>RTV, RTV-2</i>	Двухкомпонентный силиконовый каучук, вулканизирующийся при комнатной температуре	<i>RTV</i>		
<i>LR, LSR, XLR</i>	Жидкий каучук, жидкий силиконовый каучук, сверхжидкий каучук	<i>LR</i>		
<i>HTV, HCR</i>	Высокотемпературный вулканизирующийся каучук, каучук высокой консистенции	<i>HTV</i>		
<i>EPR</i>	Этилен-пропиленовый каучук	<i>EPR</i>	<i>EPMB</i>	<i>E/P</i>
<i>EPM, EPM, P</i>	Этилен-пропиленовый сополимер (' <i>EPM</i> ', ' <i>P</i> ' означает пероксидно-вулканизированный <i>EPM</i>)	<i>EPM</i>	<i>EPM</i>	<i>E/P</i>
<i>EPDM, EPDM, S, EPDM, P</i>	Этилен-пропилен-диеновый терполимер (' <i>EPDM</i> ', ' <i>S</i> ' означает вулканизацию серой; ' <i>EPDM</i> ', ' <i>P</i> ' см. выше)	<i>EPDM</i>	<i>EPDM</i>	
<i>EP</i>	Эпоксидная смола	<i>Epoch</i>	-	<i>EP</i>
<i>HDPE, LDPE</i>	Полиэтилен высокой плотности, полиэтилен низкой плотности	<i>PE</i>	-	<i>PE, PE-LD, PE-HD</i>
<i>XLPE</i>	Сшитый полиэтилен	<i>XLPE</i>	-	<i>PE-X</i>
-	Смазка, силиконовое масло, паста	<i>Lubricant</i>	-	-

При выборе изоляции кабельных муфт важны не только их конструкция и технология изготовления, характеристики используемых материалов,

но и методы ее расчета – прежде всего, электрической прочности и температурного режима.

При расчете изоляции муфты необходимо учитывать две возможные ситуации:

- по элементам цепи протекает номинальный ток и нагревает их, этот случай соответствует высокой нагрузке;
- прикладывается только напряжение, этот случай соответствует нулевой нагрузке.

Учет двух режимов – с током и без него – необходим, поскольку они создают принципиально разные физические условия в изоляции. При протекании тока возникает нагрев, изменяющий тепловое состояние и диэлектрические свойства материалов, а также вызывающий термомеханические напряжения. При отсутствии тока, но наличии напряжения, тепловой вклад отсутствует, и распределение электрического поля определяется исключительно геометрией и свойствами материалов [20, 23]. Для достоверного расчета электрической прочности изоляции необходимо учитывать оба предельных состояния, так как они задают разные граничные условия и могут по-разному влиять на риск пробоя.

Одним из основных направлений повышения надежности кабельных муфт является оптимизация их конструкции с учетом распределения электрического и теплового полей [22, 30]. Муфты представляют собой наиболее уязвимые элементы в составе кабельных линий, поскольку в зоне их размещения, как правило, наблюдаются повышенные локальные напряженности электрического поля по сравнению с однородной структурой кабеля. Кроме того, конструктивная сложность и наличие межфазных и межматериальных границ повышают вероятность возникновения дефектов, в частности, газовых включений и отслоений, способных привести к частичным разрядам. Для повышения надежности муфт необходимо принимать меры, направленные на снижение локальных пиков напряженности электрического поля [25, 26]. Повышение точности моделирования достигается за счет актуализации исходных данных, уточнения электрических характеристик материалов, корректного описания граничных условий, а также повышения пространственного разрешения в расчетах с использованием адаптивной сетки в зонах повышенного градиента поля.

Важным аспектом повышения надежности является также исключение возникновения отслоений на границах между диэлектриками различной природы в процессе эксплуатации. Возникающие при циклических изменениях температуры внутренние термомеханические напряжения могут привести к образованию воздушных зазоров, являющихся источниками частичных разрядов. Для предотвращения подобных эффектов требуется обеспечить максимальное выравнивание температурного поля, особенно вблизи

критических границ раздела материалов. Это, в свою очередь, требует оптимизации тепловых расчетов, предполагающей учет реальных теплопроводностей, теплоемкостей и коэффициентов теплового расширения используемых материалов, а также моделирования условий охлаждения в различных климатических режимах, включая низкотемпературные.

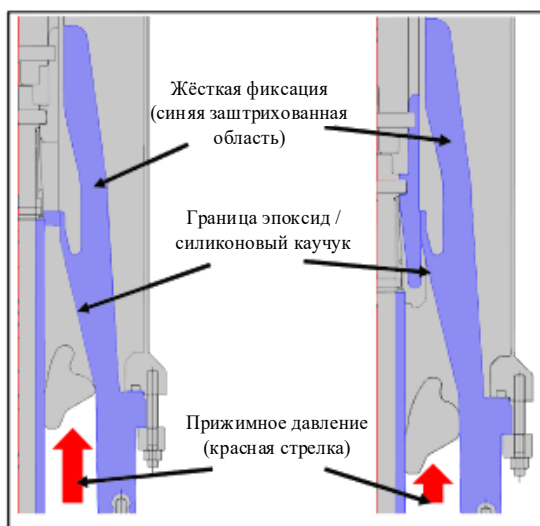
Результаты численного моделирования [32] позволяют обосновать конкретные конструктивные меры по снижению напряженности поля и термомеханических напряжений, тем самым обеспечивая повышение электрической прочности и надежности кабельных муфт. Холодный климат предъявляет повышенные требования к конструкции кабельных муфт, так как при низких температурах возможно изменение внутреннего давления, снижение эластичности полимерных компонентов и образование микрозоров на границах материалов. Для снижения негативного влияния таких факторов конструкции следует оптимизировать с учетом коэффициентов теплового расширения и использовать компенсирующие элементы, обеспечивающие стабильное контактное давление в широком температурном диапазоне.

Для обеспечения надежности изоляции в кабельных муфтах крайне важно предотвратить образование микродефектов, таких как воздушные зазоры, возникающие на границах раздела различных материалов. Одним из ключевых направлений является оптимизация конструктивных элементов, обеспечивающих стабильный контакт между компонентами муфты при температурных колебаниях и механических нагрузках [11]. В частности, важную роль играют упругие элементы, такие как пружинные кольца, компенсирующие изменения линейных размеров материалов с различными коэффициентами теплового расширения. Эффективное применение таких решений позволяет минимизировать риск разгерметизации и частичных разрядов при эксплуатации в широком температурном диапазоне, включая экстремально низкие температуры.

Для повышения надежности кабельных муфт, особенно в условиях эксплуатации при переменных и низких температурах, важно исключить возможность образования микрозоров на границе раздела между различными диэлектриками [14]. Воздушные прослойки, возникающие в результате недостаточного прижимного усилия или различий в тепловом расширении материалов, становятся очагами частичных разрядов, что снижает электрическую прочность изоляционной системы.

Одним из наиболее эффективных решений является применение упругих компенсирующих элементов, таких как пружинные кольца, обеспечивающих стабильное контактное давление по всей поверхности сопряжения стресс-конуса и основного корпуса муфты. Эти элементы автоматически компенсируют термическое расширение и сжатие материалов при колебаниях температуры в диапазоне от -40 до $+40$ °C, сохраняя герметичность интерфейса и предотвращая появление газовых зазоров.

