

**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 2024**

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. № 3 (27). – 142 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

Владимир Георгиевич Титов

д-р техн. наук, профессор

Олег Станиславович Хватов

д-р техн. наук, профессор

Юрий Иванович Хохлов

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.ntnu.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, 2024

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Илларионов Р.И.</b> Применение алгоритма Нелдера-Мида для определения места повреждения на воздушных ЛЭП с ответвлениями.....	<b>4</b>
<b>Хватов О.С., Тарпанов И.А., Билялетдинов Т.З.</b> Автономная дизель-генераторная электростанция на основе асинхронного генератора с вентильным возбуждением и системой автоматического регулирования напряжения с векторным управлением.....	<b>19</b>
<b>Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С.</b> Обоснование применения частотных электроприводов для судовых якорно-швартовых механизмов.....	<b>32</b>
<b>Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А.</b> Новая серия микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д....	<b>50</b>
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>65</b>
<b>Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е.</b> Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей, оснащенных средствами компенсации реактивной мощности, на трубопроводы .....	<b>65</b>
<b>Вуколов В.Ю.</b> О надежности электроснабжения устройств сигнализации, централизации и блокировки электрифицированных железных дорог.....	<b>82</b>
<b>Маслеева О.В., Крюков Е.В., Петухов Я.И.</b> Энергетическая и экологическая оценка городского транспорта.....	<b>100</b>
<b>Кумагина Е.А., Плехов А.С.</b> Минимизация рисков нарушений электроснабжения при переходе к «зеленой» энергетике.....	<b>116</b>
<b>ХРОНИКА.....</b>	<b>130</b>
<b>К 60-летию кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.....</b>	<b>130</b>

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.315.1

EDN UOTUKF

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЛДЕРА-МИДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛЭП С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

**А.Л. Куликов**ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***А.А. Лоскутов**ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov\\_aa@nntu.ru](mailto:loskutov_aa@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***Р.И. Илларионов**ORCID: 0009-0009-5760-0924 e-mail: [illarionov.roma123@yandex.ru](mailto:illarionov.roma123@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия*

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) играют важную роль в процессе передачи электрической энергии. Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей важно оперативно обнаруживать и устранять повреждения на ЛЭП, связанные с короткими замыканиями. Точное определение местоположения повреждения (ОМП) минимизирует финансовые затраты предприятий электрических сетей и обеспечивает надежность энергоснабжения. Предложен алгоритм ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями, в состав которого интегрирован метод оптимизации (поиска минимума) функции от нескольких переменных Нелдера-Мида. Обоснованность применения предложенного алгоритма ОМП ЛЭП подтверждается результатами имитационного моделирования в программном комплексе *MATLAB/Simulink*, а также полунатурным экспериментом с осциллограммами аварийных событий на воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС 110 кВ «Хмелевицы».

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, ЛЭП с ответвлениями, метод Нелдера-Мида, определение места повреждения, расстояния до места повреждения.

**Для цитирования:** Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Илларионов Р.И. Применение алгоритма Нелдера-Мида для определения места повреждения на воздушных ЛЭП с ответвлениями // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 4-18. EDN UOTUKF

# APPLICATION OF THE NELDER-MEAD ALGORITHM FOR FAULT POINT LOCATION ON OVERHEAD POWER LINES WITH BRANCHES

**A.L. Kulikov**

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Loskutov**

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov\\_aa@nntu.ru](mailto:loskutov_aa@nntu.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**R.I. Illarionov**

ORCID: 0009-0009-5760-0924 e-mail: [illarionov.roma123@yandex.ru](mailto:illarionov.roma123@yandex.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Overhead power transmission lines (OPT) play an important role in the process of electric energy transmission. To ensure the reliability of power supply to consumers, it is important to quickly detect and eliminate faults on overhead power transmission lines associated with short circuits. The quickly fault point location (FPL) minimizes the financial costs of electric grid companies and ensures the reliability of the power supply system. The authors propose an algorithm for the FPL on overhead power transmission lines with branches, which integrates the optimization method (search for the minimum) of the Nelder-Mead function of several variables. The validity of the proposed algorithm for the FPL is ensured by the accurate results of simulation modeling in the MATLAB/Simulink software package, as well as a semi-naturalistic experiment with oscillograms of emergency events on the 110 kV Shakhunya-Vakhtan overhead power transmission line with a tap at the 110 kV Khmelevitsy substation.

**Keywords:** distance to fault point, fault point location, Nelder-Mead, overhead power lines, power transmission lines with branches.

**For citation:** A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and R.I. Illarionov, “Application of the Nelder-Mead algorithm for fault location on overhead power transmission lines with branches”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-18, 2024. EDN UOTUKF

## I. Введение

На работу транспорта и распределение электрической энергии оказывают влияние такие факторы, как неблагоприятные погодные условия (например, повышенные ветровые нагрузки, удары молнии, падения деревьев), а также износ оборудования воздушных линий электропередачи

(ЛЭП), в том числе, опор, изоляции и провода [1, 2]. Воздействие данных факторов приводит к повреждениям воздушных ЛЭП с различным сопротивлением, различного вида (одно-, двух-, трехфазные коротких замыканий (КЗ)) и в различных местах, в том числе, на ответвлениях [2, 3].

В эксплуатационной практике предприятий электрических сетей наиболее широкое распространение получили методы определения местоположения повреждения (ОМП) воздушных ЛЭП по параметрам аварийного режима (ПАР), реализованные в таких устройствах, как терминалы релейной защиты, регистраторы аварийных событий, специальные устройства ОМП ЛЭП [3-7]. Методы ОМП по ПАР на ЛЭП с ответвлениями применяются, как правило, при всех видах КЗ на ЛЭП 110 кВ, а также междуфазных КЗ на ЛЭП 6-35 кВ [3, 5, 6]. Выделяют два основных подхода [3, 6, 7]:

- специальные алгоритмы ОМП, разработанные для ЛЭП с ответвлениями;
- сочетание методов определения поврежденного ответвления с последующим применением традиционных алгоритмов ОМП для ЛЭП без ответвлений.

Следует отметить, что процедура определения поврежденного ответвления ЛЭП представляет самостоятельную научно-техническую задачу, а варианты ее решения достаточно подробно представлены в [6]. В состав методов ОМП по ПАР могут входить различные оптимизационные процедуры и итерационные алгоритмы, которые в том числе отыскивают на ЛЭП минимумы: напряжения, реактивной мощности, реактивного сопротивления и других функций [3]. Целесообразно при ОМП ЛЭП по ПАР использовать методы ускорения процесса вычислений, в частности, методы Фибоначчи, золотого сечения [8, 9] и другие [10, 11]. Однако, алгоритм поиска Нелдера-Мида [12] при реализации ОМП ЛЭП по ПАР практически не применялся.

Алгоритм Нелдера-Мида нашел применение в различных областях [12]. Его отличительной особенностью является использование неградиентного подхода, что позволяет устранить «овражные» эффекты и быть полезно для обеспечения устойчивости ОМП по ПАР в условиях воздействия случайных факторов.

Целью статьи является исследование применимости алгоритма Нелдера-Мида при ОМП по ПАР на воздушных ЛЭП с ответвлениями.

Обоснованность использования алгоритма Нелдера-Мида при ОМП ЛЭП по ПАР на примере воздушных ЛЭП 110 кВ обеспечивается результатами имитационного моделирования и проведением полунатурных экспериментов.

## II. Разработка алгоритма ОМП по ПАР на воздушных ЛЭП с ответвлениями на основе метода Нелдера-Мида

Метод Нелдера-Мида (известный также как симплекс-метод) – способ оптимизации (поиска минимума) функции нескольких переменных, позволяющий реализовать вычисления без использования производных и градиентов. Поэтому он целесообразен для оптимизации негладких и зашумленных функций с различными «овражными» эффектами [12]. Количество переменных зависит от мерности пространства –  $n$ . Под симплексом понимается многогранник, деформируемый вокруг точки экстремума функции в ходе безусловной оптимизации.

Критерий, на основе которого реализуется предлагаемый алгоритм ОМП по ПАР, заключается в поиске минимальной разницы между вычисленными значениями модуля (квадрата) напряжения в заданных точках поврежденной ЛЭП (рис. 1).

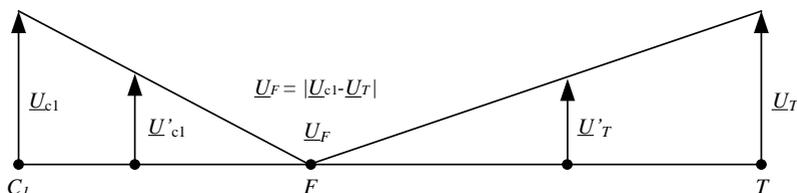


Рис. 1. Изменение напряжения вдоль поврежденного участка ЛЭП с ответвлением

Fig. 1. Change in voltage along the damaged section of a power line with a branch

Применительно к ЛЭП с ответвлениями (рис. 2) алгоритм ОМП дополняется процедурой поиска поврежденного ответвления ЛЭП с использованием одного из известных методов, изложенных, например, в [6].

Схема на рис. 2 включает в себя следующие обозначения:  $E_{c1}$ ,  $E_{c2}$ ,  $E_{c3}$  и  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ ,  $Z_{c3}$  – соответственно комплексные ЭДС и сопротивления систем по концам воздушной ЛЭП;  $Z'_{л1}$  и  $Z''_{л1}$  – комплексные сопротивления участка линии до и после повреждения;  $Z_{л2}$ ,  $Z_{л3}$  – комплексные сопротивления второго и третьего ответвлений ЛЭП;  $F$  и  $T$  – точки повреждения и ветвления воздушной ЛЭП;  $R_f$  – переходное сопротивление в месте повреждения.

Процесс вычислений включает в себя определение напряжения для каждой выбранной точки на ЛЭП на базе измеренных в месте установки терминалов защиты токов и напряжений на концах ЛЭП. Выбор расчетных точек осуществляется с установленным шагом (рис. 3), задание которого определяет точность расчета расстояния до места повреждения.

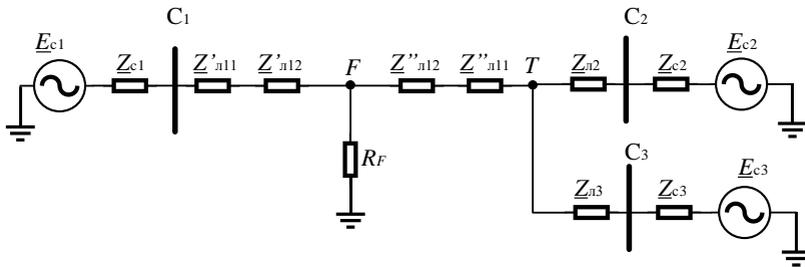


Рис. 2. Пример схемы замещения поврежденной ЛЭП с ответвлением

Fig. 2. An example of a replacement circuit for a damaged power line with a branch

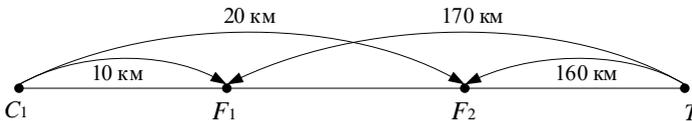


Рис. 3. Примеры выбора точек на поврежденной ЛЭП

Fig. 3. Examples of selecting points on a damaged power line

В ходе реализации итерационной процедуры минимум функции разности модуля напряжений позволяет определить расчетное расстояние до места повреждения.

Применительно к рассматриваемому алгоритму ОМП по ПАР ЛЭП с ответвлениями метод Нелдера-Мида существенно упрощается, а симплекс (многогранник) преобразуется в отрезок. Оптимизационные вычисления включают сравнение значений функции в вершинах симплекса и последующее его смещение в сторону минимума при помощи итерационной процедуры. Блок схема алгоритма приведена на рис. 4.

Перед началом вычислений (рис. 4) вводятся коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $y$ , которые являются соответственно коэффициентами отражения, сжатия и растяжения, например, [12]. Рекомендуется выбирать значения  $a = 1$ ,  $b = 0,5$ ,  $y = 2$ . В ходе расчетов (рис. 4) реализуются следующие операции.

1. Вычисляются значения функции  $f_1 = (x_1)$  и  $f_2 = (x_2)$  в вершинах симплекса.

2. Определяются наибольшее  $f_h$  и наименьшее  $f_l$  значение функции, и соответствующие им точках  $x_h$ ,  $x_l$ .

3. Выполняется операция отражения точки  $x_h$  относительно точки  $x_l$  (рис. 5а) с получением точки  $x_r$ , а также значения функции  $f_r = (x_r)$ . Положенные точки  $x_r$  определяется по (1):

$$x_r = (1 + a)x_l - ax_h . \quad (1)$$

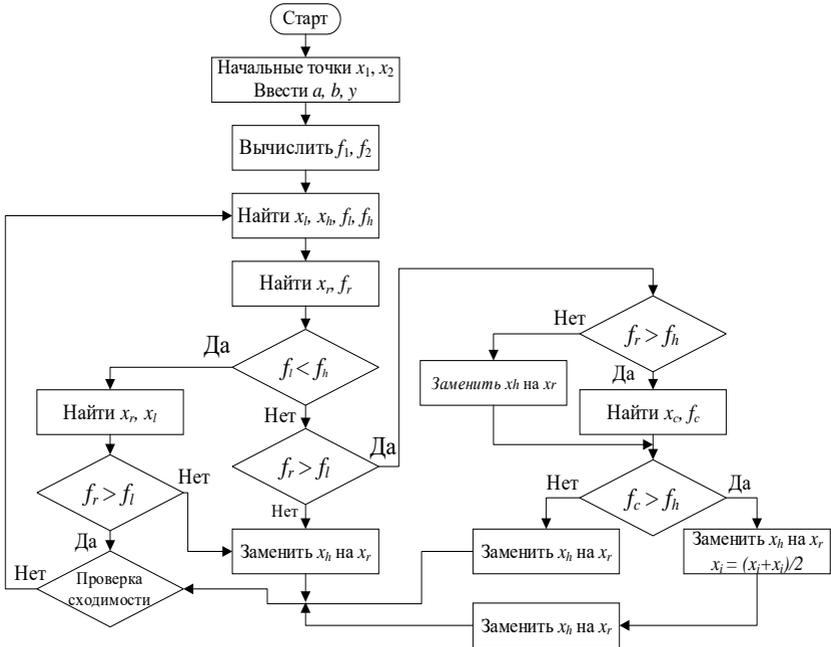


Рис. 4. Блок-схема алгоритма вычислений по методу Нелдера-Мида для реализации ОМП ЛЭП

Fig. 4. Block diagram of the calculation algorithm using the Nelder-Mead method for implementing fault point location on power lines

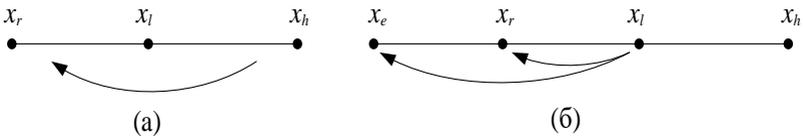


Рис. 5. Примеры реализации операций: отражения (а); растяжения (б)

Fig. 5. Examples of implementation of operations: reflection (a); stretching (b)

4. Реализуется сравнение значений функций  $f_r$  и  $f_i$ :

– если  $f_r < f_i$ , то получено новое наименьшее значение функции и, следовательно, производится растяжение в этом направлении с нахождением точки  $x_e$  по (2) и значения функции  $f_e = f(x_e)$ , (рис. 5. б):

$$x_e = yx_e + (1 - y)x_l; \quad (2)$$

– если  $f_e < f_l$ , то производится замена точки  $x_h$  на точку  $x_e$  и выполняется проверка другой точки симплекса на сходимость. Если сходимость достигнута, то алгоритм останавливается, в противном случае переходим на шаг 2;

– если  $f_e > f_l$ , то полученная точка исключается из вычислений и следует замена точки  $x_h$  на точку  $x_r$  с последующей проверкой на сходимость. При отрицательной проверке на сходимость осуществляется переход на шаг 2;

– если  $f_r < f_l$ , то  $x_r$  является лучшей точкой, и реализуется замена точки  $x_h$  на точку  $x_r$  и, если сходимость не достигнута, осуществляется возврат к шагу 2;

– если  $f_r > f_l$ , то переходим к шагу 5;

5. Реализуется сравнение функций  $f_r$  и  $f_h$ :

– если  $f_r > f_h$ , то переходим к шагу сжатия.

– если  $f_r < f_h$ , то заменяется точка  $x_h$  на точку  $x_r$  и значение функции  $f_h$  на  $f_r$  с последующим сжатием (рис. 6а);

– понятно, что если  $f_r > f_h$ , то точка находится ближе, тогда находятся точка  $x_c$  из выражения (3) и функция  $f_c$  с помощью операции сжатия (рис. 6а):

$$x_c = bx_h + (1 - b)x_r; \quad (3)$$

– если  $f_r < f_h$ , то сначала заменяется точка  $x_h$  на точку  $x_r$ , после чего производится сжатие с последующим нахождением точки  $x_c$  из выражения (4) (рис. 6. б):

$$x_c = bx_r + (1 - b)x_l. \quad (4)$$

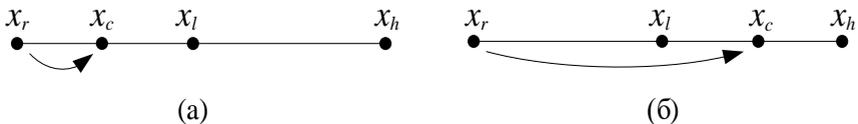


Рис. 6. Примеры реализации процедуры сжатия

Fig. 6. Examples of implementation of the compression procedure

6. Реализуется сравнение функций  $f_c$  и  $f_h$ :

– если  $f_c < f_h$ , то осуществляется замена точки  $x_h$  на точку  $x_c$  и, если сходимость не достигается, то выполняется переход на шаг 2;

– если  $f_c > f_h$ , то происходит уменьшение симплекса (отрезка) в 2 раза. Точка  $x_h$  заменяется на точку  $x_i$ , которую можно найти по (5) и вычисляется функция  $f_i(x_i)$  в этой точке. В последующем проверяется условие сходимости и, если оно не выполняется, то реализуется возврат к шагу 2.

$$x_i = (x_l + x_h) / 2 . \quad (5)$$

Следует отметить, что для положительного результата проверки на сходимость, необходимо, чтобы разность значений функции в точках  $x_h$  и  $x_l$  была меньше заранее заданного числа  $k$ , то есть  $(f_h - f_l) < l$ .

Анализ расчетных операций алгоритма рис. 4 позволяет сделать вывод, что процедура ОМП по ПАР ЛЭП с ответвлениями не требует значительных вычислительных и временных затрат.

### III. Экспериментальная часть

Для исследования характеристик точности алгоритма Нелдера-Мида при ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями была разработана имитационная модель в программном обеспечении *MATLAB/Simulink* (рис. 7).

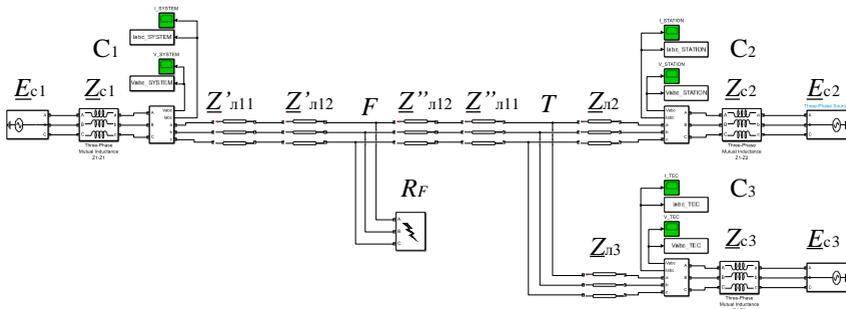


Рис. 7. Схема имитационной модели воздушной ЛЭП с ответвлениями в *MATLAB/Simulink*

Fig. 7. Scheme of a simulation model of an overhead power line with branches in *MATLAB/Simulink*

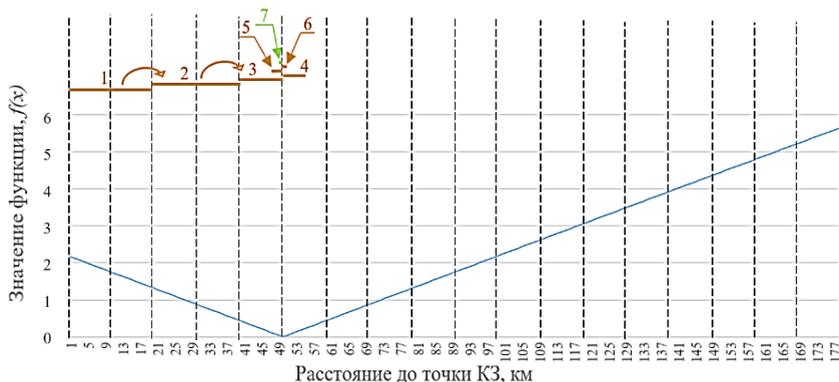
На рис. 7 введены обозначения по аналогии с рис. 2. В составе имитационной модели учитывались следующие параметры воздушной ЛЭП:

– протяженность первого, второго и третьего ответвлений воздушной ЛЭП соответственно 180 км, 80 км и 50 км;

– параметры систем по концам ЛЭП: действующее значение ЭДС  $E_{c1} = E_{c2} = E_{c3} = 110$  кВ, а их сопротивления прямой и нулевой последовательности:  $Z_{1\_c1} = 10 + j10$  Ом,  $Z_{0\_c1} = 1 + j1$  Ом,  $Z_{1\_c2} = 15 + j15$  Ом,  $Z_{0\_c2} = 1,5 + j1,5$  Ом,  $Z_{1\_c3} = 20 + j20$  Ом,  $Z_{0\_c3} = 2 + j2$  Ом;

– линия выполнена на опорах типа УС110-5; марка провода первого ответвления АС-120/19, а второго и третьего АС-240/39; грозозащитный трос марки ОКГТ-С-64 со встроенной волоконно-оптической линией связи; сопротивление земли принято 100 Ом.

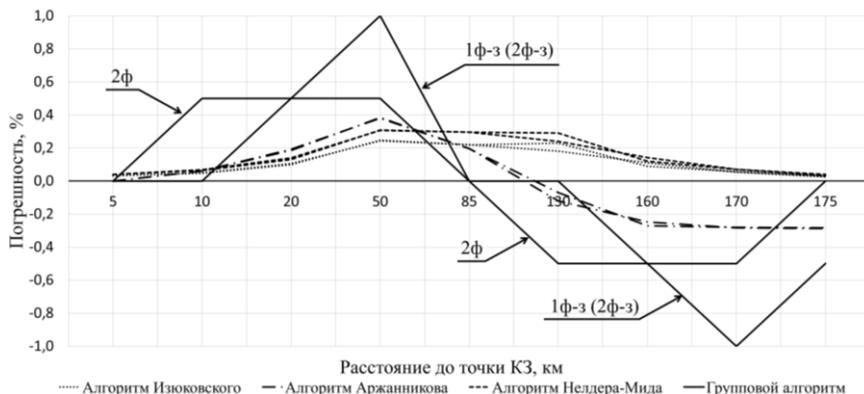
Реализацию итерационного алгоритма Нелдера-Мида при ОМП воздушной ЛЭП с ответвлениями характеризует рис. 8. При моделировании точка КЗ была расположена на расстоянии 50 км от начала первого ответвления (со стороны системы с ЭДС  $E_{c1}$ ). В ходе вычислений потребовалось 7 итераций, а погрешность ОМП ЛЭП составила 0,309 км или 0,17 % от длины воздушной ЛЭП.