Дополнительно важным условием является подбор материалов с согласованными коэффициентами теплового расширения. Например, использование силиконовой резины и эпоксидных компаундов с минимальной разницей этих коэффициентов позволяет уменьшить механическое напряжение на границе контакта при охлаждении [21]. Еще одним конструктивным приемом является нанесение специальной диэлектрической силиконовой смазки на поверхность сопряжения. [13] Это снижает вероятность локального отслоения, повышает степень прилегания материалов и препятствует проникновению влаги и воздуха внутрь конструкции. Пример применения пружинного кольца продемонстрирован на рис. 4 [9].



**Рис. 4. Применение пружинного кольца
для компенсации температурных колебаний**

Fig. 4. Application of a spring ring to compensate for temperature fluctuations

В дополнение к применению пружинных прижимных элементов и согласованию коэффициентов теплового расширения, эффективное проектирование кабельных муфт должно учитывать распределение электрического поля в зоне сопряжения различных материалов.

Анализ распределения электрического поля в области сопряжения различных компонентов кабельной муфты показывает, что наибольшая напряженность формируется в зоне корня стресс-конуса и в области окончания высоковольтной экранирующей трубки. Эти зоны являются потенциально уязвимыми при нарушении геометрии прилегания или ухудшении

контактного давления между материалами. Результаты численного моделирования подтверждают, что именно в этих участках могут возникать условия для локального перенапряжения и развития поверхностных разрядов (рис. 5) [12].

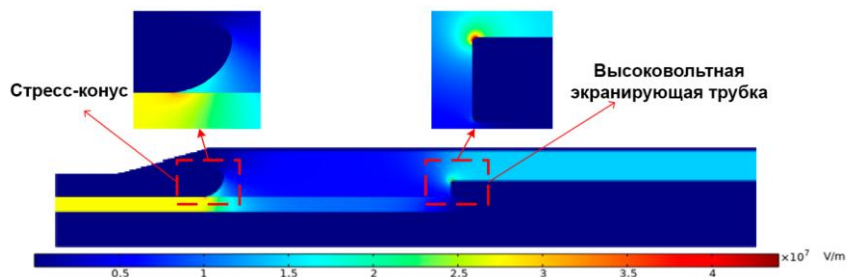


Рис. 5. Распределение электрического поля в характерных зонах конструкции кабельной муфты

Fig. 5. Electric field distribution in critical areas of the cable joint structure

Особенно чувствительной к условиям сопряжения является граница между изоляцией жилы из сшитого полиэтилена (*XLPE*) и силиконовой оболочкой стресс-конуса. При понижении давления в этом интерфейсе вследствие старения или усадки материала может формироваться узкая воздушная прослойка, в которой происходит развитие частичных разрядов. Такие разряды способны нарушить целостность изоляции и привести к пробое. На рис. 6 схематически показан возможный путь распространения поверхностного разряда вдоль границы материалов [17].

Во избежание подобных явлений конструкция должна предусматривать устойчивое прижимное усилие по всей длине сопряжения. Этого можно достичь за счет использования упругих элементов, обеспечивающих компенсацию тепловых и механических деформаций. Кроме того, требуется строгое соблюдение допусков на обработку сопрягаемых поверхностей. Типовые производственные дефекты, такие как неровности, воздушные включения или следы влаги, могут стать центрами ионизации и вызвать рост электрического поля до критических значений. Примеры таких дефектов приведены на рис. 7.

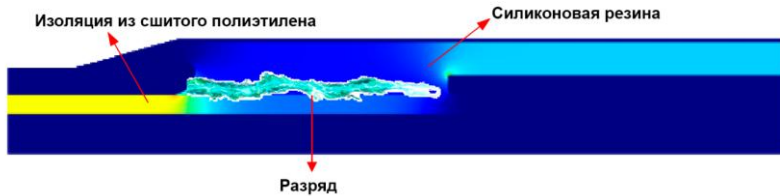


Рис. 6. Схема возможного пути поверхностного разряда вдоль границы сред

Fig. 6. Schematic diagram of a possible surface discharge path along the XLPE-SiR interface

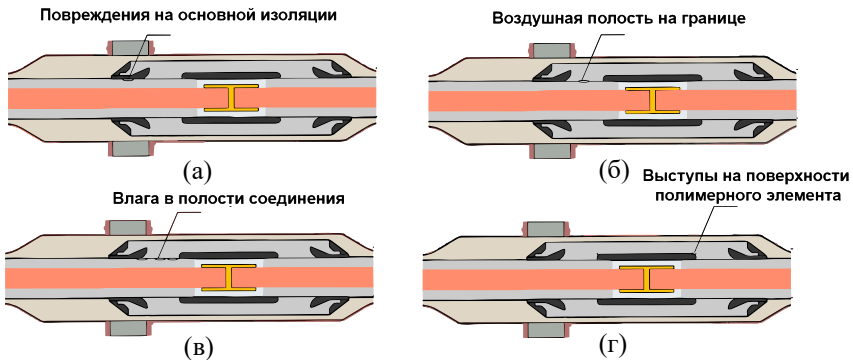


Рис. 7. Характерные дефекты конструкции муфты:

повреждение на основной изоляции (а); воздушная полость на границе (б); влага в полости соединения (в), выступы на поверхности полимерного элемента (г)

Fig. 7. Typical defects in cable joint construction:

scratch on main insulation (а); air gap at the interface (б); moisture ingress in the joint cavity (в); burrs on the surface of the polymer element (г)

Применение вышеперечисленных мер, в том числе, выбор материалов с согласованными термомеханическими характеристиками, введение упругих компенсаторов, обеспечение герметичности и отсутствие острых геометрических переходов – позволяют значительно повысить надежность изоляционной системы кабельной муфты и снизить вероятность отказа при длительной эксплуатации.

Помимо геометрических и конструктивных факторов, надежность изоляционной системы кабельной муфты в значительной степени определяется химическим составом используемых материалов. В изоляции на основе сшитого полиэтилена (XLPE), получаемой в результате термической обработки с добавлением пероксидов, после процесса сшивания остаются побочные продукты реакции – в том числе метан, ацетофенон и кумиловый

спирт. Эти соединения обладают высокой полярностью и, находясь в объеме полимера, особенно вблизи границ раздела, могут снижать электрическую прочность, увеличивать диэлектрические потери и искажать распределение поля. Кроме того, остаточные газы способны мигрировать вдоль кабеля и накапливаться в зонах соединений. Это создает внутреннее давление под оболочкой муфты, что нарушает стабильность контактного усилия, способствует образованию микропазов и повышает риск возникновения частичных разрядов.

Для исключения подобных явлений применяется процесс дегазации – выдержка кабеля при контролируемой температуре, как правило, в диапазоне 60-70 °С. В результате происходит удаление летучих и твердых побочных продуктов из структуры *XLPE*. Эффективность дегазации зависит от толщины изоляции, начального уровня загрязнения и условий выдержки.

На рис. 8 показана расчетная динамика снижения концентрации побочных продуктов в процессе дегазации в кабеле среднего напряжения. Видно, что даже при нормальной комнатной температуре в 20-25 °С этот процесс занимает десятки суток, что подчеркивает необходимость применения термической обработки на производстве. Без дегазации невозможно обеспечить стабильные электрические характеристики изоляции, особенно в зонах соединений и муфт, где присутствуют концентраторы поля и полимерные интерфейсы.

Также стоит отметить важный фактор – влажность воздуха в камере дегазации. При относительной влажности выше 40 % молекулы воды быстро сорбируются на поверхности и в аморфных областях *XLPE*; их коэффициент диффузии ($10^{-9} \dots 10^{-8}$ см²/с при 25-90 °С) сопоставим с диффузией метана, поэтому поглощенная влага частично «засаливает» свободный объем, уменьшая градиент концентрации побочных продуктов и тем самым удлиняя время их удаления примерно на 15-20 % для кабеля со стенкой 18 мм (оценка по модели Фика). Одновременно вода сама увеличивает $\tan \delta$, что подтверждено для паро- и газо-отвержденного *XLPE*. Поэтому дегазацию проводят в сухом, хорошо вентилируемом воздухе ($RH \leq 15\%$) или под азотом, чтобы исключить влагопоглощение на этапе термообработки [33].

Таким образом, дегазация – это не только технологический, но и критически важный этап обеспечения надежности кабельной изоляции. Ее реализация позволяет устранить скрытые риски, не выявляемые на ранних этапах контроля качества, и существенно продлевает срок службы кабельных муфт.

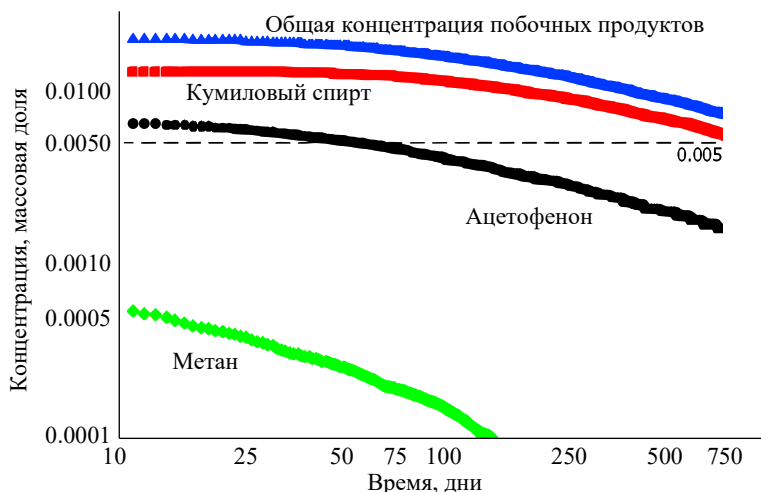


Рис. 8. Расчетное снижение концентрации побочных продуктов сшивания в XLPE-изоляции кабеля среднего напряжения в процессе дегазации

Fig. 8. Calculated reduction of crosslinking byproduct concentration in XLPE insulation of a medium-voltage cable during the degassing process

III. Заключение

В результате анализа установлено, что надежность кабельных муфт с полимерной изоляцией определяется не только электрическими параметрами, но и конструктивной адаптацией к температурным и механическим воздействиям. Критическим фактором является предотвращение образования микропазов и межфазных дефектов, способных привести к частичным разрядам.

Одним из наиболее эффективных решений является применение упругих элементов (например, пружинных колец), компенсирующих термическое расширение материалов и обеспечивающих стабильное контактное давление на границах раздела, особенно в зонах сопряжения силиконовой и эпоксидной изоляции. Дополнительную защиту обеспечивает нанесение диэлектрических смазок и применение материалов с согласованными коэффициентами теплового расширения.

Важным направлением обеспечения надежности является дегазация XLPE-изоляции, позволяющая устранить остаточные побочные продукты сшивания, способные искажать электрическое поле и провоцировать поверхностные разряды в зоне муфт. Дегазация при температуре 60-70 °С значительно снижает содержание метана, ацетофенона и других компонентов, устраняя внутренние источники ионизации.

Учет температурных зависимостей электрических и тепловых характеристик материалов позволяет выявить зоны повышенного электрического и термомеханического напряжения и адаптировать конструкцию муфт на этапе проектирования. Предварительные расчеты на этапе проектирования могут показать необходимость повышения разрешения в критических зонах и уточнения граничных условий численного моделирования.

Комплексная реализация перечисленных решений позволяет значительно повысить электрическую прочность и долговечность кабельных муфт, особенно при эксплуатации в холодном климате и под переменной нагрузкой. Применяемые меры обеспечивают устойчивость изоляционной системы к старению, термоциклированию и внешним воздействиям, приближая ресурс муфт к ресурсу силового кабеля.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004).

© Вариводов В.Н., 2025

© Ковалев Д.И., 2025

© Голубев Д.В., 2025

© Елфимов С.А., 2025

© Сергеева А.Э., 2025

Поступила в редакцию 27.05.2025

Принята к публикации 09.06.2025

Received 27.05.2025

Accepted 09.06.2025

Библиографический список

- [1] Williams F.D. Cable accessory failure analysis. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010. – 85 p.
- [2] Кабельные термоусаживаемые муфты. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tech-electro.ru> (дата обращения: 21.03.2025).
- [3] Изготовление кабельной арматуры 110-330 кВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://fenix88.com/products/doc/presentation-kma-sma-2015.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
- [4] Соединительные муфты 110 кВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arkasil.com/product/cableaccessories/joints110> (дата обращения: 21.03.2025).
- [5] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В. Полимеры в технике высоких напряжений. М.: МЭИ, 2022. – 345 с.
- [6] Штекерные концевые муфты для кабеля с СПЭ изоляцией на напряжение 12-52 кВ: каталог. Sudkabel, 2020. – 32 с.

-
- [7] Высоковольтная кабельная арматура: каталог. TE Connectivity (Raychem), 2012. – 85 с.
 - [8] Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Paris: CIGRE Study Committee B1, 2020ю – 120 p.
 - [9] Кабельные системы. Кабельные арматуры для электрических сетей: каталог. Pfisterer, 2011. – 92 с.
 - [10] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И. Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1(40). С. 98-104.
 - [11] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И., Мирзабекян Г.З. Состояние и перспективы развития комплектов распределительных устройств на напряжение 6-35 кВ // Электротехника. 2017. № 8. С. 33-38.
 - [12] Toigo C., Cong-Thanh Vu, Aymeric A. Electro-thermal simulation methodology for HVDC cable GIS termination // proc. 10th International conference on Insulated Power cables. Versailles. 2019.
 - [13] EN 50181:2010. Plug-in type bushings above 1 kV up to 52 kV from 250 A to 2,5 kA for equipment other than liquid filled transformers.
 - [14] IEC 60137:2017. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. 7th ed.
 - [15] IEC 60840:2020. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV). 5th ed.
 - [16] IEC 62271-209:2019. Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV. 2nd ed.
 - [17] IEC 62895:2017. High voltage direct current (HVDC) power transmission - Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications.
 - [18] IEC 60815-4:2016. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 4: Insulators for d.c. systems. 1st ed.
 - [19] TB 605:2015. Feasibility of a common, dry type plug-in interface for GIS and power cables above 52 kV. WG B1/B3.33.
 - [20] Mazzanti G., Marzinotto M. Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. - 320 p.
 - [21] Kim C.K., Sood V.K., Jang G.S., Lim S.J., Lee S.-J. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. – 415 p.
 - [22] Chen G., Hao M., Xu Z., Vaughan A., Cao J., Wang H. Review of high voltage direct current cables // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2015. Vol. 1. No. 2. P. 9-21. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2015.00015
 - [23] Khalil M.S., Gastli A. Dependence of DC insulation resistivity of polyethylene on temperature and electric field // proc. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 1997. Vol. 1. P. 296-299.
 - [24] Streit P., Gallego K., Gahungu F. Dry terminations for high voltage cable systems // 8th Inter-national Conference on Insulated Power Cables, June 19-23, 2011, Versailles, France.
 - [25] Ye H., Clemens M., Schulte-Fischedick J., Seifert J. Investigation of electrical field grading of bushings with microvaristor filled epoxy resin components // IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2014. P. 153-156.