**Рис. 8.** Реализация алгоритма Нелдера-Мида в ходе модельных экспериментов при ОМП ЛЭП с ответвлениями

**Fig. 8.** Implementation of the Nelder-Mead algorithm during model experiments with fault point location on power lines with branches

Дополнительно проводилось имитационное моделирование для сопоставительного анализа предложенного алгоритма ОМП ЛЭП с ответвлениями с известными отечественными и зарубежными методами: Аржанникова [3], Изюковского [6, 7], группового метода [13, 14]. Моделированию подлежали различные виды КЗ (рис. 9): однофазное на землю (1ф-з), междуфазное (2ф), двухфазное на землю (2ф-з). Результаты расчета ошибок ОМП при повреждении на первом ответвлении воздушной ЛЭП приведены на (рис. 9).



**Рис. 9. Результаты моделирования в виде графиков погрешностей алгоритмов для несимметричных КЗ**

**Fig. 9. Simulation results in the form of graphs of algorithm errors for asymmetrical short circuits**

Анализ рис. 9 показывает, что применение алгоритма Нелдера-Мида для ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями обеспечивает высокую точность расчета расстояния до места повреждения по сравнению с известными методами.

#### IV. Полунатурные эксперименты

Полунатурные эксперименты проводились с использованием осциллограмм (рис. 10) реального повреждения (двухфазного КЗ фаз В и С), произошедшего на воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС «Хмелевицы».

При реализации ОМП учитывались следующие параметры: протяженность магистрали ЛЭП 31.8 км, протяженность ответвления – 18 км, ответвление расположено на расстоянии 29,04 км от ПС 110 кВ «Шахунья»; грозозащитный трос марки – С-35; для магистрали; марка провода АС-70/11, тип опор ПБ-2; для ответвления: марка провода АС-70/11, тип опор ПД 110-1 – отпайка; сопротивление земли – 100 Ом.

Эквивалентные сопротивления систем схемы замещения ЛЭП 110 кВ ПС «Шахунья» – ПС «Вахтан» с ответвлением на ПС «Хмелевицы» приведены в табл. 1.

В ходе полунатурного эксперимента исследовалась устойчивость алгоритма Нелдера-Мида при ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями к случайному выбору начальных точек симплекса.

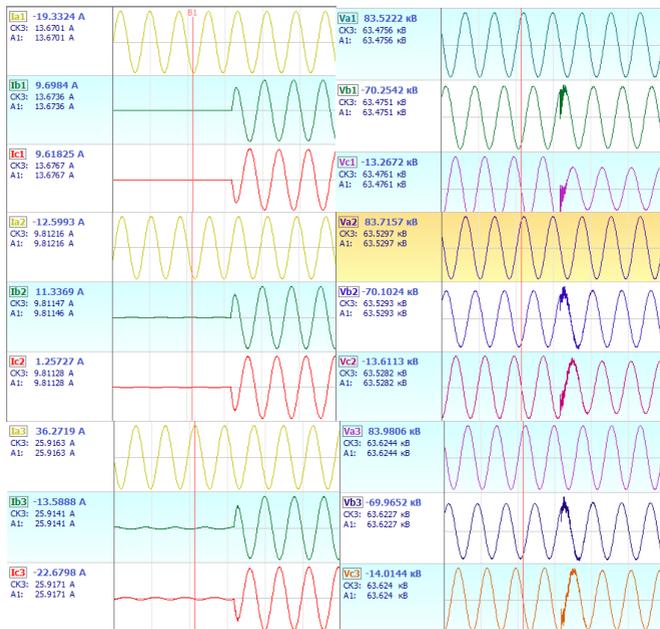


Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений при КЗ на воздушной ЛЭП 110 кВ ПС «Шахунья» – ПС «Вахтан» с ответвлением на ПС «Хмелевицы»

Fig. 10. Oscillograms of currents and voltages during a short circuit on a 110 kV overhead power line Shakhunya-Vakhtan with a branch to the Khmelevitsy substation

Таблица 1.

Эквивалентные сопротивления систем

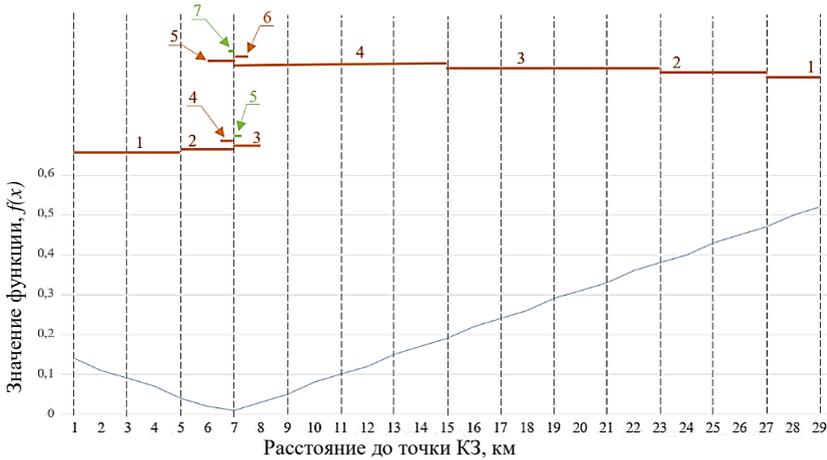
Table 1.

Equivalent resistances of systems

Подстанция	Сопротивление системы прямой последовательности	Сопротивление системы нулевой последовательности
ПС 110 кВ «Шахунья»	$0,647 + j8,326$	$0,242 + j4,979$
ПС 110 кВ «Вахтан»	$1,287 + j12,903$	$1,329 + j13,01$
ПС 110 кВ «Хмелевицы»	$0,711 + j10,363$	$0,462 + j6,531$

На рис. 11 представлены итерационные процессы отыскания минимума амплитуды напряжения для двух вариантов выбора начальных точек: для первого симплекса 1 км и 5 км; для второго – 29 км и 27 км. В первом варианте для реализации ОМП ЛЭП потребовалось 5, а во втором – 7 шагов. Последующий выбор различных вариантов начальных точек показал, что

для выполнения итерационного алгоритма (рис. 4) требуется не более 10 шагов. Таким образом, алгоритм Нелдера-Мида обеспечивает быструю сходимость и высокое быстродействие ОМП воздушных ЛЭП.



**Рис. 11. Реализация алгоритма Нелдера-Мида при полунатурных испытаниях**

**Fig. 11. Implementation of the Nelder-Mead algorithm for semi-natural tests**

Расчеты расстояния до места повреждения воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС «Хмелевицы» предложенного алгоритма ОМП на основе процедуры Нелдера-Мида в сопоставлении с известными методами представлены в табл. 2. Полунатурные эксперименты показали, что применение алгоритма Нелдера-Мида обеспечивает высокую точность расчета расстояния до места повреждения, ошибка ОМП составила 320 м, или 1,1 % от длины линии.

**Таблица 2.**  
**Результаты полунатурных экспериментов**

**Table 2.**  
**Results of semi-natural experiments**

Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{K,расч.}$ , км				Фактическое место повреждения, км
Алгоритм Изюковского	Алгоритм Аржанникова	Алгоритм Нелдера – Мида	Групповой алгоритм	
6,421	6,679	6,600	5,500	6,28

## У. Заключение

Разработка методов ОМП по ПАР на линиях с ответвлениями является актуальной задачей. При этом целесообразно применение процедур ускорения вычислений, в том числе, с использованием алгоритмов математической оптимизации.

Результаты имитационного моделирования и полунатурных экспериментов показали, что алгоритм Нелдера-Мида обеспечивает высокую точность ОМП на линиях с ответвлениями, а также требует до 10 итераций, что является высоким показателем быстродействия.

Алгоритм Нелдера-Мида не предполагает сложных математических операций, поэтому целесообразна ее реализация в виде программного обеспечения для современных терминалов релейной защиты и специализированных устройств ОМП ЛЭП.

© Куликов А.Л., 2024

© Лоскутов А.А., 2024

© Илларионов Р.И., 2024

*Поступила в редакцию 16.07.2024*

*Принята к публикации 19.08.2024*

*Received 16.07.2024*

*Accepted 19.08.2024*

## Библиографический список

- [1] Папков Б.В., Куликов А.Л., Илюшин П.В. Задачи надежности современного электроснабжения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с.
- [2] Висящев А.Н., Акишин Л.А., Тигунцев С.Г., Висящев А.А., Муссонов Г.П., Пленков Э.Р. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи 10-110 кВ в нормальных и аварийных режимах. Иркутск: ИрГТУ, 2012. – 270 с.
- [3] Аржанников Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 271 с.
- [4] Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью. М.: Высшая школа, 1988. – 94 с.
- [5] Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи. С.-Пб.: ПЭИПК, 2008. – 76 с.
- [6] Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault location on power networks. London: Springer, 2010. – 437 с. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5
- [7] Izykowski J. Fault Location on power transmission lines. Wroclaw: Wroclaw University of Science and Technology, 2008. – 221 с.
- [8] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.А. Применение алгоритмов поиска при определении мест повреждений на воздушных линиях электропередачи по параметрам аварийного режима // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2023. № 5. С. 40-59. DOI: 10.31857/S0002331023050059

- [9] Panahi H., Zamani R., Sanaye-Pasand M., Mehrjerdi H. Advances in transmission network fault location in modern power systems: Review, outlook and future works // IEEE Access. 2021. Vol. 9. С. 158599-158615.
- [10] Simeon O., Faithpraise F.O., Ibanga J. Iterative Newton-Raphson-based impedance method for fault distance detection on transmission line // International Multilingual Journal of Science and Technology. 2021. № 5 (5). P. 2805-2810. DOI: 10.13140/RG.2.2.15945.57442
- [11] Куликов А.Л., Обалин М.Д. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика. 2015. № 2. С. 70-75. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [12] Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. – 534 с.
- [13] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2021. № 2 (82). С. 119-128. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_2\_119
- [14] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Повышение эффективности определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 15-19.

### References

- [1] B.V. Papkov, A.L. Kulikov and P.V. Ilyushin, *Zadachi nadezhnosti sovremennoy elektrosnabzheniya [Reliability problems of modern power supply]*. Vologda: Infra-Engineering, 2022 (in Russian).
- [2] A.N. Visyashchev, L.A. Akishin, S.G. Tiguncev, A.A. Visyashchev, G.P. Mussonov and E.R. Plenkov, *Diagnostika sostoyaniya vozdushnykh linij elektroperedachi 10-110 kV v normal'nykh i avarijnykh rezhimakh [Diagnostics of the state of overhead power transmission lines 10-110 kV in normal and emergency modes]*. Irkutsk: ISTU, 2012 (in Russian).
- [3] E.A. Arzhannikov, *Opreделение mesta korotkogo замыкaniya na vysokovol'tnykh liniyah elektroperedachi [Determination of the location of a short circuit on high-voltage power transmission lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [4] Ya.L. Artishevsky, *Opreделение mest povrezhdeniya linij elektroperedachi v setyah s zazemlennoy nejtral'yu [Determination of fault locations of power transmission lines in networks with grounded neutral]*. Moscow: Higher school, 1988 (in Russian).
- [5] Yu.S. Belyakov, *Aktual'nye voprosy opredeleniya mest povrezhdeniya vozdushnykh linij elektroperedachi [Actual issues of fault location of overhead power transmission lines]*. St. Petersburg: PEIPK, 2008 (in Russian).
- [6] M.M. Saha, J. Izykowski and E. Rosolowski, *Fault location on power networks*. London: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5
- [7] J. Izykowski, *Fault Location on power transmission lines*. Wroclaw: Wroclaw University of Science and Technology, 2008.
- [8] A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin and A.A. Loskutov, “Application of search algorithms in determining of fault location on overhead power lines according to the emergency

- mode parameters”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 5, pp. 40-59, 2023. DOI: 10.31857/S0002331023050059
- [9] H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, “Advances in transmission network fault location in modern power systems: Review, outlook and future work”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158599-158615, 2021, Nov. 2021. DOI: 10.1109/access.2021.3129838
- [10] O. Simeon, F.O. Faithpraise and J. Ibanga, “Iterative Newton-Raphson-based impedance method for fault distance detection on transmission line”, *International Multilingual Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 2805-2810, 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.15945.57442
- [11] A.L. Kulikov and M.D. Obalin, “Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines”, *Russian Electromechanics*, no. 2, pp. 70-75, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [12] D. Himmelblau, *Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye [Applied nonlinear programming]*. Moscow: Mir, 1975 (in Russian).
- [13] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, “Application of the pattern recognition theory in determining the location of a short circuit in AC traction networks”, *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, vol. 2, no. 82, pp. 119-128, 2021.
- [14] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, “Povysheniye effektivnosti opredeleniya mesta korotkogo замыкания v tyagovyh setyah peremennogo toka na osnove informacionnyh tekhnologij [Improving the efficiency of determining the location of a short circuit in AC traction networks based on information technology]”, *Bulletin of Transport of the Volga Region*, vol. 6, no. 54, pp. 15-19, 2015 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Alexander L. Kulikov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Лоскутов Антон Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Anton A. Loskutov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Илларионов Роман Игоревич**, магистр Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Roman I. Illarionov**, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.311.236

EDN LWENQA

## **АВТОНОМНАЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВЕНТИЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**О.С. Хватов**

ORCID: 0009-0007-0345-7523 e-mail: khvatov\_oleg@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия***И.А. Тарпанов**

ORCID: 0009-0007-8411-8709 e-mail: fillin2003@mail.ru

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*

Перспективным направлением современной энергетики является разработка дизельных электростанций, обладающих повышенными энергетическими показателями, которые обеспечиваются за счет регулирования частоты вращения приводного дизельного двигателя на режимах долевой нагрузки. В результате суммарный расход топлива электростанцией существенно снижается, поскольку удельные показатели расхода топлива поддерживаются практически близкими к номинальным значениям. Известные преимущества асинхронной машины ранее не смогли обеспечить ей широкое применение в составе генераторных комплексов. Данное обстоятельство связано как с необходимостью наличия источника реактивной мощности для возбуждения асинхронной машины, так и с требованием по плавному регулированию реактивной мощности. С внедрением силовых транзисторных преобразовательных устройств, в частности, активных выпрямителей напряжения, возможности по использованию асинхронных машин в составе генераторных комплексов существенно расширились. В статье представлена концепция системы автоматического регулирования напряжения дизель-генераторной установки, работающей с переменной скоростью вращения. Система регулирования напряжения построена на базе преобразователя частоты, используемого в качестве регулируемого источника реактивной мощности. Преобразователь частоты содержит выпрямительный блок, построенный на полностью управляемых полупроводниковых ключах. Возбуждение генератора обеспечивается емкостью в звене постоянного тока полупроводникового

преобразователя. Функция регулирования реактивной мощности, подаваемой в обмотку статора асинхронной машины, выполняется активным выпрямителем напряжения. Автоматическое регулирование напряжения в статоре реализовано по принципу векторного управления. Система регулирования, на основе сигналов датчиков скорости вращения ротора и величины напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты, формирует сигнал управления активным выпрямителем напряжения, который обеспечивает необходимое для стабилизации напряжения значение реактивной мощности в статоре асинхронной машины. Представлена функциональная схема асинхронной дизель-генераторной электростанции, а также ее имитационная математическая модель.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель напряжения, асинхронная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения, асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, векторное управление.

**Для цитирования:** Хватов О.С., Тарпанов 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. EDN LWENQA

## **STAND ALONE DIESEL GENERATOR POWER PLANT BASED ON ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH VALVE EXCITATION AND AUTOMATIC VOLTAGE CONTROL SYSTEM WITH VECTOR CONTROL**

**O.S. Khvatov**

ORCID: **0009-0007-0345-7523** e-mail: **khvatov\_oleg@mail.ru**  
Volga State University of Water Transport  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**I.A. Tarpanov**

ORCID: **0009-0007-8411-8709** e-mail: **fillin2003@mail.ru**  
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*

**Abstract.** A promising direction of modern electric power engineering is the development of diesel generator sets of variable speed, which change the rotation speed of

the diesel engine in accordance with the optimal performance. As a result, the total fuel consumption of the power plant is significantly reduced, since the specific fuel consumption remains practically close to the nominal values. An asynchronous machine has a number of advantages over a synchronous one, namely, lower weight, dimensions and cost, and higher reliability. Nevertheless, asynchronous generators have not yet been widely used. The main obstacle remained the technical problem of both the excitation of the asynchronous machine, which is impossible without additional sources of reactive power, and the requirement for smooth regulation of reactive power. With the introduction of power transistor converters, in particular, active voltage rectifiers, the possibilities for using asynchronous machines as part of generator complexes have significantly expanded. The paper presents the concept of an automatic voltage regulation system for a diesel generator set operating at a variable rotational speed. The voltage regulation system is based on a frequency converter used as a source of reactive power needed to create an asynchronous generator flow. The frequency converter in the presented system contains a rectifier unit built on fully controlled semiconductor switches. The excitation of the generator is provided by reactive power, created by a controlled rectifier and a capacitance in the DC link of a semiconductor converter. An active voltage rectifier performs the function of regulating the reactive power supplied to the stator winding of an asynchronous machine. Automatic voltage regulation in the stator is implemented using the vector control. The control system, based on the signals of the rotor rotation speed sensors and the voltage in the DC link, generates a signal for the active voltage rectifier, which, in turn, smoothly adjusts the voltage at the generator output by adjusting the reactive power of the machine. The functional and structural diagrams of the mathematical model of the system are presented.

**Keywords:** asynchronous generator, diesel generator set of variable speed, frequency converter, vector control.

**For citation:** O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and T.Z. Bilyaletdinov, “Stand alone diesel 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. EDN LWENQA

## I. Введение

В настоящее время вопросы повышения энергоэффективности технологических процессов производства, в том числе, процессов генерирования электроэнергии, являются основополагающими для дальнейшего развития техники [1]. Рациональное использование энергоресурсов путем применения передовых энергосберегающих технологий является приоритетной задачей развития всех отраслей, в частности, водного транспорта [2]. Один из способов повышения эффективности производства электроэнергии на судах основан на использовании в составе судовой электроэнергетической системы электростанций на основе генераторных агрегатов переменной частоты вращения. Большинство дизельных электростанций, которые принято классифицировать как электростанции классического типа, работают

на постоянной частоте вращения при любом уровне нагрузки в сети. Поддержание постоянства оборотов объясняется тем, что скорость вращения приводного двигателя, определяет частоту генерируемого напряжения. Таким образом, независимо от величины нагрузки в сети, обороты приводного дизельного двигателя поддерживаются неизменными [3].

Авторами предложена система регулирования асинхронной дизельной электростанции переменной частоты вращения (АДГЭПЧВ), обеспечивающая стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии. Автономный инвертор стабилизирует частоту генерируемого напряжения [4].

### II. Принцип работы электростанции

Автономные асинхронные генераторы нуждаются в источнике реактивной мощности, необходимой для создания магнитного потока машины [5]. При этом, если асинхронный генератор работает с переменными нагрузкой и частотой вращения, необходимо применять меры для стабилизации величины генерируемого напряжения [6]. Существуют различные способы решения данной проблемы: например, применение повышающего трансформатора, подключенного к обмотке статора машины и стабилизирующего широтно-импульсного преобразователя в звене постоянного тока преобразователя. Другим способом стабилизации генерируемого напряжения автономного асинхронного генератора является использование вентильного преобразователя, подключенного к статору машины и используемого в качестве источника регулируемой реактивной мощности [7].

Существуют различные подходы к регулированию напряжения в автономных АДГЭПЧВ. Одним из них является использование систем автоматического регулирования с векторным управлением.

Функциональная схема АДГЭПЧВ представлена на рис. 1. В схеме приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; АГ – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; ДС – датчик частоты вращения ротора генератора, необходимый для вычисления оптимальной величины потока ротора и угла поворота вращающейся системы координат, в которой записаны уравнения асинхронного короткозамкнутого генератора; ЗП – задатчик величины потока – выполняет функцию задания или расчета оптимальной величины потока в зависимости от частоты вращения ротора; ВП – вычислитель потока – выполняет функцию косвенного определения величины потока ротора; РП – регулятор потока ротора, выходной сигнал которого является сигналом задания для тока статора по оси  $x$  ( $i_{sx}$ ); ДН – датчик величины напряжения в звене постоянного тока; РН – регулятор напряжения, выходной сигнал которого является сигналом задания для тока статора по оси  $y$  ( $i_{sy}$ ); ПК1, ПК2 – преобразователи координат – осуществляют перевод значений токов статора из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную, вращающуюся систему координат

нат ( $x, y$ ) и наоборот; ШИМ контроллер сравнивает значения задания величины трехфазного тока со значениями с датчиков тока и формирует сигналы управления полупроводниковыми ключами активного выпрямителя; АВ – активный выпрямитель; И – инвертор.

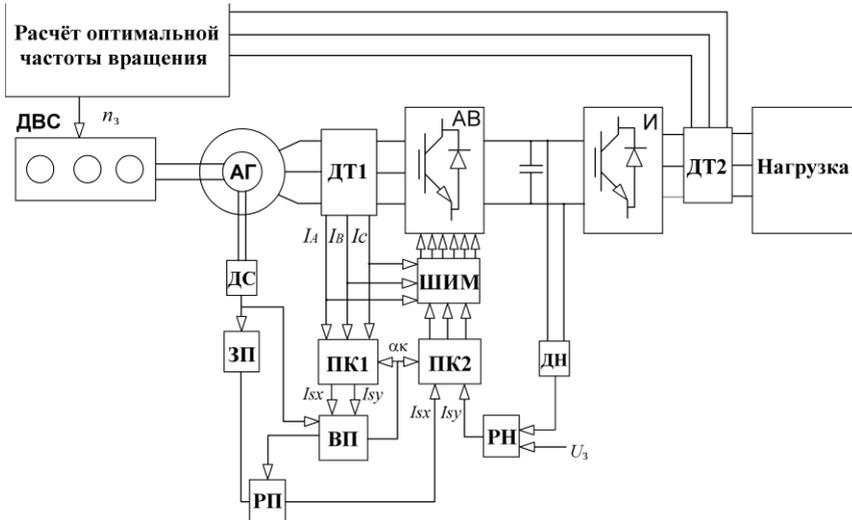


Рис. 1. Функциональная схема АДГЭПЧВ

Fig. 1 Functional diagram of the asynchronous variable speed diesel power plant

Авторами статьи представлена математическая модель АДГЭПЧВ на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором с вентильным возбуждением и векторной системой автоматического регулирования напряжения.

### III. Математическая модель асинхронного генератора

Математическое описание асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, выполненное на основе теории обобщенной двухфазной электрической машины в системе синхронно вращающихся координат ( $x, y$ ), представим для случая, когда в качестве опорного вектора выбрано потокоцепление ротора [8].

Ориентируем ось  $x$  по вектору потокоцепления ротора, что позволяет принять:  $\psi_{RY} = 0$ ;  $\psi_R = \psi_{RX}$ ;  $\omega_K = \omega_1$ .