- [26] Zierhut S., Klein T., Wendt E., Zühlke L. Influence of expansion on electric field distribution of stress cones for high voltage cable accessories // 9th International Conference on Insulated Power Cables, June 21-25, 2015, Versailles, France.
- [27] Klein T. Impact of rate of expansion on electric field stress in stress cones & joint bodies // INMR World Congress. Munich, 2015. – 12 p.
- [28] Quaggia D. Development of Joints & Terminations for HVDC Extruded Cables // INMR World Conference. Munich, 2015. – 15 p.
- [29] Galloway S.J. Cable and accessory installation // IEE Two Day Colloquium on Super tension. London, 1995. P. 17/1-17/5.
- [30] Hering M., Speck J., Gobmann S. Field transition in gas insulated HVDC systems // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24. No. 3. P. 1608-1616. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006534
- [31] Высоковольтная кабельная арматура [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prokabel.pro/public/Kabelnaia%20armatura%20do%20110%20kV.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
- [32] Köksal C., Dokur E., Ersoy A. Stress cone effect analysis and optimum design of extra high-voltage cable joint using neural networks // Mathematical Problems in Engineering. 2022. 6452538. DOI: 10.1155/2022/6452538
- [33] Chan J. The moisture absoeption of XLPE cable insulation under simulated service conditions // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1978.

References

- [1] F.D. Williams, *Cable accessory failure analysis*. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [2] Kabel'nye termousazhivaemye mufty [Heat-shrinkable cable sleeves]. [Online]. Available at: <https://www.tech-electro.ru> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [3] Izgotovlenie kabel'noi armatury 110-330 kV [Manufacturing of 110-330 kV cable accessories]. [Online]. Available at: <http://fenix88.com/products/doc/presentation-kma-sma-2015.pdf> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [4] Soedinitel'nye mufty 110 kV [110 kV connecting sleeves]. [Online]. Available at: <http://www.arkasil.com/product/cableaccessories/joints110> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [5] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev and D.V. Golubev, *Polimery v tekhnike vysokikh napryazhenii [Polymers in high voltage engineering]*. Moscow: MPEI, 2022 (in Russian).
- [6] *Shtekernye kontsevye mufty dlya kablya s SPE izolyatsiei na napryazhenie 12-52 kV: katalog [Plug-in end sleeves for XLPE-insulated cables 12-52 kV: catalog]*, Sudkabel, 2020 (in Russian).
- [7] Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Paris: CIGRE Study Committee B1, 2020.
- [8] *Vysokovol'naya kabel'naya armatura: katalog [High-voltage cable accessories: catalog]*, TE Connectivity (Raychem), 2012 (in Russian).
- [9] *Kabel'nye sistemy. Kabel'nye armatury dlya elektricheskikh setei: katalog [Cable systems. Cable accessories for electrical networks: catalog]*, Pfisterer, 2011 (in Russian).

- [10] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin and S.I. Hrenov, "Development of high and extra-high voltage switchgear", *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 1(40), pp. 98-104, 2017.
- [11] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin, S.I. Khrenov and G.Z. Mirzabekyan, "The current state and possibilities for development of switchgears for a voltage of 6–35 kV", *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 8, pp. 503-508, 2017.
- [12] C. Toigo, Vu. Cong-Thanh and A. Aymeric, "Electro-thermal simulation methodology for HVDC cable GIS termination", in proc. *10th International conference on Insulated Power cables*, Versailles, 2019.
- [13] Plug-in type bushings above 1 kV up to 52 kV from 250 A to 2,5 kA for equipment other than liquid filled transformers, EN 50181:2010.
- [14] Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, IEC 60137:2017, 7th ed.
- [15] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV), IEC 60840:2020, 5th ed.
- [16] Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV, IEC 62271-209:2019, 2nd ed.
- [17] High voltage direct current (HVDC) power transmission – Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications, IEC 62895:2017.
- [18] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 4: Insulators for d.c. systems, IEC 60815-4:2016, 1st ed.
- [19] Feasibility of a common, dry type plug-in interface for GIS and power cables above 52 kV, TB 605:2015, WG B1/B3.33.
- [20] G. Mazzanti and M. Marzinotto, *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] C.K. Kim, V.K. Sood, G.S. Jang, S.J. Lim and S.-J. Lee, *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [22] G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao and H. Wang, "Review of high voltage direct current cables", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 9-21, June 2015. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2015.00015
- [23] M.S. Khalil and A. Gastli, "Dependence of DC insulation resistivity of polyethylene on temperature and electric field", in proc. *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 1, pp. 296-299, 1997.
- [24] P. Streit, K. Gallego and F. Gahungu, "Dry terminations for high voltage cable systems", in proc. *8th International Conference on Insulated Power Cables*, June 19-23, 2011, Versailles, France.
- [25] H. Ye, M. Clemens, J. Schulte-Fischedick and J. Seifert, "Investigation of electrical field grading of bushings with microvaristor filled epoxy resin components", in proc. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, pp. 153-156, 2014.
- [26] S. Zierhut, T. Klein, E. Wendt and L. Zühlke, "Influence of expansion on electric field distribution of stress cones for high voltage cable accessories", in proc. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, June 21-25, 2015, Versailles, France.
- [27] T. Klein, "Impact of rate of expansion on electric field stress in stress cones & joint bodies", in proc. *INMR World Congress*, Munich, 2015.

- [28] D. Quaggia, "Development of joints & terminations for HVDC extruded cables", in proc. *INMR World Conference*, Munich, 2015.
- [29] S.J. Galloway, "Cable and accessory installation", in proc. *IEEE Two Day Colloquium on Super tension*, London, pp. 17/1-17/5, 1995.
- [30] M. Hering, J. Speck and S. Gobmann, "Field transition in gas insulated HVDC systems", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 3, pp. 1608-1616, June 2017. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006534
- [31] Vysokovol'naya kabel'naya armatura [High-voltage cable accessories]. [Online]. Available at: <https://www.prokabel.pro/public/Kabelnaia%20armatura%20do%20110%20kV.pdf> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [32] C. Köksal, E. Dokur and A. Ersoy, "Stress cone effect analysis and optimum design of extra high-voltage cable joint using neural networks", *Mathematical Problems in Engineering*, 6452538, May 2022. DOI: 10.1155/2022/6452538
- [33] J. Chan, "The moisture absorption of XLPE cable insulation under simulated service conditions", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1978.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Николаевич Вариводов, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Vladimir N. Varivodov, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Дмитрий Игоревич Ковалев, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Dmitry I. Kovalev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Дмитрий Владиславович Голубев, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Dmitry V. Golubev, research fellow of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Сергей Александрович Елфимов, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Sergey A. Elfimov, research fellow of the National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation.

Анна Эдуардовна Сергеева, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Anna E. Sergeeva, research engineer of the National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation.