Уравнения равновесия напряжений статора и ротора в данном случае можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_{SX} &= R_S i_{SX} + \frac{d\psi_{SX}}{dt} - \omega_1 \psi_{SY}; \\
 u_{SY} &= R_S i_{SY} + \frac{d\psi_{SY}}{dt} + \omega_1 \psi_{SX}; \\
 0 &= R_R i_{RX} + \frac{d\psi_{RX}}{dt}; \\
 0 &= R_R i_{RX} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX}; \\
 \psi_{SX} &= L_S i_{SX} + L_m i_{RX}; \\
 \psi_{SY} &= L_S i_{SY} + L_m i_{RY}; \\
 \psi_{RX} &= L_m i_{SX} + L_R i_{RX}; \\
 0 &= L_m i_{SY} + L_R i_{RY}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $u_{SX}$ ,  $u_{SY}$ ,  $i_{SX}$ ,  $i_{SY}$ ,  $\psi_{SX}$ ,  $\psi_{SY}$  – проекции обобщенных векторов напряжения, тока и потокосцепления статора по осям  $x$  и  $y$ ;  $\psi_{RX}$  – проекция обобщенного вектора потокосцепления ротора по оси  $x$ ;  $i_{RX}$ ,  $i_{RY}$  – проекции обобщенных векторов тока ротора по осям  $x$  и  $y$ ;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения поля статора;  $\omega_2$  – угловая скорость вращения ротора;  $L_S$ ,  $L_R$  – индуктивности фазных обмоток статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $R_S$ ,  $R_R$  – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора.

При  $\psi_R = \text{const}$  третье уравнение в системе (1) упрощается, поскольку второе слагаемое справа от знака равенства равно нулю. Следовательно, уравнения ротора примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R_R i_{RX} &= 0; \\
 R_R i_{RY} &= (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX};
 \end{aligned} \tag{2}$$

С учетом первого уравнения системы (2), седьмое уравнение системы (1) определяет потокосцепление ротора в виде:

$$\psi_{RX} = L_m i_{SX}. \tag{3}$$

Потокосцепление ротора определяется проекцией тока статора на ось  $x$ . При этом скорость вращения системы координат может быть рассчитана в соответствии со следующим выражением:

$$\omega_1 = \frac{R_R i_{RY}}{\psi_{RX}} + \omega_2; \tag{4}$$

Преобразуем (4), исключив из него  $i_R$ :

$$\omega_1 = \frac{K_R R_R i_{SY}}{\Psi_{RX}} + \omega_2, \quad (5)$$

где  $K_R = L_m / L_R$  – безразмерный коэффициент.

Для реализации векторного регулирования напряжения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором ориентируем систему координат  $(x, y)$  таким образом, чтобы вектор потокосцепления ротора совпал с осью  $x$ . В этом случае проекция тока статора по оси  $x$  определяет значение потокосцепления ротора согласно (3), а проекция тока статора по оси  $y$  величину напряжения в статоре асинхронного короткозамкнутого генератора.

### Математическая модель нагрузки

Уравнение активно-индуктивной нагрузки имеет вид [9]:

$$U_H = R_H I_H + L_H \frac{dI_H}{dt}, \quad (6)$$

где  $U_H$  – напряжение на нагрузке;  $I_H$  – ток нагрузки;  $R_H, L_H$  – активное сопротивление нагрузки;  $L_H$  – индуктивность нагрузки.

Во вращающейся с угловой скоростью  $\omega_1$  системе координат, при условии, что ось  $x$  совпадает с вектором  $\Psi_R$ , (6) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{HX} &= R_H i_{HX} + \frac{X_H}{\omega_1} \frac{di_{HX}}{dt} - X_H i_{HY}; \\ U_{HY} &= R_H i_{HY} + \frac{X_H}{\omega_1} \frac{di_{HY}}{dt} + X_H i_{HX}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $U_{HX}$  и  $U_{HY}$  – проекции вектора напряжения нагрузки по оси  $x$  и  $y$ ;  $i_{HX}$  и  $i_{HY}$  – проекции вектора тока нагрузки по оси  $x$  и  $y$ ;  $X_H$  – реактивное сопротивление нагрузки;

Преобразуем (7), чтобы получить выражения для составляющих тока нагрузки. Из первого уравнения системы (7) выражаем ток по оси  $x$ :

$$i_{HX} = \frac{U_{HX} + X_H i_{HY}}{R_H + \left(\frac{X_H}{\omega_1}\right) p}. \quad (8)$$

Из второго уравнения системы (7) выражаем ток по оси  $y$ :

$$i_{HY} = \frac{U_{HY} - X_H i_{HX}}{R_H + \left(\frac{X_H}{\omega_1}\right) p}. \quad (9)$$

### Математическое модель двигателя внутреннего сгорания

Инерционность дизельного двигателя как объекта управления обусловлена инерцией вращающихся масс его конструкции. При этом дизельный двигатель как объект управления будет иметь два канала воздействия на скорость:

- канал нагрузочного воздействия;
- канал регуляторного воздействия.

Таким образом, общее уравнение динамики дизельного двигателя без турбонаддува может быть представлено в следующем виде [10]:

$$Tpy_0 = x_0 - \mu, \quad (10)$$

где  $T$  – время разгона,  $y_0$  – относительная величина частоты вращения дизельного двигателя,  $x_0$  – относительная величина перемещения топливodoзирующего органа;  $\mu$  – относительная величина нагрузки на дизельный двигатель.

На основе уравнений асинхронной машины, дизельного двигателя и блока активно-индуктивной нагрузки разработана структурная схема математической модели автономного асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и векторным регулированием напряжения (рис. 2).

#### Система регулирования АДГЭПЧВ

Вычислитель оптимальных (энергоэффективных) оборотов вала ДВС на основании значений активных фазных токов в нагрузке формирует задающий сигнал для регулятора скорости ДВС [11]. Скорость ДВС меняется в заданном диапазоне в зависимости от величины нагрузки. Система управления генератором состоит из двух каналов: по потокосцеплению ротора, а также по величине напряжения в звене постоянного тока. Выходной сигнал регулятора потокосцепления ротора является задающим для регулирования составляющей тока  $i_{sx}$ . Регулирование составляющей тока  $i_{sx}$  позволяет обеспечивать векторное управление напряжением генератора при постоянном потокосцеплении ротора. На выходе регулятора напряжения формируется задающий сигнал регулирования составляющей статора  $i_{sy}$ .

В структурной схеме (рис. 2) также представлен преобразователь частоты в виде инерционных звеньев в каналах по осям  $x$  и  $y$ . Стабилизация частоты выходного напряжения обеспечивается инвертором напряжения в составе преобразователя.

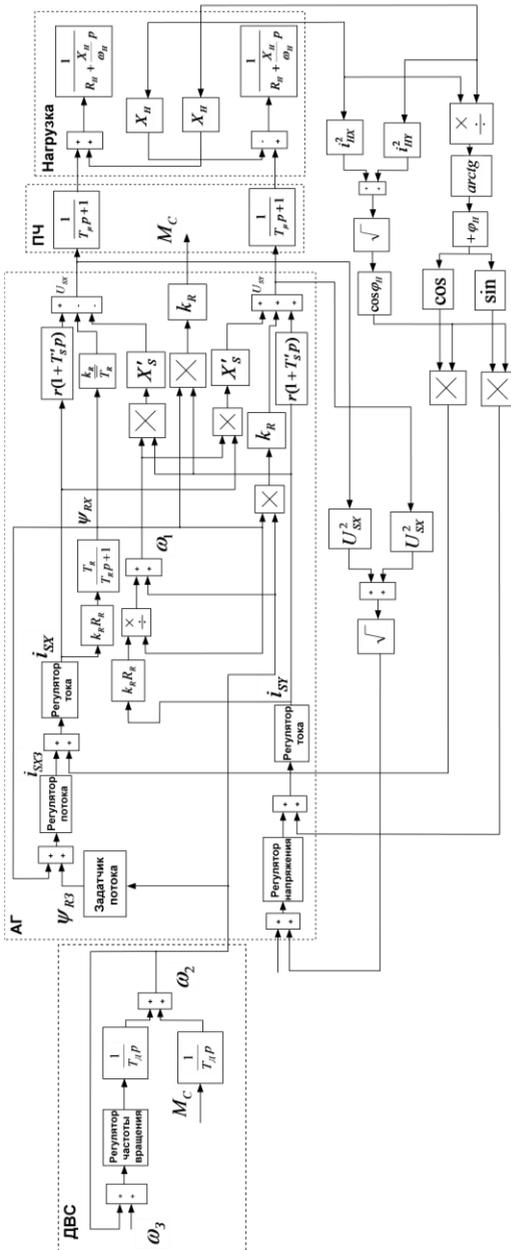
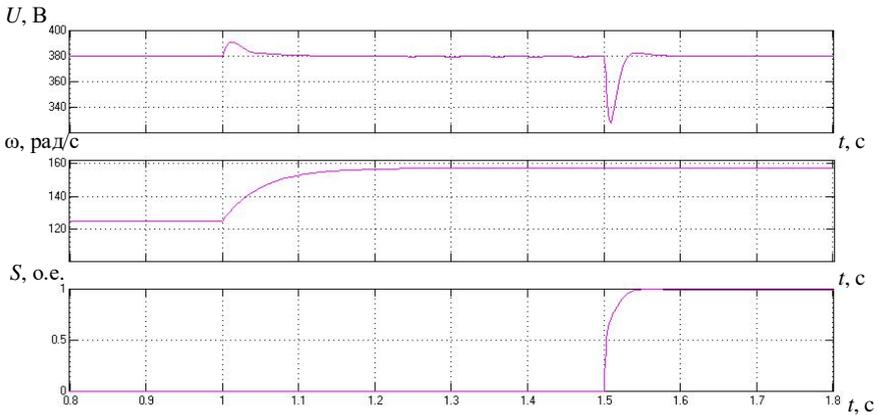


Рис. 2. Структурная схема АДГЭПВЧ  
 Fig. 2. Block diagram of the asynchronous variable speed diesel power plant

На рис. 2 представлена структурная схема АДГЭПЧВ, построенная в соответствии с вышеприведенными математическими моделями составляющих электростанции и алгоритмом работы системы регулирования. По данной структурной схеме создана имитационная модель динамических режимов работы АДГЭПЧВ в пакете программ *Matlab*.

Результаты моделирования изменения амплитуды напряжения  $U_1(t)$  при изменении частоты вращения вала установки на 20 % ( $t = 1$  с), а также при подключении нагрузки равной номинальной ( $t = 1,5$  с) приведены на рис. 3. Параметры асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором:  $S = 200$  кВА,  $\eta = 0,94$ ,  $U = 380$  В,  $I_{1H} = 284$  А,  $n_n = 1500$  об/мин.



**Рис. 3. Временные зависимости изменения амплитуды напряжения  $U_1(t)$  при изменении скорости вращения и подключении нагрузки**

**Fig. 3. Time dependences of the change in the voltage amplitude  $U_1(t)$  during changing rotation speed and connecting load**

#### IV. Заключение

Результаты моделирования (рис. 3) подтверждают обеспечение АДГЭПЧВ требуемых показателей качества регулирования как в установившемся режиме (статическая ошибка), так и в динамике (время переходного процесса). Например, подключение 100 % активной нагрузки сопровождается провалами амплитуды напряжения  $\Delta U_1$  в среднем не более 15 % от номинального значения.

© Хватов О.С., 2024

© Гарпанов И.А., 2024

© Билялетдинов Т.З., 2024

Поступила в редакцию 09.06.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Received 09.06.2024

Accepted 16.07.2024

**Библиографический список**

- [1] Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р., Малышев С.М. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота Имени Адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12. № 4. С. 801-811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4- 801-811
- [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, Октябрь 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). С. 377-386. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] Radha Krishna Reddy S., Subrahmanyam J.B.V., Srinivasula Reddy A. Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller // Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT). 2023. № 9 (3). С. 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 // 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] Дарьенков А.Б. Повышение эффективности автономных генераторных установок на основе ДВС переменной частоты вращения: автореф. дисс. доктора техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2020. – 343 с.

## References

- [1] A.V. Grigoriev, R.R. Zainullin and S.M. Malyshev, “Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 12, no. 4, pp. 801-811, 2020. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4- 801-811
- [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 International (XXII All-Russian) conference “Avtomatizirovannyi elektroprivod 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. Radha Krishna Reddy, J.B.V. Subrahmanyam and A. Srinivasula 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, 2021, Hammamet, Tunisia. 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 generatorye 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] A.B. Dar'enkov, "Povyshenie effektivnosti avtonomnyh generatornyh ustanovok na osnove DVS peremennoj chastoty vrashcheniya [Improving the efficiency of autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines]", D. of Tech. S. thesis, NNSTU, N. Novgorod, Russia, 2020 (in Russian).

### 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.

**Тарпанов Илья Александрович**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Иуа А. Tarpanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

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

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

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ СУДОВЫХ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**С.В. Попов**

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

**О.А. Бурмакин**

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa\_71@mail.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

**Ю.С. Малышев**

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

Статья посвящена решению задач, возникающих при модернизации судовых электроприводов якорно-швартовых механизмов (ЯШМ), рассмотрена возможность замены сложного дорогостоящего электродвигателя на электродвигатель более простой конструкции. Проведен сравнительный анализ систем регулирования многообмоточными электродвигателями и системы преобразователь частоты-асинхронный двигатель. Представлены результаты анализа работы электропривода судовой лебедки, выполненного на базе многоскоростного электродвигателя. Рассмотрена возможность его работы на одной обмотке в различных режимах от частотного преобразователя. Предложен вариант замены многообмоточного электродвигателя на электродвигатель морского исполнения с одной обмоткой и проведен сравнительный анализ при их работе в составе электропривода лебедки. Рассмотрено применение однозонного и двухзонного регулирования скорости электродвигателя с целью получения необходимых характеристик электропривода, а именно, моментов и скоростей вращения при работе лебедки в различных режимах. Проанализирована возможность осуществления режима стоянки электродвигателя под током в системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель в соответствии с требованиями Российского классификационного общества, а также приведено математическое обоснование. Даны рекомендации по выбору частотного электропривода с точки зрения тепловых режимов при двухзонном регулировании скорости и в режиме заторможенного ротора. Показаны результаты сравнительного анализа массогабаритных и стоимостных показателей электродвигателей различных исполнений, которые могут быть использованы для выбора оптимальных параметров электропривода в

зависимости от мощности электродвигателя. Выявлена зависимость целесообразности применения электродвигателей стандартного общепромышленного назначения при изменении диапазона регулирования скорости и момента нагрузки на валу. Обосновано применение системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в электроприводах якорно-швартовых лебедок. Проведена предварительная оценка работы частотного электропривода лебедки на предмет срока его эксплуатации. Сделаны выводы о практической ценности результатов исследования, которые могут быть использованы как при модернизации, так и при проектировании электроприводов лебедочных механизмов.

**Ключевые слова:** многоскоростной электропривод, частотное управление, двухзонное регулирование, многообмоточный электродвигатель, система регулирования, регулируемый электропривод, стоянка под током, якорно-швартовая лебедка, электродвигатель судового исполнения, электродвигатель общепромышленного назначения.

**Для цитирования:** Попов С. В., Бурмакин О. А., Малышев Ю. С., Обоснование применения частотных электроприводов для судовых якорно-швартовых механизмов // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 32-49. EDN: YKBJUG

## JUSTIFICATION OF THE USE OF FREQUENCY ELECTRIC DRIVES FOR SHIP ANCHOR AND MOORING MECHANISMS

**S.V. Popov**

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**O.A. Burmakin**

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa\_71@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Y.S. Malyshev**

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to solving problems that arise during the modernization of ship electric drives of anchor-mooring mechanisms; the possibility of replacing a complex, expensive electric motor with an electric motor of a simpler design is considered. A comparative analysis of control systems for multi-winding electric motors and the systems of frequency converter-induction motor was carried out. The article presents the

results of an analysis of the operation of the electric drive of a ship's winch, made on the basis of a multi-speed electric motor. The possibility of its operation on one winding in various modes from a frequency converter is considered. An option has been proposed to replace a multi-winding electric motor with a marine-style electric motor with one winding and a comparative analysis has been carried out when they operate as part of an electric winch drive. The use of single-zone and two-zone electric motor speed control is considered in order to obtain the necessary characteristics of the electric drive, namely, torques and rotation speeds when the winch operates in various modes. The possibility of implementing the electric motor parking mode under current in the frequency converter - asynchronous motor system in accordance with the requirements of the Russian Classification Society is analyzed, and a mathematical justification is given. Recommendations are given when choosing a frequency electric drive from the point of view of thermal conditions with two-zone speed control and in locked rotor mode. The results of a comparative analysis of the weight, size and cost indicators of electric motors of various designs are shown, which can be used to select the optimal parameters of the electric drive depending on the power of the electric motor. The dependence of the feasibility of using electric motors of standard general industrial use when changing the speed control range and the load torque on the shaft is revealed. The use of a frequency converter-asynchronous motor system in electric drives of anchor-mooring winches is justified. A preliminary assessment of the operation of the winch's frequency electric drive was carried out regarding its service life. Conclusions are made about the practical value of the research results, which can be used both in the modernization and in the design of electric drives for winch mechanisms.

**Keywords:** multi-speed electric drive, frequency control, two-zone regulation, multi-winding electric motor, control system, adjustable electric drive, electric parking, anchor-mooring winch, marine electric motor, general industrial electric motor.

**For citation:** S.V. Popov, O.A. Burmakin and Y.S. Malyshev, "Justification of the use of frequency electric drives for ship anchor and mooring mechanisms", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 32-49, 2024. EDN: YKBJUG

## I. Введение

Суда речного и морского флота, как правило, оснащены палубными механизмами для выполнения операций постановки судна на рейд, швартовки и т.д. Такие механизмы в большинстве случаев имеют электропривод с местным управлением, реже — с дистанционным. Основу электроприводов швартовных и якорных лебедок составляют многоскоростные электродвигатели серии МАП – многополюсные асинхронные с короткозамкнутым ротором. Они относятся к специальным, поскольку предназначены для более тяжелых режимов работы по сравнению с электродвигателями общепромышленного исполнения. Так, например, они могут использоваться на морских судах неограниченного района плавания с большой частотой включений при тяжелых условиях пуска и торможения, воздействию волн и

ветра, а также длительной стоянке под током [1-5]. В зависимости от назначения, могут применяться одно-, двух- и трехскоростные электродвигатели, обмотки статора которых собираются в различные схемы для получения необходимых механических характеристик. Как правило, такие электродвигатели оснащаются электромагнитным дисковым тормозом.

На рис. 1 показаны механические характеристики многоскоростного электродвигателя, обмотки которого собираются в три различные схемы, формирующие разное количество пар полюсов на статоре. Следовательно, электропривод имеет три скорости вращения электродвигателя и соответствующие номинальные моменты. Характеристика 2 на рис. 1 считается «тяговой», поскольку имеет самое большое значение момента ( $M_{ном2}$ ).

Электродвигатель с короткозамкнутым ротором обладает высокой надежностью, однако система управления, построенная на базе командоконтроллера с многочисленными силовыми контактами, резко снижает надежность электропривода в целом. Сложность изготовления статорной обмотки приводит к завышенной стоимости электродвигателя (в 3-5 раз относительно общепромышленных). Это же относится и к ремонтным работам, связанным с перемоткой обмоток электродвигателя.

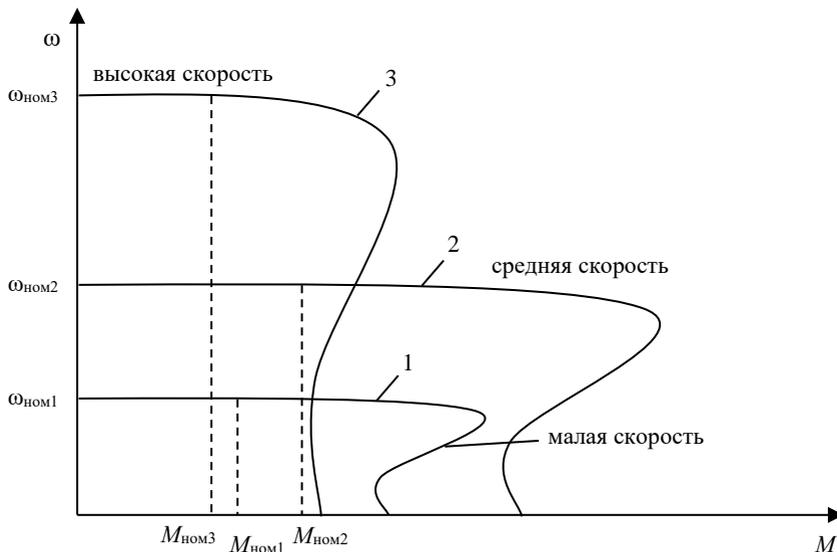


Рис. 1. Механические характеристики многоскоростного электродвигателя

Fig. 1. Mechanical characteristics of multi-speed electric motor

Основное обслуживание таких электроприводов сводится к замене силовых контактов или восстановлению их контактной поверхности. Главным недостатком описанного электропривода является прямой пуск электродвигателя и ступенчатый переход от одной скорости на другую, что приводит к броскам тока, а, следовательно, оказывает отрицательное влияние на судовую сеть.

## II. Методы и материалы

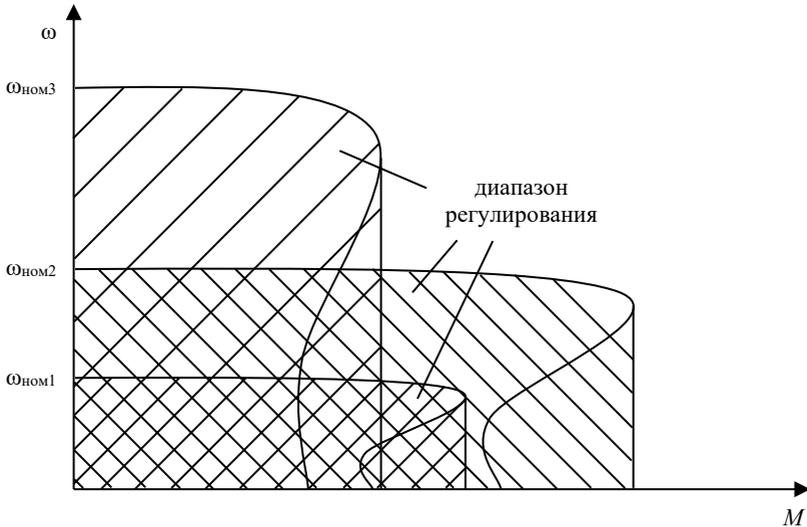
В последнее время среди электроприводов переменного трехфазного тока распространение получил электропривод на базе асинхронного двигателя с частотным преобразователем (ПЧ-АД) [6-10]. Применительно к палубным грузоподъемным механизмам электропривод по системе ПЧ-АД позволит решить несколько задач:

- реализовать плавный разгон и торможение механизма;
- снизить влияние на судовую сеть;
- сократить число коммутационных аппаратов;
- упростить систему управления и обеспечить более простое дистанционное управление;
- внедрить дополнительные функции по защите, контролю и диагностики системы.

Поскольку электродвигатель составляет значительную часть цены палубного механизма, целесообразна модернизация системы управления классического электропривода в сторону частотного с сохранением существующего электродвигателя. Исходя из этого, необходимо выбрать одну обмотку многоскоростного электродвигателя, которая будет рабочей и подключена к ПЧ.