УДК 621.311.1:621.311.61

EDN RKDZLF

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

У.К. ЮшкевичORCID: 0009-0009-4599-8605 e-mail: uyk567@gmail.comМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ)*Москва, Россия***Б.Н. Сидоров**ORCID: 0009-0007-0643-6373 e-mail: nnv033@gmail.comМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ)*Москва, Россия***А.Д.М. Аль-Мохаммедави**ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: alijber1987@uomisan.edu.iqМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ)*Москва, Россия*

Рост числа электромобилей создает новые вызовы для электрических сетей, включая необходимость поддержания качества электрической энергии в сети, перераспределение нагрузки, оптимизацию энергопотребления и интеграцию возобновляемых источников энергии. Приведены современные подходы к динамическому управлению энергопотреблением зарядных станций. Основное внимание уделено использованию интеллектуальных алгоритмов, таких как V1G (однаправленная зарядка) и V2G (возможность выдачи электроэнергии в сеть), а также системам прогнозирования спроса и хранения энергии. Также рассмотрены перспективы применения машинного обучения и искусственного интеллекта в управлении зарядными станциями. Результаты анализа показали, что алгоритмы оптимального управления энергопотреблением зарядных станций позволяют улучшить балансировку сети и снизить затраты на инфраструктуру и выбросы CO₂. Проанализированы актуальные задачи: стандартизация протоколов, согласование интересов операторов и пользователей, а также необходимость модернизации сетей.

Ключевые слова: алгоритмы оптимизации, возобновляемая энергия, динамическое управление энергопотреблением, зарядные станции, интеллектуальная зарядка, прогнозирование спроса, V2G.

Для цитирования: Юшкевич У.К., Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави А.Д.М. Динамическое управление энергопотреблением электрических зарядных станций: современные подходы и технологии // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 117-128. EDN RKDZLF

DYNAMIC ENERGY MANAGEMENT OF ELECTRIC CHARGING STATION: MODERN APPROACHES AND TECHNOLOGIES

U.K. Yushkevich

ORCID: 0009-0009-4599-8605 e-mail: uyk567@gmail.com
Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)
Moscow, Russia

B.N. Sidorov

ORCID: 0009-0007-0643-6373 e-mail: nnv033@gmail.com
Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)
Moscow, Russia

A.J.M. Al-Mohammedawi

ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: alijber1987@uomisan.edu.iq
Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)
Moscow, Russia

Abstract. The growth of electric vehicles creates new challenges for electric grids, including the need to maintain power quality in the grid, load redistribution, energy consumption optimization and the integration of renewable energy sources. This paper considers modern approaches to dynamic energy management of charging stations energy consumption. The main focus is on the use of intelligent algorithms, such as V1G (unidirectional charging) and V2G (bidirectional charging), as well as demand forecasting and energy storage systems. The prospects for applying machine learning and artificial intelligence in charging station management are also considered. The results of the analysis show that optimized energy management algorithms can improve grid balancing, minimize infrastructure costs, and reduce CO₂ emissions. Current issues, such as protocol standardization, reconciliation of interests of operators and users, and the need for grid modernization are discussed.

Keywords: optimization algorithms, renewable energy, dynamic energy management, charging stations, smart charging, demand forecasting, V2G.

For citation: U.K. Yushkevich, B.N. Sidorov and A.J.M. Al-Mohammedawi, “Dynamic energy management of electric charging station: modern approaches and technologies”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 117-128, 2025. EDN RKDZLF

I. Введение

Транспортный сектор является одним из главных источников выбросов парниковых газов, на который приходится примерно 23 % глобальных выбросов CO_2 [1]. С учетом прогнозируемого увеличения к 2050 г. пассажирских перевозок в два раза, а грузовых – в три, необходимость декарбонизации транспортного сектора становится все более актуальной [2]. В рамках Парижского соглашения страны обязались ограничить глобальное потепление уровнем 1,5-2 °C к 2050 г., что делает электрификацию транспорта одним из приоритетных направлений развития [1]. К 2030 г. доля электромобилей (ЭМ) в России прогнозируется на уровне 10-30 % от автопарка, при этом развитие отечественного производства и инфраструктуры является ключевым фактором роста. В 2020 г. мировой парк ЭМ достиг 10 млн ед. Основные барьеры: ограниченный запас хода, длительная зарядка, недостаточная инфраструктура [3].

В 2020 г. насчитывалось 1,3 млн общественных зарядных станций (ЗС), из них быстрых – 30 %; внедряются высокомошные решения (150-600 кВт). Интеграция ЭМ в энергосистему вызывает проблемы: неконтролируемая зарядка приводит к пиковым нагрузкам и нестабильности сети. Для их решения применяются интеллектуальные алгоритмы, позволяющие снизить пиковую нагрузку (на 40,8 %) без увеличения времени зарядки [4-7]. Технологический прогресс в области зарядных устройств привел к появлению высокомошных решений: *Siemens* представил ЗС мощностью 150 кВт, *ABB* – 350 кВт, а *Enercon* – 600 кВт [8]. Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в инфраструктуру ЗС и использование ЭМ как распределенных накопителей (90...95 % времени на парковке) повышают гибкость энергосистемы; к 2050 г. потенциал хранения оценивается до 14 ТВт·ч [4, 5, 7].

Статья посвящена анализу алгоритмов динамического управления энергопотреблением в сетях зарядных станций электромобилей. Основное внимание уделяется следующим аспектам:

- использование интеллектуальных алгоритмов управления зарядкой для снижения пиковых нагрузок;
- интеграция ВИЭ в инфраструктуру ЗС;
- применение технологий машинного обучения и больших данных для прогнозирования спроса и оптимизации зарядки.

II. Проблемы массового использования электромобилей и расширения применения зарядных станций

Развитие зарядной инфраструктуры сопряжено с техническими, экономическими и производственными проблемами, которые усугубляются с ростом числа ЭМ.

1. *Недостаточное количество ЗС.* Например, в Марокко всего 112 общественных ЗС, большинство из них расположены на автомагистралях.

Между крупными городами недостаточно быстрых ЗС, что приводит к образованию очередей и доставляет неудобства пользователям [2, 7].

2. *Увеличение пиковых нагрузок и снижение стабильности сети.* Одновременная зарядка большого количества ЭМ в часы пик перегружает локальные сети и требует дорогостоящей модернизации [9, 10]. На примере Калифорнии: неконтролируемая зарядка может увеличить пиковую нагрузку на 19 % [11], а при повышении доли ЭМ до 50 % нагрузка достигает 279,3 МВт [4], особенно в вечерние часы (с 16:00 до 20:00), что критично для инфраструктуры.

При этом быстрые ЗС существенно снижают качество электроэнергетики в сети общего пользования [5], а именно:

- значительно увеличивают колебания напряжения (быстрые ЗС создают значительную и быстро меняющуюся нагрузку на сеть, что приводит к увеличению амплитуды и частоты колебаний напряжения);
- генерируют гармонические искажения в распределительных сетях [1].

Подобное воздействие негативно влияет на работу трансформаторов, релейных устройств и счетчиков [5, 8].

3. *Недостаточная интеграция ВИЭ.* Несмотря на рост доли ВИЭ в энергосистемах, их использование ограничено из-за нестабильности генерации. Процесс интеллектуального заряда ЭМ с учетом работы ВИЭ может способствовать сглаживанию колебаний, адаптируя графики зарядки к пиковым периодам генерации солнечной и ветровой энергии [2].

4. *Ограничения существующих алгоритмов управления зарядом.*

Традиционные подходы к управлению зарядом ЭМ часто не учитывают временные и пространственные аспекты спроса, а также поведение пользователей, что приводит к неэффективному использованию ресурсов и увеличению затрат [11].

5. *Высокие инвестиционные затраты.*

Высокие инвестиционные затраты связаны с общей стоимостью владения (*TCO – Total Cost of Ownership*) ЗС, которая в пять раз превышает стоимость традиционных заправочных станций. Это включает: затраты на оборудование, расходы на установку, стоимость подключения к сети, эксплуатационные расходы.

Для поддержки растущего числа ЗС требуются значительные инвестиции в модернизацию электрических сетей. По оценкам экспертов, затраты на модернизацию сети могут составлять до 10 % от общих инвестиций в инфраструктуру [1].

6. *Отсутствие единых стандартов на ЗС.* Оно создает проблемы совместимости между различными типами ЗС и ЭМ. Существуют различные стандарты (*Type 2, CHAdeMO, CCS*), что усложняет процесс зарядки и увеличивает затраты на инфраструктуру [5].

III. Перспективные направления

для обеспечения бесперебойной работы зарядных станций

Для обеспечения бесперебойной работы ЗС необходимо решить ряд следующих задач.

1. Интеграция сети с ВИЭ.

Интеграция ЗС с ВИЭ (например, солнечными и ветровыми электростанциями) снижает пиковые нагрузки и выбросы CO_2 , но требует инвестиций. В Канаде интеграция ВИЭ снизила пиковую нагрузку на 18,7 % и затраты на 25 %; в Марокко солнечные панели, установленные вдоль трассы, снизили нагрузку на электрические сети с 167,5 до 136,1 МВт [1, 2, 6, 9, 11, 12].

Интеграция ВИЭ – это актуальное и востребованное направление для большинства регионов России, особенно для удаленных северных и южных территорий. Они способствуют повышению энергетической независимости, улучшению экологической ситуации и развитию локальной экономики. Несмотря на существующие вызовы, государственная поддержка, технологические инновации и успешные региональные проекты подтверждают высокий потенциал и значимость этого направления для устойчивого развития российских регионов. К 2035 г. ожидается, что суммарная мощность ВИЭ в России превысит 12 ГВт, что свидетельствует о долгосрочной востребованности направления. Развитие отечественных технологий и локализация производства оборудования делают ВИЭ более доступными для регионов.

2. Использование систем накопления энергии.

Для сглаживания нестабильности ВИЭ используются системы накопления энергии, чаще всего литий-ионные аккумуляторы с КПД до 80 % и емкостью до 480 ГВт·ч [5, 6, 7, 9, 12]. Можно привести следующие примеры успешного использования системы накопления энергии.

А. Проект в Рабате. Зарядная станция с солнечной электростанцией мощностью 14 кВт и аккумулятором емкостью 20 кВт·ч. Среднее потребление за сеанс, т.е. за один цикл зарядки ЭМ на зарядной станции, составило 12 кВт·ч (что позволяет обеспечить 60 км пробега) [2].

В. Проект *Parker* в Дании. Продемонстрировано применение *V2G* для поддержки энергосистемы – снижение пиковых нагрузок на 7 % и увеличение доли ветровой энергии [13].

Таким образом, сочетание солнечных и ветровых электростанций с системой накопления энергии может значительно повысить надежность и эффективность зарядной инфраструктуры.

3. Внедрение алгоритмов оптимизации энергопотребления.

Оптимизация энергопотребления с помощью специальных алгоритмов позволяет снизить пиковые нагрузки, интегрировать ВИЭ и минимизировать затраты [2, 6, 14].

Особенностью алгоритмов оптимизации является то, что они:

– обеспечивают координацию заряда с периодами максимальной генерации ВИЭ;

– учитывают состояние сети и поведение пользователей;

– прогнозируют поведение пользователей в зависимости от различных факторов, например, погоды, в ремни суток, времени года и т.п.

Примеры применения алгоритмов оптимизации следующие.

А. Динамическая оптимизация заряда. Динамические алгоритмы, например, *PoN*, позволяют снизить пиковую нагрузку на 40,8 % без увеличения времени зарядки. Это особенно актуально при ограниченной мощности подстанций [6].

В. «Умные» системы управления зарядом (*V1G* и *V2G*). *V1G* управляет временем заряда, смещая его на периоды низкой нагрузки (в Калифорнии это позволило снизить пиковую нагрузку на 11 %). *V2G* позволяет возвращать энергию в сеть, что помогает сбалансировать нагрузку (в Дании это позволило снизить пиковую нагрузку на 7 %) [10].

4. Внедрение алгоритмов машинного обучения.

Машинное обучение применяется для прогнозирования спроса и оптимизации процесса заряда. Алгоритмы *LSTM* предсказывают пиковые нагрузки с точностью до 95 % [6, 7], анализируя историю потребления, погоду и поведение пользователей. Анализ 2835 сеансов в Марокко показал, что 95 % ЗС потребляют менее 25 кВт·ч (60 км пробега [5]). Алгоритмы оптимизации позволяют перенести процессы заряда ЭМ на ночное время и снизить пиковые нагрузки в вечерние часы.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ алгоритмов управления зарядкой ЭМ.

Таблица 1.
Сравнительный анализ алгоритмов управления зарядкой ЭМ

Table 1.
Comparative analysis of EV charging control algorithms

Алгоритм	Суть алгоритма	Достоинства	Недостатки
<i>V1G</i>	Управление временем зарядки (только в одну сторону: от сети к аккумулятору)	Снижает нагрузку на сеть, простота внедрения	Отсутствует возможность выдачи энергии обратно в сеть
<i>V2G</i>	Двунаправленная зарядка (может отдавать энергию обратно в сеть)	Помогает сбалансировать сеть, позволяет получать доход	Требует дорогостоящего оборудования, снижается ресурс аккумулятора
<i>PoN</i>	Зарядка по мере необходимости (динамическое распределение мощности)	Максимально снижает пиковые нагрузки, гибко реагирует на ситуацию	Сложная реализация, требуются данные в реальном времени

Алгоритмы оптимизации реализуются с помощью интеллектуальных ЗС.

IV. Интеллектуальные зарядные станции и их архитектура

Интеллектуальные зарядные станции (ИЗС) – ключевой элемент инфраструктуры, позволяющий оптимизировать зарядку ЭМ с учетом состояния сети, ВИЭ и предпочтений пользователей.

Архитектура ИЗС включает следующие составляющие.

1. Основные компоненты.

ИЗС состоят из нескольких ключевых компонентов, которые обеспечивают их функциональность и эффективность:

- зарядные порты ИЗС поддерживают одно- и двунаправленную зарядку ($V1G$ и $V2G$), что позволяет не только заряжать ЭМ, но и возвращать энергию в сеть для балансировки нагрузки и повышения надежности [14];

- системы управления ИЗС построены по трехуровневой иерархии: верхний уровень – оптимизация расписания зарядки, средний – распределение мощности, нижний – управление отдельными портами, такая архитектура обеспечивает эффективное управление зарядкой ЭМ с учетом потребностей пользователей и состояния сети [1, 14];

- системы накопления энергии, такие как литий-ионные аккумуляторы, позволяют ИЗС накапливать энергию от ВИЭ и сглаживать колебания потребления и выработки [2, 14].

2. Модульная и масштабируемая архитектура.