На рис. 2 показаны механические характеристики трех обмоток электродвигателя серии МАП (рис. 1) и зоны регулирования при их отдельной работе от ПЧ. Очевидно, что работа электродвигателя на обмотках статора с характеристиками 1 и 3 не обеспечивает необходимый тяговый момент, который обеспечит обмотка с характеристикой 2. Однако номинальная скорость  $\omega_{ном2}$  характеристики 2 в два раза ниже номинальной скорости  $\omega_{ном3}$  характеристики 3.

Применение частотного электропривода позволяет регулировать частоту напряжения на статоре выше 50 Гц, что может привести к раскручиванию ротора электродвигателя выше синхронной скорости. Недостаток такого способа заключается в снижении момента электродвигателя с ростом частоты напряжения. В этом случае граничная характеристика двухзонного регулирования скорости частотного электропривода будет иметь вид, показанный на рис. 3. Максимальная скорость  $\omega_{макс}$ , которая может быть получена для многоскоростного электродвигателя, ограничена допустимой рабочей скоростью подшипников и жесткостью конструкции ротора [7, 11].



**Рис. 2. Механические характеристики и диапазон при частотном регулировании для разных обмоток многоскоростного электродвигателя**

**Fig. 2. Mechanical characteristics and frequency control range for different windings of a multi-speed electric motor**

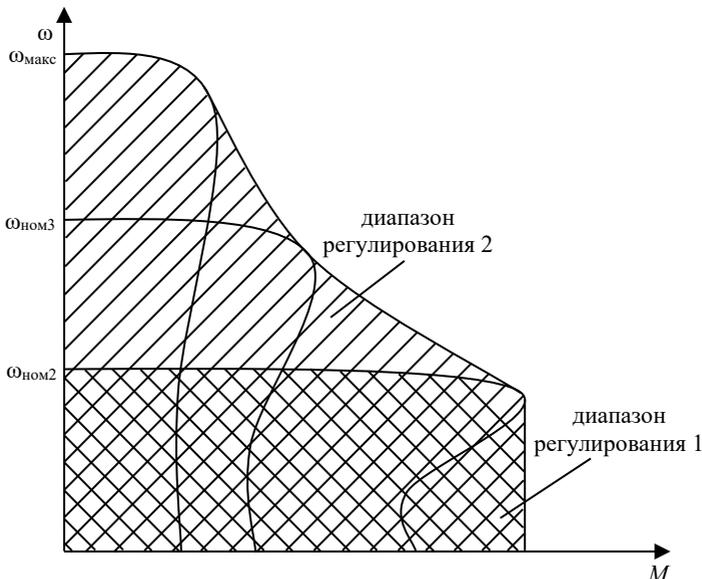
Основным недостатком такого варианта электропривода является завышенные массогабаритные показатели электродвигателя серии МАП. Более перспективным вариантом будет электропривод, построенный на базе односкоростного электродвигателя в морском исполнении (ОЭД) и частотного преобразователя. При работе электропривода в диапазоне от 0 до 50 Гц для получения номинальной скорости  $\omega_{ном3}$  механической характеристики 3 необходимо повысить мощность электродвигателя. Это следует из:

$$P_{\text{ОЭД}} = M_{\text{ном2}} \cdot \omega_{\text{ном3}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ОЭД}}$  – мощность односкоростного электродвигателя морского исполнения,  $M_{\text{ном2}}$  – номинальный момент двигателя при работе на обмотке средней скорости электродвигателя серии МАП,  $\omega_{\text{ном3}}$  – номинальная скорость вращения электродвигателя при работе на обмотке высокой скорости электродвигателя серии МАП.

Поскольку максимальная мощность многоскоростного электродвигателя  $P_{\text{мап2}}$  определяется при работе на обмотке средней скорости  $\omega_{\text{ном2}}$ :

$$P_{\text{мап2}} = M_{\text{ном2}} \cdot \omega_{\text{ном2}}, \quad (2)$$



**Рис. 3. Механические характеристики и диапазоны при двухзонном частотном регулировании для одной обмотки (средней скорости) электродвигателя**

**Fig. 3. Mechanical characteristics and ranges for two-zone frequency regulation for one winding (average speed) of an electric motor**

тогда кратность увеличения мощности односкоростного электродвигателя будет определяться из соотношения:

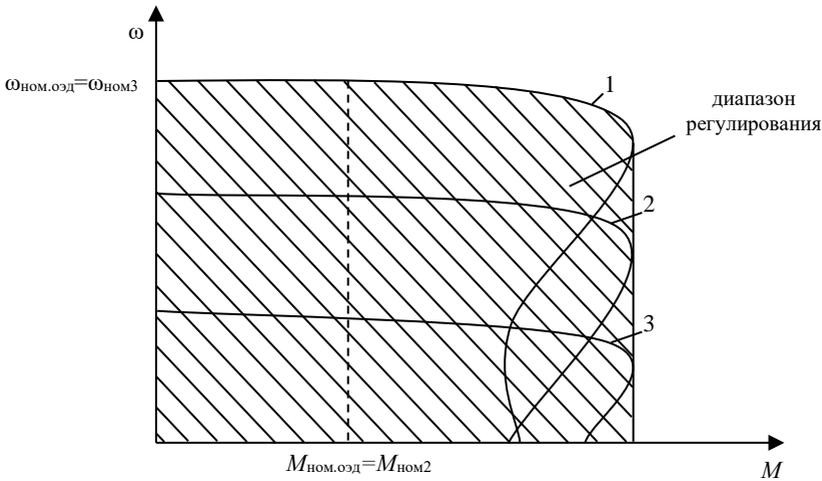
$$P_{\text{оэд}} / P_{\text{мап2}} = \omega_{\text{ном3}} / \omega_{\text{ном2}} \quad (\text{при } M_{\text{ном.оэд}} = M_{\text{ном2}}), \quad (3)$$

где  $M_{\text{ном.оэд}}$  – номинальный момент односкоростного электродвигателя.

Естественная механическая характеристика 1 и диапазон регулирования электродвигателя повышенной мощности показаны на рис. 4. Искусственные характеристики 2 и 3 получены при регулировании по закону частотного управления  $U/f = \text{const}$ .

Сократить стоимость и снизить массогабаритные показатели позволяет применение электродвигателя, предназначенного для работы от ПЧ (АДЧР). Электродвигатели типа АДЧР увеличивают скорость вращения за счет повышения частоты питающего напряжения при постоянстве напряжения равного номинальному. Они выполняются с усиленной изоляцией обмоток и имеют лучшие энергетические характеристики по сравнению с об-

щепромышленными [7, 11]. На рис. 5 показаны механические характеристики электродвигателя, где максимальный момент обеспечивается в первой зоне регулирования на естественной характеристике (50 Гц), а повышенная скорость (до 100 Гц) при снижении критического момента. Следует отметить, что в таком случае достигается скорость вращения вдвое выше номинальной. По данным производителей электродвигателей [7, 11], для электрических машин с установленными стандартными подшипниками скорость вращения может достигать 3000 об/мин. Кроме того, двухзонное регулирование позволит использовать электродвигатель меньшей мощности по сравнению с однозонным, поскольку работа электроприводов ЯШМ на повышенных скоростях осуществляется с моментами ниже номинального.

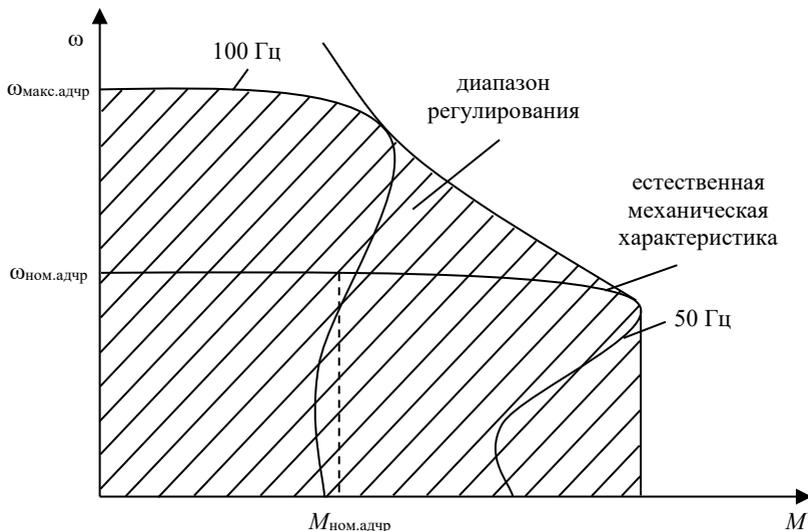


**Рис. 4. Механические характеристики односкоростного электродвигателя морского исполнения повышенной мощности**

**Fig. 4. Mechanical characteristics of a high-power marine single-speed electric motor**

Отличительной особенностью работы якорно-швартовных механизмов является режим стоянки под током. При заторможенном роторе, номинальных частоте сети и напряжении по обмоткам статора будет протекать пусковой ток (в 6-8 раз выше номинального значения), а на валу создаваться пусковой момент (в 2,2-2,4 раза выше номинального значения). В соответствии с правилами Российского Классификационного Общества электроприводы якорно-швартовных устройств должны обеспечивать режим стоянки с пусковым моментом в течение не менее 30 сек. Если многоскорост-

ные электродвигатели серии МАП изготавливаются с учетом таких тепловых режимов, то электродвигатели стандартного исполнения не могут обеспечить такой режим работы в течение продолжительного времени. Следовательно, в случае необходимости обеспечения режима стоянки под током необходимо завязать мощность электродвигателя.



**Рис. 5. Механические характеристики электродвигателя типа АДЧР при двухзонном регулировании**

**Fig. 5. Mechanical characteristics of an ADFR type electric motor with two-zone regulation**

Для определения оптимальной мощности электродвигателя стандартного исполнения необходимо выполнить тепловой расчет, который обеспечит работу в режиме стоянки под током.

### III. Результаты

Стандартные электродвигатели способны работать в режиме перегрузки определенное время в зависимости от кратности тока перегрузки  $I_{пер}$ . Примерный вид такой времятоковой характеристики, составленной по данным заводов изготовителей электродвигателей, представлен на рис. 6 [1, 2, 12].

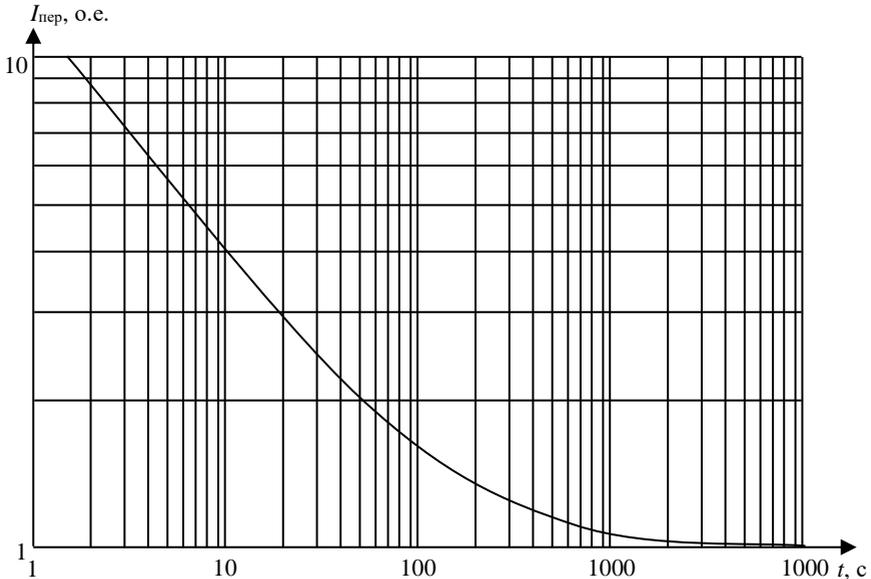
Исходя из характеристики при прямом пуске ( $I_{пер} = 7 I_{ном}$ ), допустимое время работы в режиме стоянки под током электродвигателя стандартного исполнения составляет 2 с. Отсюда следует, что мощность такого элек-

тродвигателя должна быть существенно завышена, а коэффициент завышения мощности электродвигателя  $K$ , при условии работы электродвигателя в режиме стоянки под током 30 с, может быть определен из соотношения:

$$7 I_{\text{НОМ}} = 2,5 (I_{\text{НОМ}} K),$$

тогда

$$K = 7 I_{\text{НОМ}} / 2,5 I_{\text{НОМ}} = 2,8.$$



**Рис. 6. Допустимая времятоковая характеристика для электродвигателей стандартного исполнения**

**Fig. 6. Permissible time-current characteristic for standard electric motors**

Если рассмотреть работу электродвигателя в режиме стоянки под током при частотном регулировании, то соотношение моментов и мощностей электродвигателей типа АДЧР будет иным. Во-первых, при пуске заторможенного электродвигателя от частотного преобразователя в режиме векторного управления возможно ограничение момента, в данном случае на уровне пускового (относительно электродвигателя серии МАП). При этом на статоре будет сформировано пониженное напряжение низкой частоты, а ток, при условии постоянства магнитного потока, будет иметь значение выше номинального.

Из теории частотно-токового управления следует, что электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  асинхронного двигателя [13-15]:

$$M_{эм} = \frac{m}{2} p \frac{L_m}{L_r} \text{Im}(I_s \Psi_r), \quad (4)$$

где  $m$  – число фаз,  $p$  – число пар полюсов,  $L_m$  – взаимная индуктивность обмотки статора и ротора (индуктивность намагничивающего контура),  $L_r$  – собственная индуктивность обмотки ротора,  $I_s$  – вектор тока статора,  $\Psi_r$  – вектор потокоцепления ротора,  $\text{Im}$  – операция взятия мнимой части комплексного числа.

При условии постоянства потокоцепления  $\Psi_r = \text{const}$  принимаем  $\Psi_{rx} = \Psi_r$  и  $\Psi_{ry} = 0$ .

Ток статора  $I_s$  определяется из двух составляющих:

$$I_s = \sqrt{I_{sx}^2 + I_{sy}^2}, \quad (5)$$

где  $I_{sx}$  – составляющая тока статора по оси  $x$  (реактивная),  $I_{sy}$  – составляющая тока статора по оси  $y$  (активная).

Из соотношений асинхронного двигателя

$$\begin{cases} \Psi_{rx} = L_m I_{sx} \\ M_{эм} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} I_{sy} \Psi_r \end{cases}, \quad (6)$$

следует, что при  $\Psi_r = \text{const}$  необходимо чтобы  $I_{sx} = \text{const}$ .

Отсюда  $M_{эм}$  будет зависеть от активной составляющей тока статора  $I_{sy}$ . Допустим, что для электродвигателя при номинальной нагрузке  $\cos\varphi=0,8$ , тогда значения составляющих тока будут распределены в относительных единицах как  $I_{sx} = 0,6$  и  $I_{sy} = 0,8$ .

Если кратность пускового момента электродвигателя серии МАП составляет  $\lambda=2,2$ , то ток статора электродвигателя, работающего от ПЧ с векторным управлением, при условии создания момента, схожего с пусковым моментом электродвигателя серии МАП, будет определяться из (5):

$$I_s = I_{ном} \sqrt{0,6^2 + (2,2 \cdot 0,8)^2} = 1,86 \cdot I_{ном}. \quad (1)$$

Из характеристики рис. 6 можно определить, что при перегрузке по току равной  $2 I_{ном}$  максимальное время работы будет составлять около 60 с, значит, требование по минимальному времени работы электропривода, в режиме стоянки под током, будет выполняться.

Во-вторых, тепловой расчет для электродвигателя производится по номинальному току с номинальной частотой вращения, что обеспечивает необходимый расход воздуха для обдува штатным вентилятором. Требуемый расход воздуха  $Q_{Тв}$  определяется из суммарной мощности потерь в электродвигателе:

$$Q_{Тв} = \frac{k \cdot \sum P}{1100 \cdot \Delta Q_{в}} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от высоты оси вращения электродвигателя, мм;  $\sum P$  – суммарная мощность потерь, Вт;  $\Delta Q_{в}$  – превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды, °С.

Поскольку в режиме стоянки под током, когда ротор заторможен, штатный вентилятор работать не будет, необходимо обеспечить внешний обдув за счет установки дополнительного вентилятора, имеющего независимое электропитание. Параметры вентилятора определяются из условия, что обеспечиваемый наружным вентилятором расход воздуха будет больше требуемого  $Q_{в} > Q_{Тв}$ .

Безусловно, требуемый расход воздуха  $Q_{Тв}$  будет зависеть от температуры окружающего воздуха и режима работы электропривода – число включений. Следует отметить, что действительный расход воздуха штатного вентилятора определяется из:

$$Q_{в} = \frac{0,6 \cdot D_a^3 \cdot n_1}{100} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (8)$$

где  $D_a$  – наружный диаметр электродвигателя (стандарт), мм;  $n_1$  – синхронная скорость вращения магнитного поля статора, об/мин.

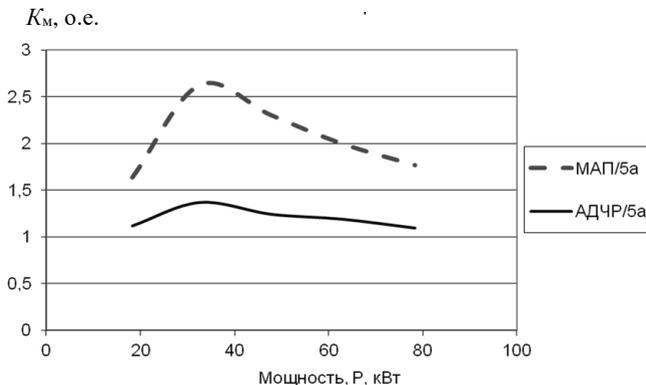
Отсюда следует, что при работе частотного электропривода на пониженных скоростях, когда частота напряжения на обмотке статора будет меньше 50 Гц, расход воздуха будет снижаться и при некотором значении скорости вращения его будет недостаточно для охлаждения [12, 15].

Однако обмотки электродвигателя могут быть изготовлены с различным классом нагревостойкости изоляции, а значит при использовании обмоток класса  $F$ , значение допустимой рабочей температуры может быть повышено, обеспечивая необходимый запас.

#### IV. Обсуждение

Сравнительный анализ зависимостей массогабаритных и стоимостных показателей [2, 16] от мощности электропривода позволил получить следующие результаты.

1. Более быстрый рост массогабаритных показателей стандартного электродвигателя по сравнению с многоскоростным (рис. 7), существенное влияние на который оказывает разница скоростей вращения тяговой характеристики и характеристики с высокой скоростью. Кроме того, при определенном соотношении скоростей массогабаритные показатели стандартного электродвигателя становятся больше, чем у многоскоростного.

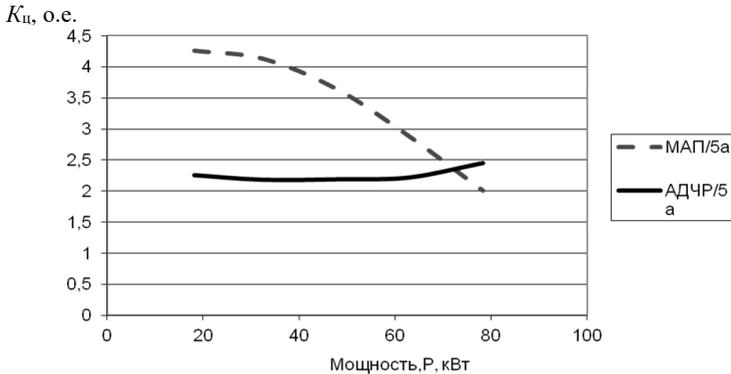


**Рис. 7. Зависимость изменения соотношений массогабаритных показателей в зависимости от мощности электродвигателей стандартного промышленного исполнения, типа АДЧР и многоскоростного серии МАП**

**Fig. 7. Dependence of changes in the ratios of weight and size indicators depending on the power of electric motors of standard industrial design, ADFR type and multi-speed MAP series**

Согласно рис. 7, при мощности электропривода до 35 кВт наблюдается рост относительной разности массогабаритных показателей, а затем ее снижение, связанное с увеличением массы дополнительного навесного оборудования (электромагнитный тормоз, внешний вентилятор) относительно массы электродвигателя. Разница масс двигателей электроприводов – АДЧР и электродвигателей общепромышленного назначения менее существенна, так как связана преимущественно с исполнением изоляции.

2. Оценка ценовых показателей (рис. 8) выявила рост относительной стоимости дополнительного навесного электрооборудования, устанавливаемого на стандартные электродвигатели морского исполнения, что ведет к снижению относительной стоимости электроприводов с многоскоростными двигателями серии МАП и к ее увеличению для электроприводов с АДЧР.



**Рис. 8. Зависимость изменения соотношений стоимостных показателей в зависимости от мощности электродвигателей стандартного промышленного, типа АДЧР и многоскоростного серии МАП**

**Fig. 8. Dependence of changes in the ratios of cost indicators depending on the power of electric motors of standard industrial design, ADFR type and multi-speed MAP series**

Из зависимостей, показанных на рис. 8, следует, что замена многоскоростного электродвигателя на стандартный с некоторого момента является нецелесообразной.

## V. Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности замены многоскоростного электродвигателя, применяемого для якорно-швартовных механизмов, на стандартный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, работающий в системе ПЧ-АД. Обоснованы принципы выбора электродвигателя и использование двухзонного регулирования, которое можно обеспечить с помощью преобразователя частоты. Показано, что ограничение скорости электропривода в зоне постоянства мощности определяется допустимой скоростью подшипников. Даны пояснения, что при использовании частотного электропривода обязательным условием для обеспечения режима работы на малых скоростях и, в большей степени, режима стоянки под током является использование вентилятора с независимым питанием от обмотки статора электродвигателя. Сделаны расчеты тока статора при заторможенном роторе электродвигателя, которые доказывают, что при частотном регулировании ток статора не будет превышать двух номинальных значений. Из практических времятоковых характеристик стандартных электродвигателей следует, что в режиме стоянки под током машина не будет перегреваться в течение требуемого времени работы.

Сравнительный анализ массогабаритных показателей многоскоростных, специальных морского исполнения и стандартных электродвигателей показал, что, с точки зрения снижения массогабаритных показателей, целесообразно использовать электродвигатели серии АДЧР и стандартного исполнения (необходимо индивидуальное рассмотрение степени защиты конкретного механизма).

Известно, что импульсное напряжение отрицательно влияет на параметры изоляции статорной обмотки, сокращая срок службы электродвигателя в целом. Граничные значения напряжений в зависимости от частоты импульса указаны в ГОСТ IEC 60034-25 [17]. Повышенная частота напряжения на обмотке статора (до 100 Гц) для работы во второй зоне скоростей вращения электродвигателя будет усугублять это влияние. Однако, учитывая периодичность использования якорно-швартовных механизмов и общую наработку электродвигателя при частоте напряжения выше 50 Гц, можно сделать вывод о правильности предположения снижения мощности электродвигателя при частотном двухзонном регулировании.

© Попов С.В., 2024  
© Бурмакин О.А., 2024  
© Малышев Ю.С., 2024

*Поступила в редакцию 19.07.2024*

*Принята к публикации 20.08.2024*

*Received 19.07.2024*

*Accepted 20.08.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Савенко А.Е. Судовые электроприводы. Керчь: КГМТУ, 2019. – 220 с.
- [2] Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Сравнительный анализ регулируемых электроприводов судовых лебедок // Науч.-практ. конф. «Морские технологии: проблемы и решения-2024», Апрель 22-26, 2024, Керчь, Россия. 2024. С. 95-99.
- [3] Вольский А.Б., Новоселов К.А. Модернизация электропривода брашпиля // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2023. № 3 (405). С. 135-142. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142
- [4] Токарев П.Н. Стоянка судна на якоре в стесненных путевых условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 78 (1). С. 234-244. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [5] Ивановская А.В., Жуков В.А., Попов В.В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыболовецкого судна // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2021. № 13 (6). С. 875-886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886

- [6] Козлов Д.Г., Хляка С.В., Колпакова О.А. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока // Межд. науч.-практ. конф. «Наука и образование на современном этапе развития: Опыт, проблемы и пути их решения для АПК», Ноябрь 30, 2023, Воронеж, Россия: Воронежский ГАУ, 2023. С. 104-110.
- [7] Мансуров Д.О. Анализ частотно-регулируемых асинхронных машин // III Всерос. науч.-практ. конф. «Энергетика, управление и автоматизация: Инновационные решения проблем», Санкт-Петербург, Россия. 2024. С. 152-156.
- [8] Романенко Н.Г., Головкин С.В., Сатенов К.Н., Жуманазаров М.П. Применение преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 1. С. 77-84.
- [9] Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Области применения способа динамического торможения в частотно-регулируемых электроприводах судовых механизмов // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2018. № 386 (4). С. 149-160. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
- [10] Умяров Д.В. Обеспечение электромагнитной совместимости электроприемников в энергетических системах судов с электродвижением на этапе проектирования // Интеллектуальная Электротехника. 2019. № 3 (15). С. 36-48. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_3\_36
- [11] Круговой А.Н. Работа асинхронных электродвигателей на повышенных угловых скоростях // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2023. № 4 (24). С. 28-33.
- [12] Мясников Г.С., Федосеев К.Р., Рябовол Н.С., Белов О.А. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой // Шестая национальная (всероссийская) науч.-тех. конф. «Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития», Ноябрь 09-10, 2023, Петропавловск-Камчатский, Россия. 2024. С. 58-62.
- [13] Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1987. – 134 с.
- [14] Самосейко В.Ф., Гуськов В.О. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2021. № 13 (3). С. 419-429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429
- [15] Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
- [16] Каталог ООО «Русэлпром» // Электрические машины. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ruselprom.ru/support/informatsionnye-materialy/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/> (дата обращения 05.05.2024).
- [17] ГОСТ ИЕС/TS 60034-25-2017. Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Электрические машины переменного тока, используемые в системах силового привода. Руководство по применению. Введ. 2019-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 66 с.

## References

- [1] A.E. Savenko, *Sudovye ehlektroprivody [Marine electric drives]*. Kerch: KGMTU, 2019 (in Russian).
- [2] S.V. Popov, O.A. Burmakin and YU.S. Malyshev, “Sravnitel'nyi analiz reguliruemyykh ehlektroprivodov sudovykh lebedok [Comparative analysis of adjustable electric drives for ship winches]”, in proc. *Scientific-practical conference “Morskaya tekhnologii: problemy i resheniya-2024 [Marine technologies: problems and solutions-2024]”*, Apr. 22-26, 2024, Kerch, Russia, pp. 95-99 (in Russian).
- [3] A.B. Vol'skii and K.A. Novoselov, “Modernization of the windlass electric drive”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, vol. 3, no. 405, pp. 135-142, 2023. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142
- [4] P.N. Tokarev, “The anchorage in cramped travel conditions”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 78, no. 1, pp. 234-244, 2024. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [5] A.V. Ivanovskaya, V.A. Zhukov and V.V. Popov, “Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 13, no. 6, pp. 875-886, 2021. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886
- [6] D.G. Kozlov, S.V. Khlyaka and O.A. Kolpakova, “Frequency-controlled AC electric drive”, in proc. *International scientific-practical conference “Nauka i obrazovanie na sovremennoy etape razvitiya: Opyt, problemy i puti ih resheniya dlya APK [Science and education at the present stage of development: Experience, problems and ways of their solution for the agro-industrial complex]”*, Nov. 30, 2023, Voronezh, Russia, pp. 104-110 (in Russian).
- [7] D.O. Mansurov, “Analiz chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh mashin [Analysis of frequency-controlled asynchronous machines]”, in proc. *III All-Russian scientific-practical conference “Energetika, upravlenie i avtomatizatsiya: Innovatsionnye resheniya problem [Power engineering, control and automation: Innovative solutions to problems]”*, 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 152-156 (in Russian).
- [8] N.G. Romanenko, S.V. Golovko, K.N. Satenov and M.P. Zhumanazarov, “Use of the frequency converter as a power supply of marine electric equipment”, *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, no. 1, pp. 77-84, 2016.
- [9] V.I. Vershinin, S.V. Makhonin, V.A. Parshikov and V.A. Khomyak, “Application of dynamic braking in frequency-controlled drives of ship machinery”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, vol. 386, no. 4, pp. 149-160, 2018. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
- [10] D.V. Umyarov, “Ensuring electromagnetic compatibility of electric receivers in power systems of vessels with electric motion at design stage”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 15, pp. 36-48, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_3\_36
- [11] A.N. Krugovoi, “Operation of asynchronous electric motors at elevated angular velocities”, *Automation and Measurement in Mechanical Engineering and Instrument Engineering*, vol. 4, no. 24, pp. 28-33, 2023.
- [12] G.S. Myasnikov, K.R. Fedoseev, N.S. Ryabovol and O.A. Belov, “Research of thermal processes of an asynchronous electric motor in continuous operation with variable load”, in proc. *Sixth National (All-Russian) scientific-technical conference*

- “Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: Problemy i puti razvitiya [Technical operation of water transport: problems and ways of development]”*, Nov. 09-10, 2023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, pp. 58-62 (in Russian).
- [13] V.V. Rudakov, I.M. Stolyarov and V.A. Dartau, *Asinkhronnye ehlektroprivody s vektornym upravleniem [Asynchronous electric drives with vector control]*. Leningrad: Ehnergoatomizdat: Leningrad branch, 1987 (in Russian).
- [14] V.F. Samoseiko and V.O. Gus'kov, “Algorithm for asynchronous electric drive vector control with rotor resistance estimation”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 13, no. 3, pp. 419-429, 2021. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429
- [15] I.I. Ehpshstein, *Avtomatizirovannyi ehlektroprivod peremennogo toka [Automated AC Electric Drive]*. Moscow: Ehnergoizdat, 1982 (in Russian).
- [16] Каталог ООО “Rusehlprom” // Ehlektricheskie mashiny [Catalog ООО “Rusehlprom” // Electrical machines]. [Online]. Available at: <https://www.ruselprom.ru/support/informatsionnye-materialy/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/> [Accessed: May 05, 2024] (in Russian).
- [17] Rotating electrical machines. Part 25. AC electrical machines used in power drive systems. Application guide, GOST IEC/TS 60034-25-2017, Jun. 2019.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Попов Сергей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Sergey V. Popov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Бурмакин Олег Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Oleg A. Burmakin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Мальшев Юрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Yurii S. Malyshev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

## НОВАЯ СЕРИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ БДУ-Д

**А.И. Белошистов**

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: [BeloshAlex@yandex.ru](mailto:BeloshAlex@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

**А.Л. Серов**

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: [jusstus@yandex.ru](mailto:jusstus@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

**А.А. Белошистов**

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: [alex1950@ro.ru](mailto:alex1950@ro.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

Разработана новая серия микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д для взрывозащищенных коммутационных аппаратов и трансформаторных подстанций. При этом соблюдался принцип взаимозаменяемости блоков. Новая серия блоков разработана в корпусах ранее применяемых устройств управления. Это позволит заменить ими вырабатывающие свой ресурс морально устаревшие блоки, находящиеся в эксплуатации, повысить технический уровень пусковой аппаратуры и передвижных трансформаторных подстанций.

**Ключевые слова:** микропроцессорные устройства управления, алгоритм работы, взаимозаменяемость.

**Для цитирования:** Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Новая серия микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 50-64. EDN MMFJSO

## **NEW SERIES OF MICROPROCESSOR REMOTE CONTROL DEVICES BDU-D**

**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 new series of microprocessor remote control devices BDU-D for explosion-proof switching devices and transformer substations. The principle of interchangeability of blocks was used. A new series of devices has been developed in the frames of previously used control devices. This will allow to replace obsolete units that exhausted their resource, and to increase the technical level of starting equipment and mobile transformer substations.

**Keywords:** microprocessor control devices, operation algorithm, interchangeability.

**For citation:** A.I. Beloshistov, A.L. Serov and A.A. Beloshistov, “New series of microprocessor remote control devices BDU-D”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 50-64, 2024. EDN MMFJSO

### **I. Введение**

Угольная промышленность, занимая достойное место в топливно-энергетическом комплексе страны, претерпевает серьезные изменения в плане технологической и энергетической модернизации. Увеличение производительности угольных шахт и нагрузки на забой потребовало не только разработки новых средств механизации очистных работ в виде мощных энерговооруженных очистных комплексов, но и создания новых коммутационных аппаратов, отвечающих современным требованиям.

Интенсивное развитие цифровой техники обусловило внедрение ее во все отрасли промышленности, в том числе, угледобывающую. Так,

например, устройства дистанционного управления, выполненные на традиционной элементной базе, уже не способны обеспечить возрастающие требования к надежности. Данные блоки предназначены для встройки в рудничные коммутационные аппараты и комплектные устройства напряжением до 1200 В и служат для дистанционного управления (с искробезопасными параметрами) рудничными коммутационными аппаратами [1]. Учитывая, что блоки управления, находящиеся в эксплуатации, были разработаны в 1960-х гг., элементная база их давно устарела. Многие детали сняты с производства, а некоторые заводы, производившие компоненты для блоков управления, закрылись. Эти обстоятельства ставят под вопрос возможность выполнения качественного ремонта данных изделий [2-4].

Микропроцессорные устройства начали применяться в мировой практике более двух десятилетий тому назад, постепенно вытесняя не только электромеханические устройства, но и электронную аналоговую технику. Переход на цифровые принципы обработки информации не привел к появлению новых принципов построения защит, но определил оптимальную структуру построения аппаратной части современных цифровых устройств и существенно улучшил эксплуатационные качества. При применении микропроцессоров в блоках управления повышается надежность работы схемы, уменьшается количество используемых элементов. Вследствие этого возникла необходимость разработки блоков дистанционного управления типа БДУ-Д [5].

Серия микропроцессорных устройств дистанционного управления на новой элементной базе для взрывозащищенных коммутационных аппаратов и трансформаторных подстанций разработана взамен блоков БДУ-4-2 и БДУ-4-3. Она состоит из неревверсивных блоков БДУ-Д-1, БДУ-Д-2 и реверсивного блока БДУ-Д-Р.

В статье представлена информация о технических параметрах и защитных характеристиках микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д, а также особенностях их устройства и работы.

## **II. Описание разработанных решений**

Основным конструктивным отличием блоков дистанционного управления является наличие различных видов применяемых соединителей для присоединения блока к аппаратуре. Типы соединителей приведены в табл. 1. Конструкция блоков в основном состоит из пластмассового корпуса и основания, на котором крепится вилка соединителя и печатная плата с элементами.

Блоки дистанционного управления выполняют следующие основные функции [6]:

- защиту от потери управляемости при замыкании или обрыве проводов цепи дистанционного управления;

- защиту от самовключения при кратковременном повышении напряжения питающей сети до 150 % номинального;
- включение исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления до 15 Ом включительно;
- удержание исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления до 35 Ом включительно;
- отключение исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления свыше 35 до 50 Ом включительно.

*Таблица 1.*  
Типы соединителей блоков БДУ

*Table 1.*  
Types of BDU block connectors

Тип соединителя	РШАВПБ-20	РШ2Н-2-16	ГРПМ1	Клеммники
Типы блоков управления	БДУ БДУ - 4 - 3 БДУ - Д БДУ - Т БДУ - П БДУ - Р - Т БДУ - М2	БДУ - 4 - 2	БДУ - 1	БДУ - 02
Характеристика соединителя	Имеются отказы в работе из-за поломок ламелей соединителя	Соединитель ножевого типа. Отказов в работе не наблюдалось	Соединитель игольчатого типа. Наблюдаются отказы из-за поломок при установке блока на панели	Необходимо большее время при замене блока

Кроме перечисленных основных, некоторые типы блоков имеют дополнительные функции, направленные на повышение информативности при эксплуатации.

Аналоги разработанных блоков построены на устаревшей элементной базе, и их эксплуатация при повышенной температуре способствует высушиванию электрических компонентов, что приводит к изменению их характеристик. Новая серия микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д позволяет обеспечить стабильность параметров на весь период эксплуатации.

Микропроцессорные устройства дистанционного управления серии БДУ-Д предназначены для дистанционного управления включением и отключением одиночных механизмов, подключенных к взрывозащищенным пускателям, комплектным устройствам управления (станциям), для дистанционного отключения аппаратов защиты (автоматических выключателей, РУНН трансформаторных подстанций), а также для контроля сопротивления заземляющего провода передвижных механизмов и машин и защиты от потери управления [7]. Блоки БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 имеют одинаковое схемное решение и отличаются только конструкцией.

Общий вид блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 представлен на рис. 1.

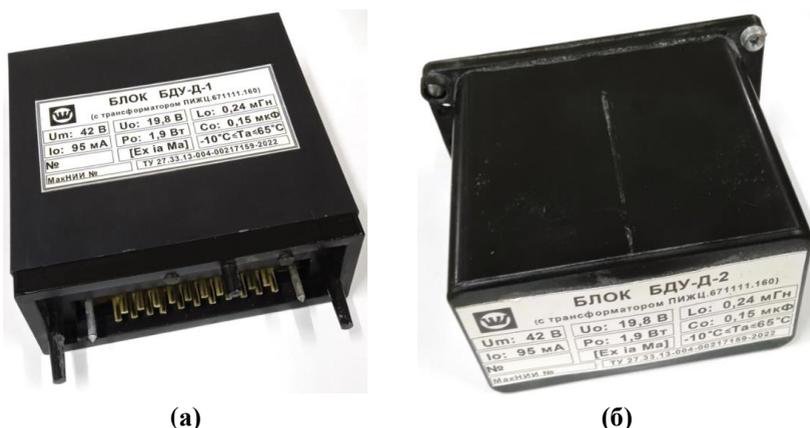
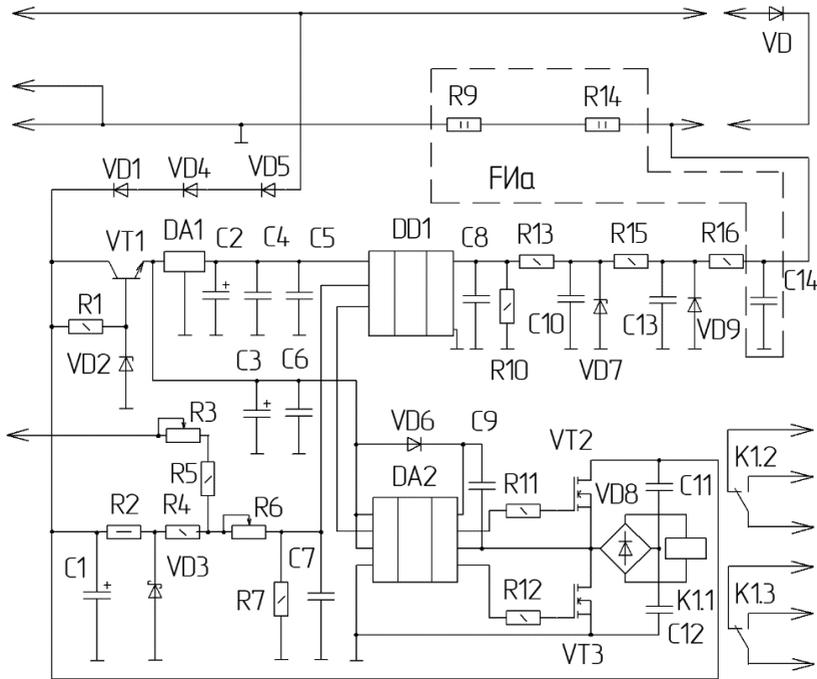


Рис. 1. Общий вид блока БДУ-Д-1 (а) и БДУ-Д-2 (б)

Fig. 1. General view of the BDU-D-1 (a) and BDU-D-2 (б)

Принципиальная электрическая схема блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 представлена на рис. 2 и состоит из следующих основных узлов [8]:

- стабилизированного источника питания драйвера ключей нижнего и верхнего уровней DA2, выполненного на транзисторе VT1[9];
- источника питания выходных усилителей исполнительного реле на диодах VD1, VD4, VD5;
- стабилизированного источника питания микропроцессора, выполненного на микросхеме DA1;
- основного измерительного органа – микроконтроллера DD1;
- элементов искрозащиты – R9, R14, R16, C14;
- драйвера DA2 для управления затворами полевых транзисторов;
- силовых ключей преобразователя VT2 и VT3;
- исполнительного реле K1.1.



**Рис. 2. Принципиальная электрическая схема блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2**

**Fig. 2. Electrical schematic diagram of BDU-D-1 and BDU-D-2**

Входной сигнал, снимаемый с резисторов R9 и R14, через фильтр низкой частоты, собранный на элементах C8, C10, C13, C14, R13, R15 и R16, подается на 7-й вывод микропроцессора DD1. На 6-й вывод микропроцессора подается опорное напряжение. При выполнении определенного алгоритма, на выводе 3 микропроцессора формируется сигнал ШИМ. Данный сигнал поступает на вывод 2 драйвера ключей нижнего и верхнего уровней DA2. Нагрузкой ключей VT2 и VT3 является выходное реле K1.1. Для управления коммутационными аппаратами, работающими в реверсивном режиме, разработан блок БДУ-Д-Р. Общий вид блока БДУ-Д-Р представлен на рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока БДУ-Д-Р представлена на рис. 4.



Рис. 3. Общий вид блока БДУ-Д-Р

Fig. 3. General view of BDU-D-R

В отличие от блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2, БДУ-Д-Р имеет два канала управления и два исполнительных реле. Для предотвращения возможности одновременного включения двух коммутационных аппаратов, исполнительные реле заблокированы.

Принципиальная электрическая схема блока управления БДУ-Д-Р состоит из следующих основных узлов:

- стабилизированного источника питания драйвера ключей нижнего и верхнего уровней DA2, выполненного на транзисторе VT1;
- источника питания выходных усилителей исполнительного реле на диодах VDI, VD4, VD5;
- стабилизированного источника питания микропроцессора, выполненного на микросхеме DA1;
- основного измерительного органа – микроконтроллера DD1;
- элементов искрозащиты – R16 - R21, C17, C18;
- драйверов DA2, DA3 для управления затворами полевых транзисторов;
- силовых ключей преобразователя VT2 – VT5;
- исполнительных реле K1.1 и K2.1.

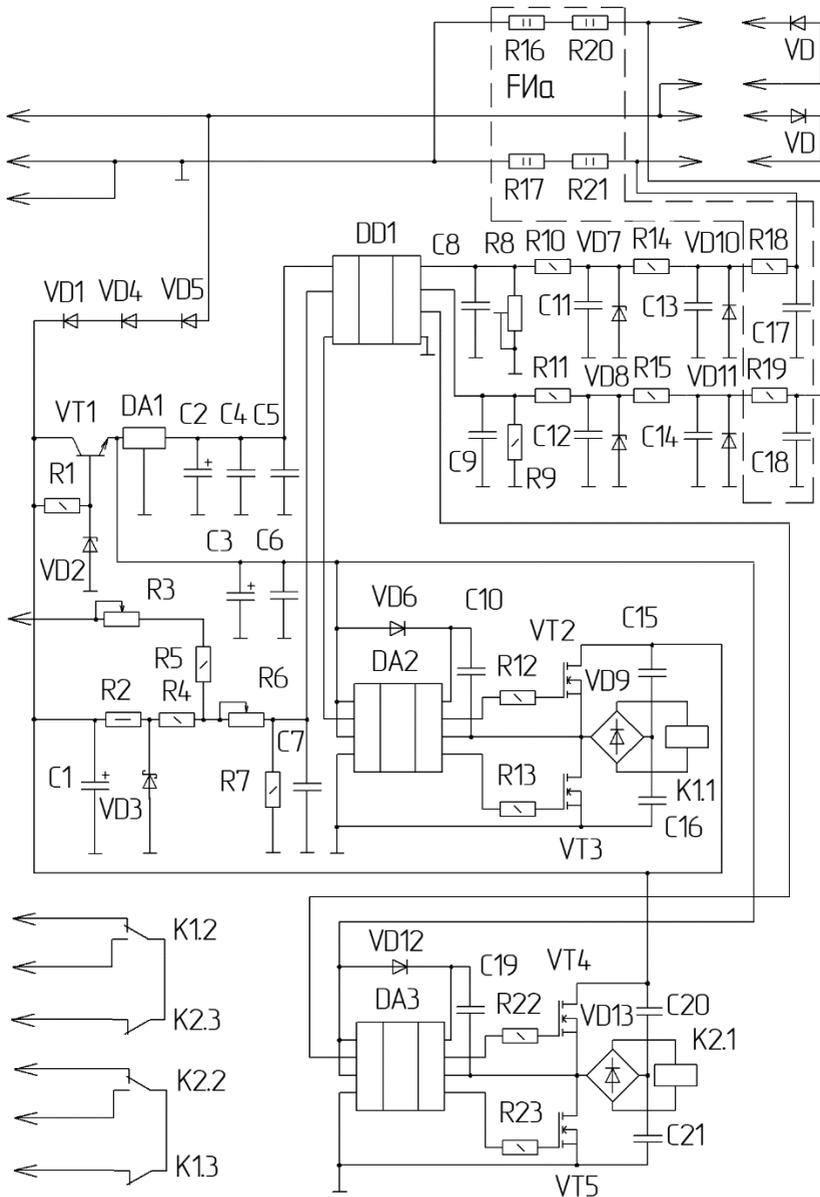


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема блока БДУ-Д-Р

Fig. 4. Electrical schematic diagram of the BDU-D-R

Входные сигналы, снимаемые с резисторов R16, R20 и R17, R21 через фильтры низкой частоты, собранные соответственно на элементах C8, C11, C13, C17, R10, R14, R18, и C9, C12, C14, C18, R11, R15, R19, подаются на 7-й и 6-й выводы микропроцессора DD1. На 5-й вывод микропроцессора подается опорное напряжение. При выполнении определенного алгоритма на выводе 2 или выводе 3 микропроцессора формируется сигнал ШИМ. Одновременное появление сигнала на выводах 2 и 3 заблокировано алгоритмом работы программы. Сформированный сигнал ШИМ поступает на выводы 2 драйверов ключей нижнего и верхнего уровней DA2 и DA3. Нагрузкой ключей VT2, VT3, VT4 и VT5 являются выходные реле K1.1 и K2.1.