Современные ИЗС проектируются с учетом модульности, что позволяет добавлять или удалять компоненты в зависимости от потребностей. Например, ЗС могут быть оснащены несколькими силовыми электронными преобразователями для обеспечения высокой мощности зарядки. Это не только увеличивает гибкость, но и снижает капитальные затраты на установку и обслуживание [3, 15]. ИЗС требуют использования все более совершенных протоколов связи. Для их эффективной работы необходимо использовать различные протоколы связи, которые позволяют обеспечить взаимодействие между различными системами и компонентами:

- *OCPP (Open Charge Point Protocol)*: обеспечивает связь между ЗС и системами управления, позволяя операторам управлять зарядкой, обработкой транзакций и мониторингом состояния зарядных устройств [1, 14, 16];

- *OCPI (Open Charge Point Interface)*: обеспечивает связь между поставщиками услуг мобильности и операторами ЗС, позволяя легко обмениваться информацией о зарядных точках и авторизации пользовательских операций [5, 13, 16];

- *OpenADR (Open Automated Demand Response)*: позволяет передавать сигналы о спросе на электроэнергию от коммунальных служб к пользователям ЗС, что дает возможность управлять нагрузкой и оптимизировать

использование ресурсов [6, 14, 16].

ИЗС не только обеспечивают зарядку, но и предлагают ряд интеллектуальных функций, таких как оптимизация процесса заряда. Используя описанные выше алгоритмы, ИЗС могут координировать зарядку, снижая пиковую нагрузку на сеть без увеличения общего времени заряда [1].

Дальнейшее развитие ИЗС требует внедрения современных протоколов и стандартов (например, *ISO 15118*) для обеспечения совместимости и интеграции различных систем [6]. Важна интеграция с системами *V2G* и *V2H*, чтобы ЭМ могли не только заряжаться, но и отдавать энергию в сеть, повышая устойчивость энергосистемы [11, 14].

Использование искусственного интеллекта и анализа больших данных позволит оптимизировать процессы зарядки и управления нагрузкой, включая прогнозирование спроса и адаптацию расписаний в режиме реального времени [1].

V. Оптимизация времени использования зарядных станций

Поведение пользователей влияет на эффективность зарядной инфраструктуры. Анализ моделей зарядки и внедрение стимулов позволяют оптимизировать нагрузку на сеть.

Паттерны времени использования ЗС следующие.

1. Временные характеристики зарядки.

На основе анализа данных о зарядке ЭМ можно выделить несколько ключевых паттернов. В среднем, 70 % зарядных сессий приходится на рабочие дни, пик активности – вечером, средняя продолжительность сессии сеанса зарядки составляет около 48 минут (12 кВт·ч, ~ 60 км) [1, 4].

2. Энергопотребление и предпочтения.

Более 95 % сеансов зарядки потребляют менее 25 кВт·ч, что говорит о том, что большинство пользователей заряжают ЭМ для коротких поездок [5]. Пользователи обращают внимание на стоимость и выбирают время зарядки в периоды низких тарифов, что подтверждает важность тарифных планов для стимулирования зарядки в непиковые часы [2, 4].

Факторы, влияющие на поведение пользователей, следующие.

1. *Местоположение ЗС.* Оно существенно влияет на поведение пользователей. В торговых центрах зарядка длится дольше из-за совмещения с покупками. На рабочих местах зарядки распределяются равномерно в течение дня. [4, 6]. Быстрые ЗС на основных маршрутах упрощают планирование дальних поездок и делают ЭМ более привлекательными.

2. *Тарифные планы и стимулы.* Они заметно влияют на поведение пользователей. Снижение стоимости зарядки в непиковые часы может привести к смещению графика зарядки на 30 %; например, скидка 10 % в ночное время увеличивает количество зарядок в это время. В США тарифы *Time-of-Use* снизили вечерние пиковые нагрузки на 20 %. Программа BMW

ChargeForward показала, что финансовые стимулы мотивируют пользователей менять привычки, связанные с зарядкой [5, 6, 10].

3. *Удобство пользования.* Применение методов геоинформационного анализа (GIS) позволяет эффективно планировать расположение станций с учетом доступности ВИЭ. Исследования показывают, что правильное размещение может существенно увеличить использование зарядных устройств, что, в свою очередь, поможет снизить нагрузку на электрические сети [6, 8].

4. *Учет предпочтений пользователей.* Например, целесообразно регулировать степень и время заряда батарей в зависимости от личных предпочтений для предложения наиболее подходящих времени и места для заряда [2].

5. *Немонетарные стимулы.* Они могут также способствовать изменению поведения пользователей. К таковым, например, можно отнести бонусы за частое использование ЗС [2].

VI. Заключение

Зарядные станции играют важную роль в оптимизации энергопотребления и снижении нагрузки на сеть. Проведенное исследование подчеркивает ключевую роль зарядной инфраструктуры для ЭМ в трансформации энергетики и транспорта. Быстрое увеличение числа ЭМ создает как возможности, так и вызовы, связанные с управлением энергопотреблением, интеграцией ВИЭ и минимизацией воздействия на электрические сети.

Интеллектуальные алгоритмы управления энергопотреблением ЗС позволяют снизить пиковую нагрузку без увеличения времени зарядки. Интеграция ВИЭ (солнечной и ветровой энергии) также позволяет повысить эффективность зарядной инфраструктуры и снизить пиковые нагрузки. Анализ сеансов зарядки показывает, что 95 % зарядок потребляют менее 25 кВт·ч, что важно учитывать при проектировании инфраструктуры и тарификации. Технологии *V2G* позволяют выдавать энергию в сеть, снижая пиковые нагрузки и повышая стабильность энергосистемы [13].

Результаты анализа подчеркивают необходимость стратегического планирования при размещении ЗС.

© Юшкевич У.К., 2025

© Сидоров Б.Н., 2025

© Аль-Мохаммедави А.Д.М., 2025

Поступила в редакцию 11.07.2025

Принята к публикации 22.07.2025

Received 11.07.2025

Accepted 22.07.2025

Библиографический список

- [1] Aoun A., Adda M., Ilinca A., Ghandour M., Ibrahim H. Dynamic charging optimization algorithm for electric vehicles to mitigate grid power peaks // *World Electr. Veh. J.* 2024. Vol. 15. 324. DOI: 10.3390/wevj15070324.
- [2] Erdemir D., Dincer I. Novel energy management options for charging stations of electric vehicles in buildings without increasing peak demand for sustainable cities // *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 111. 105552. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105552.
- [3] Перспективы электромобильного транспорта // Аналитическое агентство «АВТОСТАТ». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autostat.ru/> (дата обращения 25.05.2025).
- [4] Erdemir D., Dincer I. Development of solar-driven charging station integrated with hydrogen as an energy storage option // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 257. 115436. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115436.
- [5] Hovet S., Farley B., Perry J., Kirsche K., Jerue M., Tse Z.T.H. Introduction of electric vehicle charging stations to university campuses: a case study for the University of Georgia from 2014 to 2017 // *Batteries*. 2018. Vol. 4(2). 27. DOI: 10.3390/batteries4020027.
- [6] IRENA. Electric-Vehicle Smart Charging. Innovation Landscape Brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019. Available online: www.irena.org/publications.
- [7] Юшкевич У.К., Сидоров Б.Н., Малькова Е.В. Исследование алгоритмов динамического управления энергопотреблением в сети зарядных станций // *Интернаука*. 2024. № 11-2(328). С. 39-41.
- [8] Qiu K., Ribberink H., Entchev E. Reducing the impact of dynamic wireless charging of electric vehicles on the grid through renewable power integration // *DeCarbon*. 2025. Vol. 7. DOI: 10.1016/j.decarb.2024.100092
- [9] Мубитанг А., Юшкевич У.К. Технико-экономический расчет методом лепестковых диаграмм для солнечных панелей // *Студенческий вестник*. 2022. № 28-3(220). С. 64-70.
- [10] Zheng A., Yan X. The location problem of EV charging stations: Research trends, critical gaps, and a future agenda. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/363698105>.
- [11] Rochd A., Laamim M., Benazzouz A., Kissaoui M., Raihani A., Sund H.J. Public charging infrastructure for EVs: A comprehensive analysis of charging patterns & real-world insights – Case study of Rabat City, Morocco // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 216–234. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.05.259.
- [12] Ютг В.Е., Сидоров К.М., Грищенко А.Г., Оспанбеков Б.К., Куковинец О.В., Сидоров Б.Н., Севастьянова Т.В., Феофанов С.А., Строганов В.И. Результаты практической реализации систем преобразования электроэнергии для автономных электрических станций. М.: МАДИ, 2023. – 316 с.
- [13] Spencer S.I., Fu Z., Apostolaki-Iosifidou E., Lipman T.E. Evaluating smart charging strategies using real-world data from optimized plugin electric vehicles // *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. Vol. 100. 103023. 2021. DOI: 10.1016/j.trd.2021.103023
- [14] Аль-Мохаммедави А.Д.М., Юшкевич У.К. Сравнительный анализ односторонних и двусторонних зарядных станций для электромобилей: инфраструктура,