Структурная схема программного обеспечения микропроцессорных устройств управления типа БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 представлена на рис. 5 [10]. Основные параметры блоков типа БДУ-Д приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Основные параметры блоков серии БДУ-Д**

**Table 2.**  
**The main parameters of the BDU-D series**

<b>Наименование основных параметров</b>	<b>Значение</b>
Номинальное напряжение питания, В	18
Частота сети, Гц	50
Напряжение на входных коммутирующих контактах, В	36
Допустимый ток коммутации выходными контактами, А, не более:	0,15
- постоянный, при $\tau \leq 0,015$ с	0,3
- переменный, при $\cos \varphi = 0,06$	

Электрическая схема блоков обеспечивает следующие виды защит:

- защиту от замыкания в цепях дистанционного управления;
- защиту от обрыва в цепях дистанционного управления;
- защиту от самовключения при кратковременном (не более 1 с) повышении напряжения сети до 150 % номинального;
- включение исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления до 20 Ом включительно, удержание исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления до 35 Ом включительно и отключение исполнительного элемента при сопротивлении цепи заземления свыше 35 Ом до 50 Ом включительно. Указанные параметры обеспечиваются при номинальном напряжении.

Механическая износостойкость элементов блоков не менее  $3 \cdot 10^6$  циклов включений-отключений.

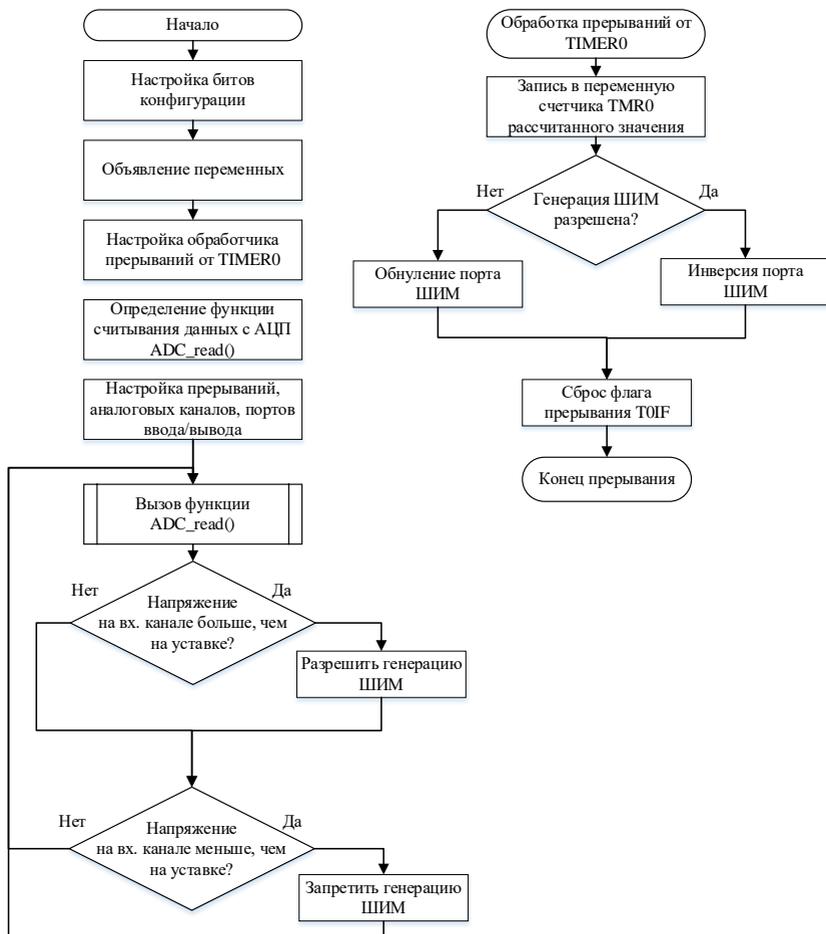


Рис. 5. Блок-схема программного обеспечения блоков серии БДУ-Д

Fig. 5. Block diagram of the software of the BDU-D series

### III. Исследования и испытания

Лабораторным испытаниям были подвергнуты опытные образцы блоков дистанционного управления БДУ-Д-1, БДУ-Д-2 и БДУ-Д-Р. В результате были получены следующие данные.

Проводилось по три включения блоков при напряжении  $15,3 \text{ В} \pm 2 \%$ ,  $18 \text{ В} \pm 2 \%$ ,  $19,8 \text{ В} \pm 2 \%$ . Блоки включались при указанных параметрах и не отключались при отпущенной кнопке «ПУСК», а при нажатии кнопки «СТОП» отключались.

Проводилось по три включения блоков при напряжении  $15,3 \text{ В} \pm 2 \%$  с последующим снижением напряжения до  $11,7 \text{ В} \pm 2 \%$  на время не более 2 с. Блоки не отключались в течение 2 с при напряжении  $11,7 \text{ В} \pm 2 \%$ .

Имитировалось короткое замыкание проводов цепи дистанционного управления. При этом блоки во включенном положении отключались, а в отключенном – не включались.

Имитировался обрыв проводов цепи дистанционного управления. При этом блоки во включенном положении отключались, а в отключенном – не включались.

Испытание защиты проводилось при номинальном напряжении  $15,3 \text{ В} \pm 2 \%$ ,  $18 \text{ В} \pm 2 \%$ ,  $19,8 \text{ В} \pm 2 \%$ . Результаты срабатываний блоков представлены в табл. 3 и 4.

**Таблица 3.**  
Результаты срабатываний блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2

**Table 3.**  
The results of the operation of the BDU-D-1 and BDU-D-2

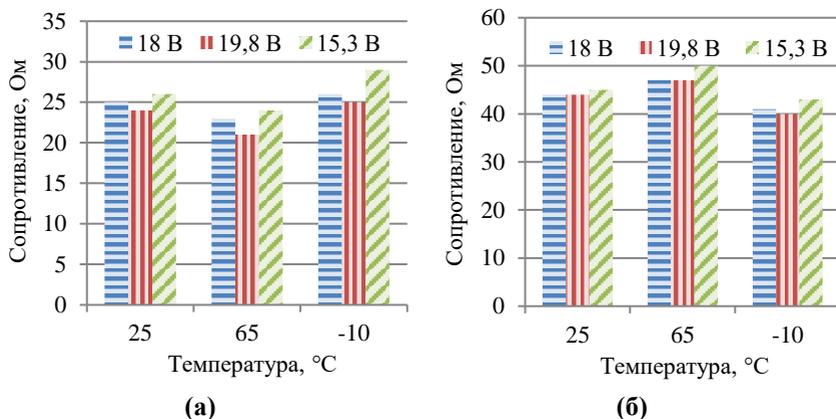
Проверяемый блок	$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	$R_{\text{вкл}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{откл}}, \text{ Ом}$
БДУ-Д-1	18,0	25	44
	19,8	24	44
	15,3	26	46
БДУ-Д-2	18,0	25	44
	19,8	24	44
	15,3	26	46

**Таблица 4.**  
Результаты срабатываний блоков БДУ-Д-Р

**Table 4.**  
The results of the operation of the BDU-D-R

Проверяемый блок	Режим	$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	$R_{\text{вкл}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{откл}}, \text{ Ом}$
БДУ-Д-Р	«Вперед»	18,0	25	44
		19,8	24	42
		15,3	25	46
	«Назад»	18,0	24	43
		19,8	23	41
		15,3	25	46

Также блоки дистанционного управления подверглись испытаниям на воздействие нижнего и верхнего значений температуры окружающей среды при эксплуатации. Результаты температурных испытаний для блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 приведены на рис. 6.



**Рис. 6. Диаграмма изменения параметров блоков БДУ-Д-1 и БДУ-Д-2 в зависимости от температуры окружающей среды: изменение сопротивления срабатывания (а); отпускания (б)**

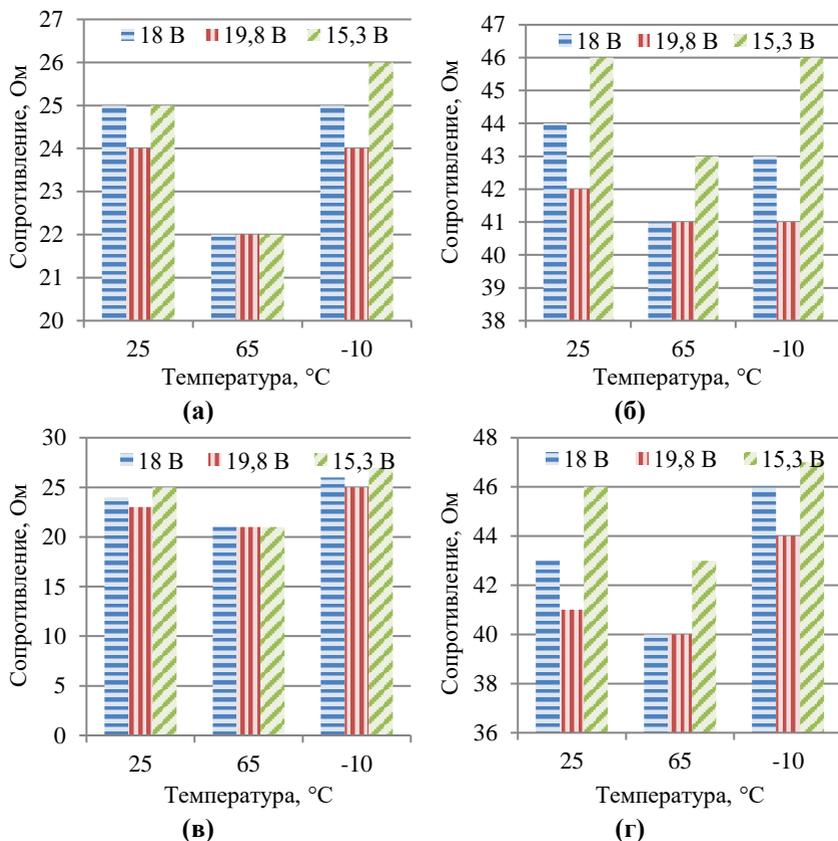
**Fig. 6. Diagram of changes in the parameters of the BDU-D-1 and BDU-D-2 depending on the ambient temperature change in response resistance (a); release resistance (б)**

Результаты температурных испытаний для блока БДУ-Д-Р в режимах работы «Вперед» и «Назад» приведены на рис. 7. Основные технические характеристики блоков дистанционного управления удовлетворяют требованиям ГОСТ 31614-2012, обеспечивают стабильные характеристики в заданном диапазоне температур окружающего воздуха и превосходят по своим параметрам аналогичные устройства, выполненные на аналоговой базе.

#### **IV. Заключение**

Применение микроконтроллерной техники в устройствах управления позволило создать блок, обладающий стабильными характеристиками и расширенными функциональными возможностями.

Результаты, полученные при разработке серии блоков БДУ-Д, могут быть использованы в проектировании комплексных устройств защиты и управления в сетях напряжением до 1200 В.



**Рис. 8.** Диаграмма изменения параметров блока БДУ-Д-Р в режиме работы «Вперед» (а, б) и «Назад» (в, г) в зависимости от температуры окружающей среды: изменение сопротивления срабатывания (а, в); отпускания (б, г)

**Fig. 8.** Diagram of changes in the parameters of the BDU-D-R in the Forward (а, б) and Backward (в, г) operation mode depending on the ambient temperature: change in the response resistance (а, в); release (б, г)

© Белошистов А.И., 2024

© Серов А.Л., 2024

© Белошистов А.А., 2024

Поступила в редакцию 26.06.2024

Принята к публикации 09.07.2024

Received 26.06.2024

Accepted 09.07.2024

**Библиографический список**

- [1] ГОСТ Р 58585-2019. Оборудование горно-шахтное. Общие требования безопасности к системам электроснабжения и управления. Введ. 2020-04-01. М.: Стандартиформ, 2019. – 14 с.
- [2] ГОСТ 30852.20-2002. Электрооборудование рудничное. Изоляция, пути утечки и электрические зазоры. Технические требования и методы испытаний. Введ. 2014-02-15. М.: Стандартиформ, 2013. – 18 с.
- [3] ГОСТ 31610.0-2014. Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. Введ. 2016-12-01. М.: Стандартиформ, 2015. – 80 с.
- [4] ГОСТ 31610.11-2014. Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i»». Введ. 2016-12-01. М.: Стандартиформ, 2016. – 119 с.
- [5] Кёнинг А., Кёнинг М. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам. Киев: МК-Пресс, 2007. – 255 с.
- [6] ГОСТ 31614-2012. Пускатели электромагнитные рудничные взрывозащищенные до 1140 В. Технические требования и методы испытаний. Введ. 2013-02-15. М.: Стандартиформ, 2013. – 19 с.
- [7] Катцен С. PIC-микроконтроллеры. Все, что вам необходимо знать. М.: Додэка-XXI, 2008. – 656 с.
- [8] Слесарев А.И., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров. Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 136 с.
- [9] Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Киев: МК-Пресс, 2007. – 288 с.
- [10] Предко М. PIC-микроконтроллеры: архитектура и программирование. М.: ДМК Пресс, 2010. – 512 с.

**References**

- [1] Mining equipment. General safety requirements for power supply and control systems, GOST R 58585-2019, Jan. 2020.
- [2] Mining electrical equipment. Insulation, leakage paths and electrical gaps. Technical requirements and test methods, GOST 30852.20-2002, Feb. 2014.
- [3] Explosive atmospheres. Part 0. Equipment. General requirements, GOST 31610.0-2014, Dec. 2016.
- [4] Explosive atmospheres. Part 11. Equipment with type of explosion protection “intrinsically safe electrical circuit “i””, GOST 31610.11-2014, Dec. 2016.
- [5] A. Kyoning and M. Kyoning, *Polnoe rukovodstvo po PIC-mikrokontrolleram [A complete guide to PIC Microcontrollers]*. Kiev: MK-Press, 2007 (in Russian).
- [6] Explosion-proof mine electromagnetic starters up to 1140 V. Technical requirements and test methods, GOST 31614-2012, Feb. 2013.
- [7] S. Katzen, *The Quintessential PIC® microcontroller*, 2nd ed. Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [8] A.I. Slesarev, E.V. Moisejkin and YU.G. Ust'yancev, *Aspekty proektirovaniya elektronnyh skhem na osnove mikrokontrollerov. [Aspects of designing electronic circuits based on microcontrollers]*. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2018 (in Russian).

- [9] M. Brown, *Power Supply Cookbook*, 2nd ed. Elsevier Science, 2001.
- [10] М. Предко, *PIC-mikrokontrollery: arhitektura i programirovanie. [PIC microcontrollers: architecture and programming]*. Moscow: DMK-Press, 2007 (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**, младший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

**Andrey L. Serov**, junior researcher 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.

---

---

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 621.331:621.314.57

EDN EWTBSF

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ СРЕДСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, НА ТРУБОПРОВОДЫ

**А.В. Крюков**

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and\_kryukov@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

*Иркутск, Россия*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***А.Е. Крюков**

ORCID: 0000-0003-3272-5738 e-mail: appleforevor@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия*

Задачей исследования является разработка цифровых моделей, обеспечивающих вычисление электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС) на трубопроводы. Предполагается, что система электроснабжения (СЭС), в состав которой входят данные ТС, оснащена средствами компенсации реактивной мощности (КРМ). Рассмотрены установки поперечного и продольного подключения. Для реализации моделей использованы методы определения режимов СЭС в фазных координатах. Для моделирования применялся программный комплекс *Fazonord*, версия 5.3.4.1 – 2024. Рассмотрена СЭС, включающая внешнюю сеть, образованную четырьмя линиями электропередачи 220 кВ, а также три тяговых подстанции, питающих контактные подвески двухпутного участка. В состав модели одной межподстанционной зоны включен трубопровод, расположенный параллельно трассе дороги на расстоянии в 50 м. Результаты моделирования показали, что средства КРМ заметно влияют на уровни

наведенных напряжений на трубопроводе. По сравнению с СЭС, не имеющей установок компенсации, максимумы этих параметров в отдельных точках трубы изменяются в пределах от  $-14$  до  $31$  %. Предлагаемая методика является универсальной и может применяться для ТС различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

**Ключевые слова:** моделирование, тяговые сети, установки компенсации реактивной мощности, электромагнитные влияния на трубопроводы.

**Для цитирования:** Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей, оснащенных средствами компенсации реактивной мощности, на трубопроводы // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 65-81. EDN: EWTBSF

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCES OF TRACTION NETWORKS EQUIPPED WITH REACTIVE POWER COMPENSATION MEANS ON PIPELINES

**A.V. Kryukov**

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

Irkutsk State Transport University

*Irkutsk, Russia*

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**K.V. Suslov**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: [dr.souslov@yandex.ru](mailto:dr.souslov@yandex.ru)

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

*Moscow, Russia*

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**A.E. Kryukov**

ORCID: 0000-0003-3272-5738 e-mail: [appleforevor@mail.ru](mailto:appleforevor@mail.ru)

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**Abstract.** This research presents digital models for calculation of the electromagnetic influences of traction networks on pipelines. It was assumed that the power supply system, which includes these networks, is equipped with means of reactive power compensation. Shunt and series reactive power compensation devices were considered. Methods for determining modes in phase coordinates were used. The Fazonord ver. 5.3.4.1 - 2024 was used for modeling. A power supply system with an external network formed by

four 220 kV power lines, as well as three traction substations that supply catenary suspensions of a double-track section was considered. The model of one intersubstation zone included a pipeline located parallel to the road route at a distance of fifty meters. The simulation results showed that compensation devices have a noticeable effect on the levels of induced voltages on the pipeline. Compared to a power supply system that does not have reactive power compensation devices, the maximum induced voltages at individual points of the pipe vary from  $-14$  to  $31$  %. The proposed methodology is universal and can be used for traction networks of various designs, as well as promising high-voltage traction networks.

**Key words:** electromagnetic influences on pipelines, modeling, reactive power compensation, traction networks.

**For citation:** A.V. Kryukov, K.V. Suslov and A.E. Kryukov, “Modeling of electromagnetic influences of traction networks equipped with reactive power compensation means on pipelines”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 65-81, 2024. EDN: EWTBSF

## I. Введение

Вблизи трасс электрифицированных железных дорог могут располагаться протяженные металлические конструкции, например, стальные трубопроводы. За счет электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей (ТС) на деталях этих сооружений могут появляться наведенные напряжения, опасные для персонала и негативно влияющие на системы защиты от электрохимической коррозии [1, 2]. Вопросам моделирования ЭМВ, создаваемых ТС и линиями электропередачи (ЛЭП), посвящено большое число работ. Алгоритмы аналитического расчета ЭМВ, применимые для относительно простых схем ТС, представлены в [3, 4]. Результаты анализа подходов к оценке ЭМВ ЛЭП переменного тока на подземные трубопроводы приведены в [5]. Вопросы защиты труб от воздействия наведенного переменного тока рассмотрены в [6]. Оценка влияния воздушных ЛЭП на стальные конструкции дана в [7]. Определению электрических величин в ТС и подземных трубах, находящихся под воздействием блуждающих токов, посвящена [8]. Результаты расчета наведенных напряжений на трубопровод представлены в [9]. Влияние ЛЭП высокого напряжения на распространение блуждающих токов от ТС проанализировано в [10]. Исследованию ЭМВ ЛЭП 750 кВ на несколько подземных труб посвящена работа [11]. Задача определения взаимного ЭМВ между ЛЭП и трубопроводом решена в [12, 13]. Детальное исследование помех переменного тока на металлических трубах, создаваемых двухцепными ЛЭП выполнено в [14]. Задача снижения ЭМВ на заглубленные трубы, проложенные вблизи воздушной ЛЭП решена в [15]. ЭМВ трехфазного кабеля, примыкающего к трубопроводу, изучалось в [16]. ЭМВ ЛЭП на подземные трубы проанализированы в [17]. Оценка влияния структуры грунта на покрытия заглубленного трубопровода дана в

[18]. Расчеты наведенных напряжений на подземных трубах при однофазных замыканиях на воздушных ЛЭП приведены в [19]. Вопросы моделирования влияний ЛЭП на трубопроводы проанализированы в [20, 21]. Ускоренные алгоритмы расчета ЭМВ ЛЭП на трубы описаны в [22]. Задача определения влияния повреждений изоляции на наведенные напряжения в трубопроводах решена в [23].

Анализ описанных выше публикаций дает возможность сделать следующие выводы:

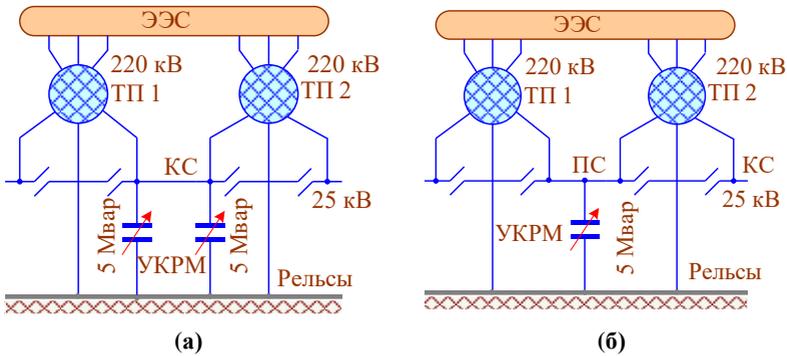
- задача моделирования ЭМВ ЛЭП и ТС является актуальной, что связано с необходимостью обеспечения безопасности персонала и снижением негативных воздействий наведенных токов на системы защиты от электрохимической коррозии;
- в большинстве работ по определению ЭМВ на трубы рассмотрены воздействия трехфазных ЛЭП;
- универсальный подход к вычислению ЭМВ ТС в указанных работах не реализован.

Кроме того, в ТС переменного тока широко применяются средства компенсации реактивной мощности [24–27], которые могут изменять уровни наведенных напряжений и токов, протекающих по трубам. Задача учета влияний КРМ в полном объеме не решена. Ниже представлены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМВ ТС на трубопроводы с корректным учетом установок КРМ.

## II. Методика и результаты моделирования

Для определения ЭМВ ТС использовались методы и алгоритмы моделирования режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ), предложенные в [28, 29] и реализованные в программном комплексе *Fazonord* версии 5.3.4.1 – 2024. Рассматривались установки поперечной компенсации (УКРМ), установленные на тяговой подстанции (ТП) и посту секционирования (ПС) (рис. 1), а также продольной компенсации (УПК) – в рельсовом фидере и междупутное компенсирующее устройство (КУ) (рис. 2).

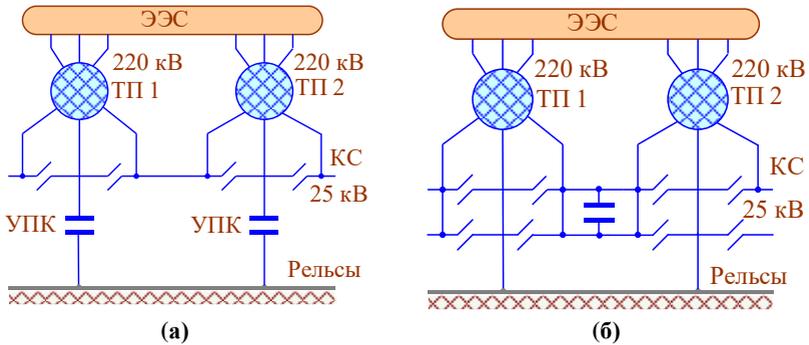
Моделирование проводилось для СТЭ (рис. 3), имеющей в своем составе: внешнюю сеть с четырьмя ЛЭП 220 кВ и три ТП, питающих контактные подвески двухпутного участка. В состав модели одной межподстанционной зоны был включен трубопровод диаметром 250 мм, расположенный параллельно трассе дороги на расстоянии в пятьдесят метров. Учитывалось распределенное заземление трубы с проводимостью 0,05 См/км. Также предполагалось, что по краям участка сооружения имеются стационарные заземлители с сопротивлением растеканию в один Ом. Для наглядности на рис. 3 показана контактная подвеска одного пути.