проблемы и возможности // Международный технический журнал. 2024. № 3 (90). С. 16–31.

- [15] Мубитанг А., Юшкевич У.К., Куковинец О.В., Аббасов Э.М. Моделирование повышающего преобразователя напряжения с чередованием электротранспортного назначения // Оригинальные исследования. 2022. Т. 12. № 7. С. 150-159.
- [16] Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави А.Д.М. Моделирование в Matlab процесса заряда аккумулятора электромобиля от сети и выдачи мощности в сеть (работа в режиме G2V и V2G) // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 93-111.

References

- [1] A. Aoun, M. Adda, A. Ilinca, M. Ghandour and H. Ibrahim, “Dynamic charging optimization algorithm for electric vehicles to mitigate grid power peaks”, *World Electr. J. Veh.*, vol. 15, pp. 324, 2024. DOI: 10.3390/wevj15070324
- [2] D. Erdemir and I. Dincer, “Novel energy management options for charging stations of electric vehicles in buildings without increasing peak demand for sustainable cities”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 111, 2024. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105552
- [3] Prospects of electric vehicles, Analytical agency «AUTOSTAT». [Online]. Available at: <https://www.autostat.ru/> [Accessed: May, 25, 2025].
- [4] D. Erdemir and I. Dincer, “Development of solar-driven charging station integrated with hydrogen as an energy storage option”, *Energy Conversion and Management*, vol. 257, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115436
- [5] S. Hovet, B. Farley, J. Perry, K. Kirsche, M. Jerue and Z.T.H. Tse, “Introduction of electric vehicle charging stations to university campuses: a case study for the University of Georgia from 2014 to 2017”, *Batteries*, vol. 4(2), 2018. DOI: 10.3390/batteries4020027
- [6] IRENA. Electric-Vehicle Smart Charging. Innovation Landscape Brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. [Online]. 2019. ISBN 978-92-9260-141-6. Available at: www.irena.org/publications
- [7] U.K. Yushkevich, B.N. Sidorov and E.V. Malkova, “Research of algorithms for dynamic energy consumption management in a network of charging stations”, *Inter-nauka*, no. 11-2(328), pp. 39-4, 2024.
- [8] K. Qiu, H. Ribberink and E. Entchev, “Reducing the impact of dynamic wireless charging of electric vehicles on the grid through renewable power integration”, *De-Carbon*, vol. 7, 2025. DOI: 10.1016/j.decarb.2024.100092
- [9] A. Mubitang and U. K. Yushkevich, “Technical and economic calculation using petal diagrams for solar panels”, *Student Bulletin*, no. 28-3(220), pp. 64-70, 2022.
- [10] A. Zheng and X. Yan, “The location problem of EV charging stations: research trends, critical gaps, and a future agenda”. [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/363698105>
- [11] A. Rochd, M. Laamim, A. Benazzouz, M. Kissaoui, A. Raihani and H.J. Sund, “Public charging infrastructure for EVs: A comprehensive analysis of charging patterns & real-world insights – Case study of Rabat City, Morocco”, *Energy Reports*, vol. 9, pp. 216–234, 2023. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.05.259
- [12] V.E. Yutt, K.M. Sidorov and A.G. Grishchenko, B.K. Ospanbekov, O.V. Kukovinets, B.N. Sidorov, T.V. Sevastyanova, S.A. Feofanov and V.I. Stroganov, *Results of the practical implementation of power conversion systems for autonomous power plants*, Moscow: MADI, 2023.

- [13] S.I. Spencer, Z. Fu, E. Apostolaki-Iosifidou and T.E. Lipman, "Evaluating smart charging strategies using real-world data from optimized plugin electric vehicles", *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, vol. 100, 103023, Nov. 2021. DOI: 10.1016/j.trd.2021.103023
- [14] Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil and U. K. Yushkevich, "Comparative analysis of unilateral and bilateral electric vehicle charging stations: infrastructure, challenges, and opportunities", *International Technical Journal*, no. 3 (90), pp. 16–31, 2024.
- [15] A. Mubitang, U. K. Yushkevich, O. V. Kukovinets and E. M. Abbasov, "Modeling of a step-up voltage converter with alternating current for electric vehicles", *Original Research*, vol. 12, no. 7, pp. 150-159, 2022.
- [16] B.N. Sidorov and Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, "Matlab simulation of battery charging from the grid and discharging to the grid (G2V and V2G operation)", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 93-111, 2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юшкевич Устинья Кирилловна, аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Российская Федерация.

Ustinya K. Yushkevich, postgraduate student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation.

Сидоров Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Российская Федерация.

Boris N. Sidorov, D. Sci. (Eng.), professor of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation.

Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшkil, аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Российская Федерация.

Ali Jber Mshkil Al-Mohammedawi, postgraduate student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation.

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 3

Nizhny Novgorod 2025

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enzov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Electronic version:
<http://www.ie.nntu.ru>*

*Periodic printed edition registered by Roskomnadzor
ПН № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2025

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
Vukolov V.Y., Zharinov I.V. Development of algorithms for implementation of multicriterial determination of the optimal configuration of 6-35 kV distribution electric networks.....	4
Khvatov O.S., Markov D.K., Bilyaletdinov T.Z. Utilization of hybrid buffer energy storage based on batteries and supercapacitors in asynchronous variable-speed diesel-generator power plant.....	22
Ryzhova E.L. The use of information technologies in diagnostic systems for electric rolling stock equipment – methods, examples of implementation, development prospects.....	38
Beloshistov A.I., Serov A.L., Beloshistov A.A. Microprocessor device for advance protective disconnection of shaft cable.....	61
Barabanova L.P., Kuznetsov N.A., Loenteva V.S. Mathematical simulation of magnetic field of kilometer (long-wave) frequency range biaxial magnetic emitter of electromagnetic positioning system.....	74
POWER INDUSTRY	84
Tokarev I.S. Multifunctional electric energy storage system in gas industry.....	84
Varivodov V.N., Kovalev D.I., Golubev D.V., Elfimov S.A., Sergeeva A.E. Current state of development of polymer-insulated cable joints.....	98
Yushkevich U.K., Sidorov B.N., Al-Mohammedawi A.J.M. Dynamic energy management of electric charging station: modern approaches and technologies.....	117

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин, С.В. Нуякшева**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 22.09.2025. Дата выхода в свет: 29.09.2025

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,75. Тираж 25 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24