**Рис. 1. Схемы включения УКРМ:**

*на тяговой подстанции (ТП) (а); на посту секционирования (ПС) (б)*

**Fig. 1. Schematic diagram of the shunt reactive power compensation devices:**  
*on traction substation (a); on sectioning post (b)*



**Рис. 2. Схемы включения УПК:**

*в рельсовом фидере (а); междупутное компенсирующее устройство (б)*

**Fig. 2. Schematic diagram of the series reactive power compensation devices:**  
*in a rail feeder (a); inter-track compensating device (b)*

Часть схемы расчетной модели, соответствующая ТС и трубопроводу, представлена на рис. 4. Рассматривалось движение семи поездов в четном и нечетном направлениях (рис. 5). Массы составов указаны на рис. 6.

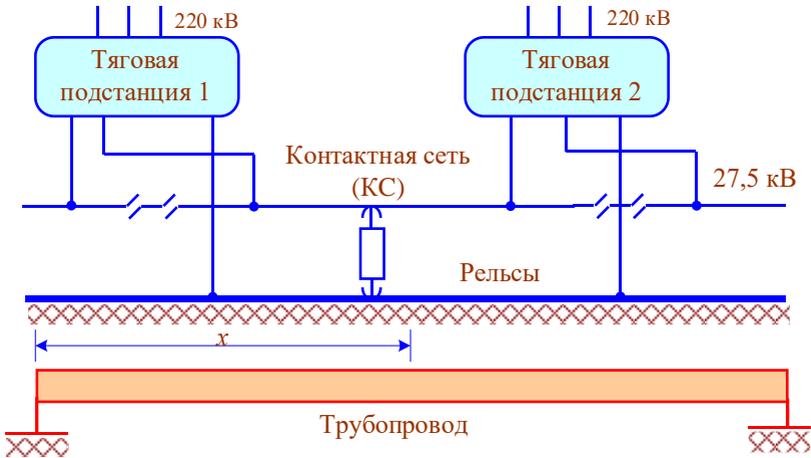


Рис. 3. Схема сближения ТС и трубопровода

Fig. 3. Diagram of the proximity of the traction network and the pipeline

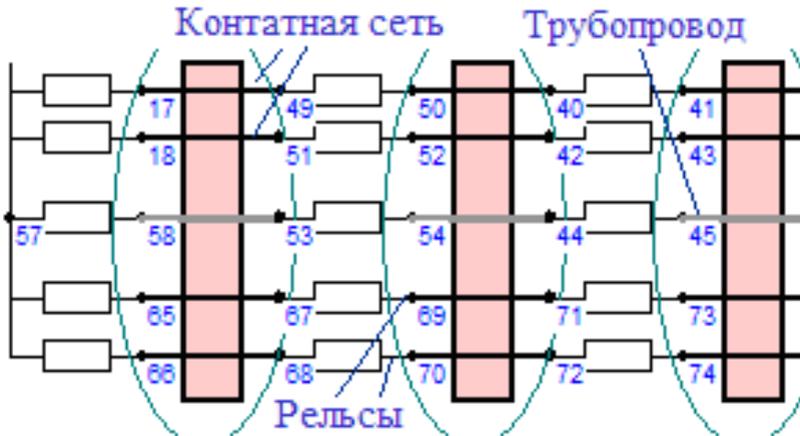
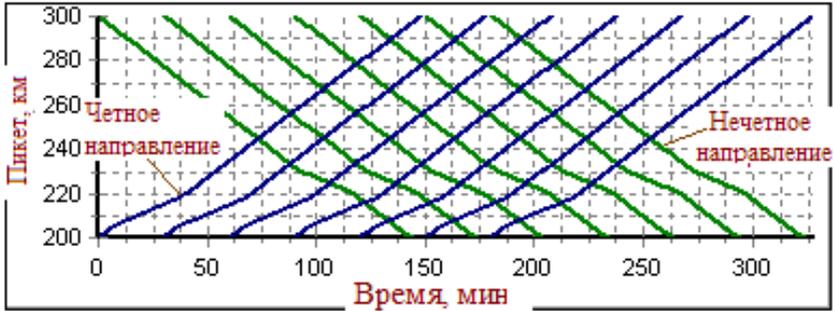


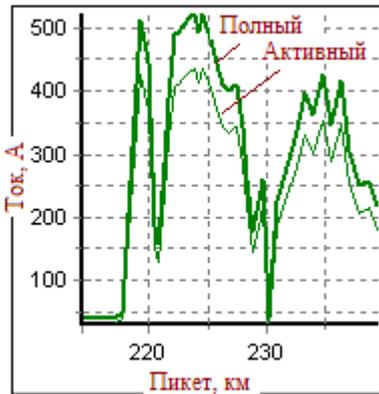
Рис. 4. Часть схемы расчетной модели, соответствующая ТС и трубопроводу

Fig. 4. Part of the calculation model diagram corresponding to the traction network and pipeline

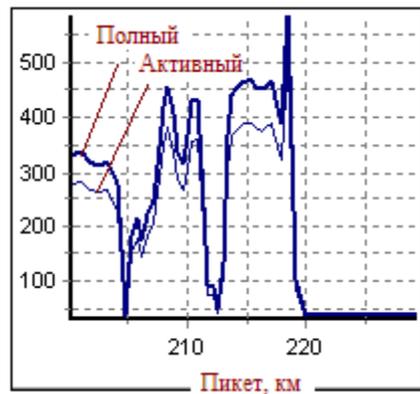


**Рис. 5. График движения составов:**  
 пикеты – точки разметки расстояний на железнодорожных линиях

**Fig. 5. Train schedule:**  
 pickets – distance marking points on railway lines



(a)



(б)

**Рис. 6. Токи, потребляемые электровозами:**  
 поезда нечетного направления массой 6300 т (а); то же четного 6000 т (б)

**Fig. 6. Currents consumed by electric locomotives:**  
 odd-numbered trains weighing 6300 t (a); the same even 6000 t (b)

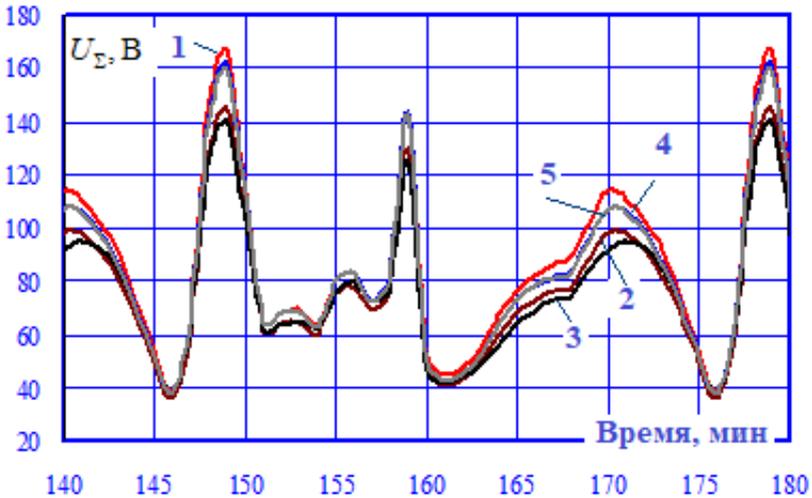
Моделирование наведенных напряжений и токов осуществлялось с учетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами [28]; при этом эффективные значения определялись по выражению:

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2},$$

где  $k_U, k_I$  – суммарные коэффициенты гармоник напряжения и тока.

Результаты моделирования представлены на рис. 7-11 и в табл. 1. На рис. 7 приведена зависимость  $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ , полученная для точки, соответствующей координате  $x = 20$  км. На рис. 8 и 9 показаны графики  $U_1 = U_1(t)$ ,  $I_1 = I_1(t)$ ,  $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ ,  $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$ , отвечающие максимумам соответствующих параметров.

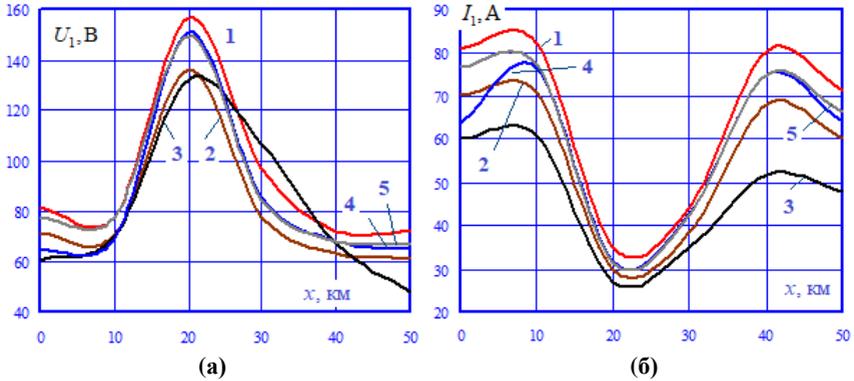
В табл. 1 приведены отличия максимальных значений  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$  при использовании установок компенсации от ситуации, в которой они отсутствуют. Указанные параметры проиллюстрированы на рис. 10. На рис. 11 приведены координаты точек максимальных различий  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$ .



**Рис. 7. Изменения наведенных напряжений во времени в точке с координатой  $x = 20$  км:**

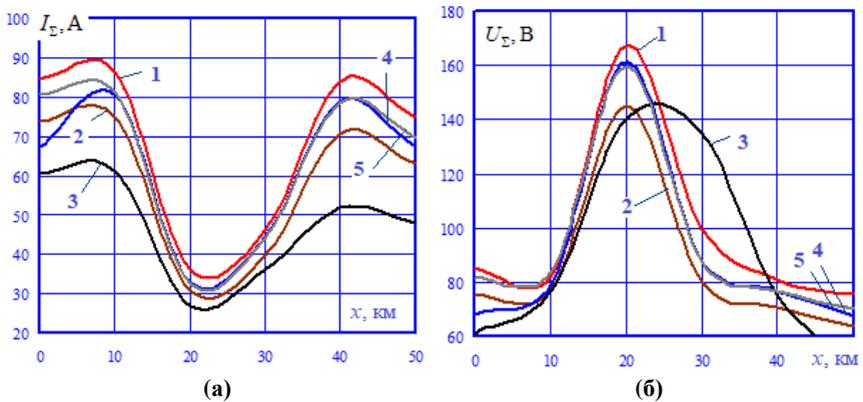
*междупутное КУ (1); УКРМ на ТП (2); УКРМ на ПС (3); УПК в рельсовом фидере (4); средства компенсации отсутствуют (5)*

**Fig. 7. Changes in induced voltages over time at a point  $x = 20$  km:**  
*inter-track compensating device (1); shunt compensation device on traction substation (2); shunt compensation device on sectioning post (3); series compensation device in a rail feeder (4); no means of compensation (5)*



**Рис. 8.** Зависимости максимальных значений наведенных напряжений (а) и токов (б) основной частоты: обозначения аналогичны рис. 7

**Fig. 8.** Dependences of the maximum values of induced voltages (a) and currents (b) of the fundamental frequency: legend is similar to fig. 7



**Рис. 9.** Зависимости максимальных значений эффективных наведенных напряжений (а) и токов (б) от координаты  $x$ : цифровые обозначения аналогичны рис. 7

**Fig. 9.** Dependences of the maximum values of effective induced voltages (a) and currents (b) on the  $x$  coordinate: legend is similar to fig. 7

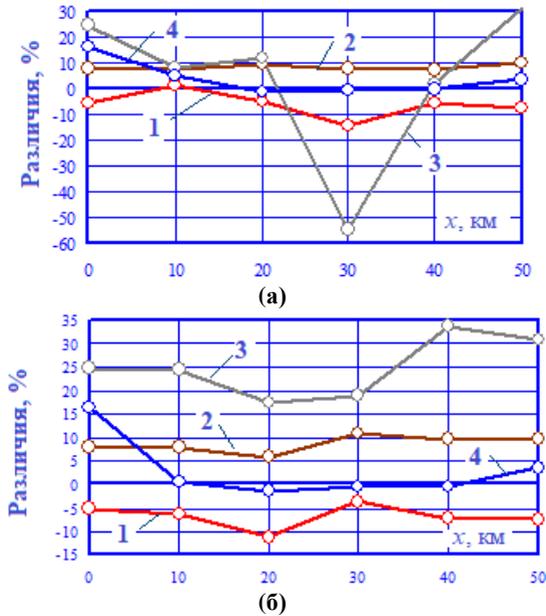


Рис. 10. Отличия максимальных значений  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б):  
 междупутное КУ (1); УКРМ на ТП (2);  
 УКРМ на ПС (3); УПК в рельсовом фидере (4)

Fig. 10. Differences in maximum values of  $U_{\Sigma}$  and  $I_{\Sigma}$ :  
 inter-track compensating device (1); shunt compensation device on traction  
 substation (2); shunt compensation device on sectioning post (3);  
 series compensation device in a rail feeder (4)

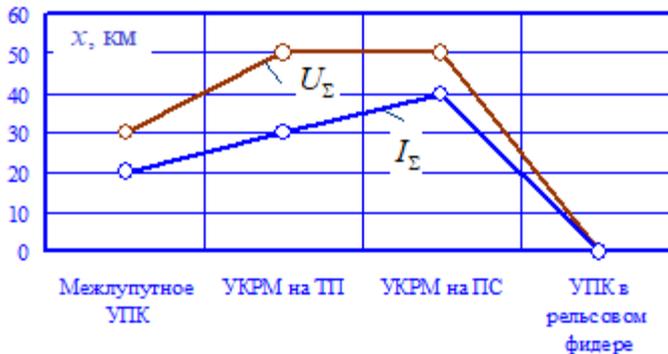


Рис. 12. Координаты точек максимальных различий  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$

Fig. 12. Coordinates of points of maximum differences  $U_{\Sigma}$  and  $I_{\Sigma}$

**Таблица 1.**  
**Отличия максимальных значений  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$  при наличии установок компенсации от ситуации, в которой они отсутствуют**

**Table 1.**  
**Differences between the maximum values of  $U_{\Sigma}$  and  $I_{\Sigma}$  in the presence of reactive compensation devices from the situation in which they are absent**

Вид установки	$x$ , км					
	0	10	20	30	40	50
$U_{\Sigma}$						
Междупутное КУ	-5,23	1,40	-4,82	-14,30	-5,31	-7,43
УКРМ на ТП	7,99	7,73	9,11	7,95	7,34	9,65
УКРМ на ПС	24,75	8,23	11,88	-54,81	1,92	30,88
УПК в рельсовом фидере	16,33	5,32	-1,09	-0,93	-0,26	3,53
$I_{\Sigma}$						
Междупутное КУ	-5,26	-6,41	-11,26	-3,66	-7,10	-7,44
УКРМ на ТП	7,95	7,84	5,88	10,77	9,75	9,63
УКРМ на ПС	24,69	24,62	17,49	18,96	33,76	30,80
УПК в рельсовом фидере	16,31	0,61	-1,25	-0,39	-0,33	3,53

Представленные результаты дают возможность сформулировать следующие выводы:

- наличие установок КРМ приводит к изменению уровней наведенных напряжений на деталях трубопровода (рис. 7, 8а, 9а, 10а и 11) и токов (рис. 8б, 9б, 10б и 11), протекающих по трубе;

- при междупутном УПК в точках с координатами  $x = 0, 20, 30$  максимумы  $U_{\Sigma}$  уменьшаются 5... 14 %; в точке  $x = 10$  наблюдается рост этого параметра на 1,4 %;  $I_{\Sigma}$  снижается на 4... 11 %; следует отметить, что данные установки компенсации не получили распространения, но могут использоваться в ситуациях, когда токи контактных подвесок отдельных путей существенно различаются;

- при УКРМ, установленном на ТП, происходит увеличение  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$  на 7... 10 и 6... 11 % соответственно;

- при УКРМ, размещенном на посту секционирования, напряжения  $U_{\Sigma}$  увеличиваются во всех точках измерения, кроме  $x = 30$  км; в этой точке оно снижается на 55 %; токи, протекающие по трубе, возрастают на 17... 34 %;

- при УПК в рельсовом фидере наблюдается рост  $U_{\Sigma}$  в точках  $x = 0, 10$  и 50 км, а при  $x = 20, 30$  и 40 км снижение величины этого параметра; характер изменения  $I_{\Sigma}$  аналогичен  $U_{\Sigma}$ .

### III. Заключение

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие определение режимов СТЭ, оснащенных установками продольной и поперечной компенсации. Проведенное моделирование показало, что по сравнению с СТЭ, не имеющей установок КРМ, максимумы наведенных напряжений в отдельных точках трубы изменяются в пределах от  $-14$  до  $31$  %.

Представленная методика может использоваться на практике при выборе средств КРМ на участках сближения ТС с протяженными проводящими сооружениями. Методика является универсальной и может применяться для ТС различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

© Крюков А.В., 2024

© Суслов К.В., 2024

© Крюков А.Е., 2024

*Поступила в редакцию 22.03.2024*

*Принята к публикации 08.05.2024*

*Received 22.03.2024*

*Accepted 08.05.2024*

### Библиографический список

- [1] Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26-34.
- [2] Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Вестник ВНИИЖТ*. 1990. № 2. С. 17-19.
- [3] Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Стройиздат, 1967. – 248 с.
- [4] Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. – 164 с.
- [5] Ракито О.Н. Анализ подходов к оценке влияния высоковольтных линий электропередач переменного тока на подземные трубопроводы // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2022. № 2 (128). С. 79-87. DOI: 10.33285/1999-6934-2022-2(128)-79-87
- [6] Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблучанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод и его защита от воздействия наведенного переменного тока // *Газовая промышленность*. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
- [7] Пискунов А.А., Копытина Е.А., Чудинова П.А., Петрикеева И.А. Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // *Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации*. 2019. № 3 (16). С. 42-46.

- 
- [8] Kandaev V.A., Avdeeva K.V., Utkina A.V. Determination of electrical quantities in the traction rail network and buried pipelines located under the influence of stray currents from electrified railway transport // 2018 Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics), Nov. 13-15, 2018, Omsk, Russia. Omsk: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601479
- [9] Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radošević T. Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline // 2011 3rd International youth conference on energetics (IYCE), Jul. 07-09, 2011, Leiria, Portugal: IEEE, 2011.
- [10] Hoger M., Regula M., Bracinek P., Otcenasova A. Influence of high voltage power lines on the propagation of stray currents from DC traction // 2022 ELEKTRO (ELEKTRO), May 23-26, 2022, Krakow, Poland: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/EL-EKTRO53996.2022.9803410
- [11] Haifeng S., Pei W., Haojing C., Xiancang A., Tianlong E., Bonian S., Rongrong Z., Zhihong L., Chunfeng W. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines // 2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC), May 17-21, 2016, Shenzhen: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522725
- [12] Liu X.-T., Wang W., Yu H. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline // 2017 4th International conference on information science and control engineering (ICISCE), Jul. 21-23, 2017, Changsha, China: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICISCE.2017.293
- [13] Tao Q., Suna B., Bingran S., Tao Y., Yunfei M., Xinliang Y. Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and gas pipelines (May 2018) // 2018 China International conference on electricity distribution (CICED), Sep. 17-19, 2018, Tianjin, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592579
- [14] Yuan H., Yang G., Jiang M., Wang X., Wang S., Yuan K. A detailed study of AC interference on metal pipelines due to double circuit power lines // 2018 2nd IEEE Conference on energy internet and energy system integration (EI2), Oct. 20-22, 2018, Beijing, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582027
- [15] Lu D., Liu C., Qi L., Yuan H. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line // 2012 Sixth International conference on electromagnetic field problems and applications, Jun. 19-21, 2012, Dalian, China: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384
- [16] Wang Y., Liao X., Li J., Lu T. Impedance parameter analysis and electromagnetic influence modeling of three phase cable adjacent to metal pipeline // 2021 International conference on advanced electrical equipment and reliable operation (AEERO), Oct. 15-17, 2021, Beijing, China: IEEE, 2021.
- [17] Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines // 2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161133
- [18] Kou X., Guo L., Zhang K., Dong M., Lu H., Li C., Hou M., Liu Y. Influence of soil structure on coating voltage of buried pipeline when lightning strikes transmission

- lines // 2021 IEEE 4th International electrical and energy conference (CIEEC), May 28-30, 2021, Wuhan, China: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510526
- [19] Qi L., Yuan H., Li L., Cui X. Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. № 55 (5). P. 965-974. DOI: 10.1109/TEMC.2013.2240391
- [20] Janda Z., Noháč K. Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines // 2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161179
- [21] Janda Z., Noháč K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines // Proceedings of the 2014 15th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 12-14, 2014, Brno-Bystrc, Czech Republic: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839430
- [22] Mu W., Zhao Z., Zhu Y., Lei X. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline // 2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC), May 17-21, 2016, Shenzhen, China: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522916
- [23] Abdel-Gawad N.M.K., Shaalan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of fault locations on the pipeline induced voltages near to power transmission lines // 2019 21st International middle east power systems conference (MEPCON), Dec. 17-19, 2019, Cairo, Egypt: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008020
- [24] Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [25] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Регулирование мощности установки поперечной компенсации на посту секционирования // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 6 (55). С. 48-54.
- [26] Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2013. № 2 (50). С. 12-17.
- [27] Герман Л.А. Оценка технических показателей продольной емкостной компенсации, включенной между путями электрифицированной железной дороги // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1983. № 12. С. 44-46.
- [28] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [29] Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск: ИрГУПС, 2022. – 190 с.

## References

- [1] A.V. Kotelnikov and A.B. Kosarev, “Elektromagnitnoe vliyaniye tyagovykh setej peremennogo toka na metallicheskie kommunikacii [Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures]”, *Electricity*, no. 9, pp. 26-34, 1992 (in Russian).

- [2] E.I. Konnova and A.B. Kosarev, “Raschet elektromagnitnogo vliyaniya setej peremennogo toka na metallicheskie kommunikacii [Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications]”, *Russian Railway Science Journal*, no. 2, pp. 17-19, 1990 (in Russian).
- [3] I.V. Strizhevsky and V.I. Dmitriev, *Teoriya i raschet vliyaniya elektrificirovannoj zheleznoj dorogi na podzemnye metallicheskie sooruzheniya [Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures]*. Moscow: Stroyizdat, 1967 (in Russian).
- [4] M.P. Ratner, *Induktivnoe vliyanie elektrificirovannyh zheleznyh dorog na elektricheskie seti i truboprovody [Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines]*. Moscow: Transport, 1966 (in Russian).
- [5] O.N. Rakito, “Analysis of approaches to assessing the impact of high-voltage AC power lines on underground pipelines”, *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, vol. 2, no. 128, pp. 79-87, 2022.
- [6] D.B. Zakharov., D.Yu. Piont and P.A. Yabluchansky, “Assessment of the influence of high-voltage power transmission line on the underground pipeline and pipeline protection against the induced alternate current”, *Gas Industry*, vol. 9, no. 774, pp. 84-90, 2018.
- [7] A.A. Piskunkov, E.A. Kopytina, P.A. Chudinova and I.A. Petrikeeva, “Vliyanie vozdushnyh linij peremennogo toka na stal'nye truboprovody [The influence of AC overhead lines on steel pipelines]”, *Urban planning. Infrastructure. Communication*, vol. 3, no. 16, pp. 42-46, 2019 (in Russian).
- [8] V.A. Kandaev, K.V. Avdeeva and A.V. Utkina, “Determination of electrical quantities in the traction rail network and buried pipelines located under the influence of stray currents from electrified railway transport”, in proc. *2018 Dynamics of systems, mechanics and machines (Dynamics)*, Nov. 13-15, 2018, Omsk, Russia. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601479
- [9] B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic, “Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline”, in proc. *2011 3rd International youth conference on energetics (IYCE)*, Jul. 07-09, 2011, Leiria, Portugal.
- [10] M. Hoger, M. Regula, P. Bracinik and A. Otcenasova, “Influence of high voltage power lines on the propagation of stray currents from DC traction”, in proc. *2022 ELEKTRO (ELEKTRO)*, May 23-26, 2022, Krakow, Poland. DOI: 10.1109/EL-EKTRO53996.2022.9803410
- [11] S. Haifeng, W. Pei, C. Haojing, A. Xiancang, E Tianlong, S. Bonian, Z. Rongrong, L. Zhihong and W. Chunfeng, “Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines”, in proc. *2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC)*, May 17-21, 2016, Shenzhen. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522725
- [12] X.-T. Liu, W. Wang and H. Yu, “Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline”, in proc. *2017 4th International conference on information science and control engineering (ICISCE)*, Jul. 21-23, 2017, Changsha, China. DOI: 10.1109/ICISCE.2017.293
- [13] Q. Tao, B. Suna, S. Bingran, Y. Tao, M. Yunfei and Y. Xinliang, “Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and

- gas pipelines (May 2018)”, in proc. *2018 China International conference on electricity distribution (CICED)*, Sep. 17-19, 2018, Tianjin, China. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592579
- [14] H. Yuan, G. Yang, M. Jiang, X. Wang, S. Wang and K. Yuan, “A detailed study of AC interference on metal pipelines due to double circuit power lines”, in proc. *2018 2nd IEEE Conference on energy internet and energy system integration (EI2)*, Oct. 20-22, 2018, Beijing, China. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582027
- [15] D. Lu, C. Liu, L. Qi and H. Yuan, “Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line”, in proc. *2012 Sixth International conference on electromagnetic field problems and applications*, Jun. 19-21, 2012, Dalian, China. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384
- [16] Y. Wang, X. Liao, J. Li and T. Lu, “Impedance parameter analysis and electromagnetic influence modeling of three phase cable adjacent to metal pipeline”, in proc. *2021 International conference on advanced electrical equipment and reliable operation (AEERO)*, Oct. 15-17, 2021, Beijing, China. DOI: 10.1109/AEERO52475.2021.9708294
- [17] M. Adamek and Z. Vostracky, “Interference from transmission lines to buried pipelines”, in proc. *2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161133
- [18] X. Kou, L. Guo, K. Zhang, M. Dong, H. Lu, C. Li, M. Hou and Y. Liu, “Influence of soil structure on coating voltage of buried pipeline when lightning strikes transmission lines”, in proc. *2021 IEEE 4th International electrical and energy conference (CIEEC)*, May 28-30, 2021, Wuhan, China. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510526
- [19] L. Qi, H. Yuan, L. Li and X. Cui, “Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 5, pp. 965-974, Oct. 2013. DOI: 10.1109/TEMPC.2013.2240391
- [20] Z. Janda and K. Noháč, “Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines”, in proc. *2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161179
- [21] Z. Janda and K. Noháč, “Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines”, in proc. *Proceedings of the 2014 15th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 12-14, 2014, Brno-Bystrc, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839430
- [22] W. Mu, Z. Zhao, Y. Zhu and X. Lei, “A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline”, in proc. *2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC)*, May 17-21, 2016, Shenzhen, China. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522916
- [23] N.M.K. Abdel-Gawad, E.M. Shaalan, M.M.F. Darwish and M.A.M. Basuny, “Influence of fault locations on the pipeline induced voltages near to power transmission lines”, in proc. *2019 21st International middle east power systems conference (MEPCON)*, Dec. 17-19, 2019, Cairo, Egypt.

- [24] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornye ustanovki elektrifirovannykh zheleznnykh dorog [Capacitor installations of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1983 (in Russian).
- [25] L.A. German and K.V. Kishkurno, "Power control of shunt compensation installation at section pillar", *World of Transport and Transportation*, vol. 12, no. 6 (55), pp. 48-54, 2014.
- [26] L.A. German and V.P. Goncharenko, "Modern design of series capacitive compensation in the traction electrical supply system", *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, vol. 2, no. 50, pp. 12-17, 2013.
- [27] L.A. German, "Ocenka tekhnicheskikh pokazatelej prodol'noj emkostnoj kompensacii, vkluchЕННОj mezhdu putyami elektrifirovannoj zheleznoj dorogi [Assessment of technical indicators of longitudinal capacitive compensation connected between the tracks of an electrified railway]", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energetika*, no. 12, pp. 44-46, 1983 (in Russian).
- [28] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Slozhnonесimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]*. Irkutsk: ISTU, 2005 (in Russian).
- [29] A.V. Kryukov, A.V. Cherepanov and A.E. Kryukov, *Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy linij elektroperedachi i tyagovykh setej na protyazhennyye metallicheskie konstrukcii [Modeling of electromagnetic influences of power lines and traction networks on extended metal structures]*. Irkutsk: ISTU, 2022 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Andrey V. Kryukov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

**Суслов Константин Витальевич**, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Konstantin V. Suslov**, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

**Крюков Александр Егорович**, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Aleksandr E. Kryukov**, postgraduate student of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

УДК 621.316.1

EDN HNFWWF

## О НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**В.Ю. Вуколов**

ORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: [vvucolov@mail.ru](mailto:vvucolov@mail.ru)

филиал Самарского государственного университета путей сообщения  
в Нижнем Новгороде  
*Нижний Новгород, Россия*

Для обеспечения основного питания аппаратуры железнодорожной автоматики, телемеханики и связи вдоль полотна железной дороги прокладывается воздушная линия (ВЛ) электропередачи напряжением 6(10) кВ, получившая название ВЛ сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ). По концам ВЛ СЦБ подключается к шинам 0,4 кВ собственных нужд тяговых подстанций через специальные разделительные повышающие трансформаторы. Для резервного питания устройств СЦБ между двумя смежными тяговыми подстанциями прокладывается линия продольного электроснабжения напряжением 6(10) кВ или линия «два провода – рельс» напряжением 25 кВ (не используется при новом строительстве железнодорожной инфраструктуры). Анализ возможных схем подключения тяговых подстанций показал, что, с точки зрения схемных решений нетяговых сетей, обеспечиваются требования первой категории надежности при питании нагрузок СЦБ. В то же время обеспечение надежности электроснабжения устройств СЦБ невозможно без выполнения требований по качеству электрической энергии в точках их подключения. Возникают проблемы с обеспечением правильной работы релейной защиты и автоматики при прокладке ВЛ СЦБ на опорах контактной сети ввиду ее электромагнитного влияния. Однако ключевой проблемой является обеспечение допустимого уровня напряжения в точках подключения устройств СЦБ, допустимое отклонение которого ограничено величиной  $\pm 10\%$  от номинального согласно правилам технической эксплуатации железных дорог.

**Ключевые слова:** надежность, нетяговые потребители, нетяговая сеть, тяговые подстанции, устройства СЦБ, электроснабжение железных дорог, электроэнергетика.

**Для цитирования:** Вуколов В.Ю. О надежности электроснабжения устройств сигнализации, централизации и блокировки электрифицированных железных дорог // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 82-99. EDN HNFWWF

# ON POWER SUPPLY RELIABILITY OF ELECTRIFIED RAILWAYS SIGNALING DEVICES

**V.Yu. Vukolov**

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

The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** A 6 (10) kV overhead power transmission line (OHL) is laid along the railway track to provide the main power supply for railway automation, telemechanic and communications equipment. This line was called signaling, centralization and interlocking (SCI) devices OHL. At the ends of line, OHL SCB is connected to 0.4 kV buses of traction substations auxiliaries through special separation step-up transformers. A 6(10) kV longitudinal power supply line or a 25 kV “two wires – rail” line (not used in new construction of railway infrastructure) is laid between two adjacent traction substations for backup power supply of SCI devices.

An analysis of possible connection schemes for traction substations has shown that, from the point of view of circuit solutions for non-traction networks, the requirements of the first category of reliability are met when powering SCI loads. At the same time, ensuring the reliability of the power supply of the SCI devices is impossible without meeting the requirements for the power quality at the points of their connection. There are problems with ensuring the correct operation of relay protection and automation when laying OHL SCI on contact network supports due to its electromagnetic influence. However, the key problem is to ensure a permissible voltage level  $\pm 10\%$  of the nominal value at the connection points of the SCI devices in accordance with the rules of technical operation of railways.

**Keywords:** signaling devices, traction substations, non-train power consumer, non-train power network, reliability, railway power supply, electric power industry.

**For citation:** V.Yu. Vukolov, “On power supply reliability of electrified railways signaling devices”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 82-99, 2024. EDN HHFWFW

## I. Введение

Устройства сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ) относятся к техническим средствам железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [1], они являются неотъемлемой частью системы обеспечения движения поездов. К основным системам СЦБ относятся [2]:

- электрическая централизация стрелок и светофоров;
- системы интервального регулирования движения поездов на перегонах;
- диспетчерские централизация и контроль за движением поездов;
- сигнализация на переездах и искусственных сооружениях;
- системы контроля состояния участков пути на основе счета осей;

– путевые устройства автоматической локомотивной сигнализации и автоматического управления торможением.

Таким образом, от надежности электроснабжения аппаратуры СЦБ во многом зависит безопасность пассажирских и грузовых перевозок железнодорожным транспортом, обеспечение планового графика движения поездов, пропускная способность участков дорог. Средняя плотность нагрузки СЦБ номинальным напряжением 0,22 кВ, получающей основное питание от сети 6 кВ: для двухпутных участков – 0,7 кВт/км ( $\cos\varphi = 0,7$ ), для однопутных – 0,5 кВт/км ( $\cos\varphi = 0,6$ ). При основном питании от линии 10 кВ соответственно 0,9 кВт/км ( $\cos\varphi = 0,55$ ) и 0,6 кВт/км ( $\cos\varphi = 0,45$ ) [3].

Рассмотрим ключевые особенности, определяющие надежность электроснабжения устройств сигнализации, централизации и блокировки в зависимости от вида тяги, категорий грузонапряженности железнодорожных линий, нового строительства / реконструкции нетяговых сетей [4].

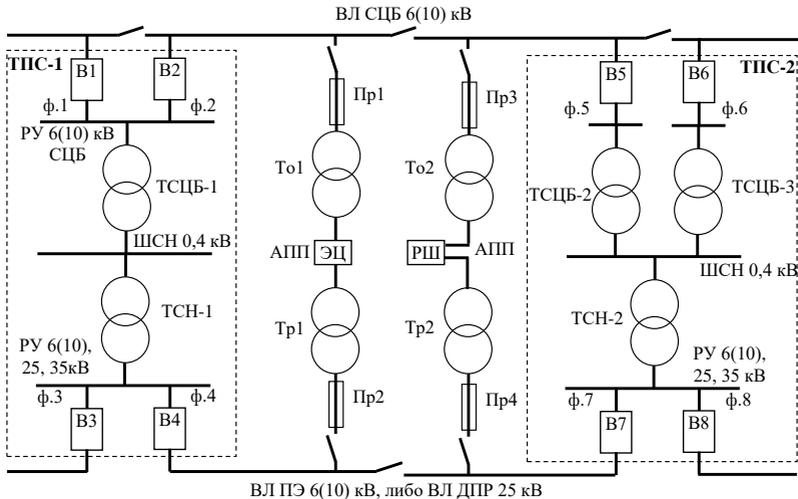
## **II. Особенности построения системы электроснабжения устройств СЦБ на электрифицированных участках дорог**

Устройство СЦБ относится к первой, а в ряде случаев и к первой особой категории надежности, поэтому для их электроснабжения предусматривается не менее двух независимых источников питания с устройством автоматического включения резерва (АВР) за время, не превышающее 1,3 с [5]. Для обеспечения основного питания аппаратуры железнодорожной автоматики, телемеханики и связи вдоль полотна железной дороги, независимо от вида тяги поездов, прокладывается воздушная линия (ВЛ) электропередачи напряжением 6(10) кВ (в отдельных случаях 35 кВ), получившая название ВЛ СЦБ. Подключение иных нетяговых нагрузок к ВЛ СЦБ запрещено [6].

В качестве центров питания ВЛ СЦБ на электрифицированных участках дорог выступают тяговые подстанции (ТПС). Предельное расстояние между смежными ТПС при электрификации на постоянном токе составляет 25 км, на переменном – 50 км [7]. Исключение составляют железные дороги, электрифицированные по системе 2x25 кВ, когда предельная длина межподстанционной зоны, а следовательно, и ВЛ СЦБ, возрастает до 70 км [7]. В этом случае для обеспечения требуемого уровня напряжения в точках подключения устройств СЦБ (во всех режимах работы сети  $\pm 10\%$  от номинального, согласно ПТЭ железных дорог [5]) предусматривается дополнительный пункт питания по трассе линии, в качестве которого выступает двухтрансформаторная подстанция 6(10)/0,4 кВ.

Обобщенная схема электроснабжения устройств СЦБ на электрифицированных железных дорогах показана на рис. 1. ВЛ СЦБ подключается к шинам гарантированного питания собственных нужд ТПС (ШСН, рис. 1) через разделительные повышающие трансформаторы (ТСЦБ, рис. 1). Коли-

чество распределительных устройств (РУ), специализированных для подключения отходящих фидеров ВЛ СЦБ (РУ 6(10) кВ СЦБ, рис. 1), выбирается так, чтобы от одного РУ получало питание не более двух линий. При этом сборные шины РУ не секционируются [5]. Для подключения трех и более ВЛ СЦБ предусматриваются второе и, при необходимости, третье РУ.



**Рис. 1. Система электроснабжения устройств СЦБ на электрифицированных железных дорогах между тяговыми подстанциями ТПС-1 и ТПС-2:**

*To, Tr – основной и резервный трансформатор питания устройств СЦБ; Пр1..Пр4 – предохранители ПКН; В1..В8 – головные выключатели отходящих фидеров ф.1..ф.8; РШ – релейный шкаф; ЭЦ – устройство электрической централизации; АПП – автоматика переключения питания*

**Fig. 1. The SCI devices power supply system on electrified railways between traction substations ТПС -1 and ТПС -2:**

*To, Tr – main and backup transformer for power supply of SCI devices; Пр1..Пр4 – fuses; В1..В8 – switches of outgoing feeders ф.1..ф.8; РШ – relay box; ЭЦ – electrical centralization device; АПП - automatic power switching*

Количество разделительных трансформаторов ТСЦБ в зависимости от числа отходящих присоединений ВЛ СЦБ не регламентируется. На практике получили распространение два варианта:

– отходящие от тяговой подстанции ВЛ СЦБ получают питание от общего разделительного трансформатора (ф.1 и ф.2 от ТСЦБ-1 на ТПС-1, рис. 1);

– каждая ВЛ СЦБ получает питание от собственного разделительного

трансформатора (ф.5 от ТСЦБ-2 и ф.6 от ТСЦБ-3, рис. 1).

Использование общего трансформатора ТСЦБ снижает капитальные затраты на сооружение ТПС, но в вопросе обеспечения надежности электроснабжения устройств СЦБ имеет ряд недостатков:

- при выводе в ремонт единственного разделительного трансформатора межподстанционная зона ВЛ СЦБ увеличивается в два раза;

- исключается возможность применения простейшей защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) на ВЛ СЦБ с контролем напряжения нулевой последовательности;

- одновременное возникновение ОЗЗ на разных отходящих фидерах ВЛ СЦБ (ф.1 и ф.2, рис. 1) приведет к появлению двухфазного короткого замыкания (КЗ) через большое переходное сопротивление, для распознавания которого чувствительности предусмотренных требованиями [8] классических токовых защит недостаточно.

Указанные недостатки вводят ограничения на возможности управления конфигурацией ВЛ СЦБ в нормальном установившемся режиме – от каждой ТПС получает питание только один фидер. Кроме того, для реализации токовой защиты от ОЗЗ при одновременном питании от разделительного трансформатора двух отходящих присоединений, требуется установка трансформаторов тока нулевой последовательности на кабельном выводе от выключателя РУ. Таким образом, исключается возможность применения ячеек РУ с воздушным выводом, а наличие согласно ПУЭ [9] требования безусловного автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи (ЛЭП) вызовет включение на КЗ при повреждениях на головном участке, сопровождающихся максимальными по величине токами. Подключение устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи к ВЛ СЦБ осуществляется через мачтовые трансформаторные подстанции с одним или двумя однофазными трансформаторами типа ОМ-6(10)/0,23 кВ [6] мощностью от 1,25 до 10 кВА ( $To1$  и  $To2$ , рис. 1). При наличии в межподстанционной зоне постов электрической централизации их питание обеспечивается от трехфазных трансформаторов мощностью от 25 кВА. Трансформаторы подключаются к ВЛ СЦБ по упрощенным схемам через предохранители типа ПКН (рис. 1), применение которых обусловлено токоограничивающим эффектом, создаваемым разделительными трансформаторами ТСЦБ. В то же время в практике эксплуатации отмечены случаи перегорания плавких вставок вследствие постепенного износа под действием коррозии либо от грозовых перенапряжений [10]. Для повышения надежности ВНИИЖТом более 40 лет назад были разработаны специальные высоковольтные автоматические выключатели для защиты трансформаторов ОМ, однако внедрения в эксплуатацию они не получили.

Поскольку технические средства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи относятся к первой, а в ряде случаев и первой особой категории надежности, для обеспечения резервирования их питания между двумя смежными ТПС прокладывается также линия продольного электро-снабжения (ВЛ ПЭ) напряжением 6(10) кВ или линия «два провода – рельс» (ВЛ ДПР, при электрификации на постоянном токе не используется) напряжением 25 кВ (рис. 1). Подключение этих линий производится непосредственно к обмоткам тягового трансформатора, применение разделительных трансформаторов не предусматривается. При этом сооружение ВЛ ДПР при новом строительстве, электрификации или реконструкции участков железных дорог не допускается [6] в силу следующих причин:

- худшие показатели качества электроэнергии по сравнению с ВЛ ПЭ, особенно по несимметрии напряжений;
- возможность использования только одностороннего питания ВЛ ДПР, поскольку порядок чередования фаз вторичных напряжений на двух смежных ТПС, как правило, не совпадает (такая схема фазировки используется для уменьшения несимметрии напряжения в питающей сети);
- невозможность обеспечения АВР при переключении питания ВЛ ДПР на смежную ТПС.

Питание устройств СЦБ от ВЛ ПЭ или ВЛ ДПР организовывается с помощью мачтовых трансформаторных подстанций с понижающими трансформаторами типа ОМ-6(10)/0,23 кВ или ОМ-25/0,23 кВ (Тр1 и Тр2, рис. 1) мощностью от 1,25 до 10 кВА. Точки подключения аппаратуры СЦБ к основному и резервному источникам питания оборудуются автоматикой переключения питания (АПП, рис. 1), представляющей собой электромеханическое реле минимального напряжения типа АШ2-220, тем самым обеспечивая требования первой категории надежности [9, 11, 12]. На однопутных участках электрифицированных железных дорог ВЛ СЦБ прокладывают на самостоятельных опорах. При числе путей два и более, на станциях и двухпутных вставках однопутных участков, ВЛ СЦБ при новом строительстве или реконструкции размещают на опорах контактной сети [6]. Такой подход позволяет уменьшить капитальные затраты, однако приводит к снижению надежности электроснабжения устройств СЦБ по причине электромагнитного влияния тяговой сети. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

ВЛ СЦБ номинальным напряжением 6-35 кВ, согласно [6], работают с изолированной нейтралью, поскольку ток ОЗЗ обычно не превышает 5 А [10]. В такой сети гальваническая связь с точками нулевого потенциала реализуется только через заземленную нейтраль первичной обмотки трансформатора напряжения (ТН), устанавливаемого на шинах РУ СЦБ (рис. 1). ТН характеризуется высоким сопротивлением первичной обмотки и работает в режиме, близком к холостому ходу, потребляя из сети ток порядка

нескольких мА и, практически не оказывая влияния на величину наведенного напряжения. В то же время увеличивается вероятность возникновения резонанса в контуре, образованном емкостью ВЛ СЦБ и нелинейной индуктивностью ТН, особенно при возникновении ОЗЗ.

Выделяют электрическое, гальваническое и магнитное влияние контактной сети на режим ВЛ СЦБ [13]. Токи электрического влияния обуславливаются наличием емкостей, возникающих между контактной сетью и ВЛ СЦБ, расположенными на малом электрическом удалении. Их воздействие минимизируется при наличии ТН с заземленной нейтралью первичной обмотки в РУ СЦБ [10]. Гальваническое влияние контактной сети приводит к возникновению токов, протекающих в земле на объектах, имеющих заземления. Наиболее интенсивно проявляется при электрификации на постоянном токе, вызывая коррозию подземных металлических сооружений, в том числе опор контактной сети. Однако наибольшие проблемы создает появление напряжения контура «фаза ВЛ СЦБ – земля», наведенного переменным магнитным полем от тока контактной сети. В отдельных случаях, например, при мостовых переходах железных дорог, величина наведенного напряжения может быть сопоставима с рабочим напряжением линии. Поскольку уставка срабатывания реле АШ2-220 равна 180 В, чувствительность будет недостаточна для автоматического перевода питания устройств СЦБ на ВЛ ПЭ или ВЛ ДПР при отключении ВЛ СЦБ. Кроме того, в силу неодинаковой удаленности фаз ВЛ СЦБ от контактного и усиливающего проводов, возникает дополнительное напряжение нулевой последовательности, затрудняющее корректную работу простейшей защиты от ОЗЗ. Появление наведенного напряжения в фазах ВЛ СЦБ также сопровождается ухудшением показателей качества электроэнергии и появлением небаланса по электрической энергии, переданной в линию и потребленной конечными электроприемниками.

Снижение негативного влияния контактной сети на обеспечение надежности электроснабжения устройств СЦБ достигается применением специальных технических средств. Наибольшее распространение получила установка по концам проблемного участка ВЛ СЦБ группы из трех однофазных трансформаторов типа ОМ с объединением нулевых выводов обмоток и заземлением нейтрали через резистор. В то же время электромагнитное влияние контактной сети практически исключается при прокладке ВЛ СЦБ на отдельных опорах с шириной сближения не менее 15 м. Для обеспечения электромагнитной совместимости с тяговой сетью, согласно [6], предусматривается транспозиция проводов ВЛ СЦБ через 1 км при прокладке на опорах контактной сети переменного тока и через каждые 3 км при прокладке на самостоятельных опорах или опорах контактной сети постоянного тока. При этом полный шаг транспозиции составляет 3 и 9 км

соответственно. Такое решение также обеспечивает выравнивание индуктивностей и емкостей фаз ВЛ СЦБ, что повышает чувствительность токовой защиты линии при повреждениях в конце зоны защиты, особенно при электрификации на переменном токе и одностороннем режиме питания. Еще одной целью транспозиции является уменьшение магнитного влияния ВЛ СЦБ на соседние параллельные воздушные линии связи [10].

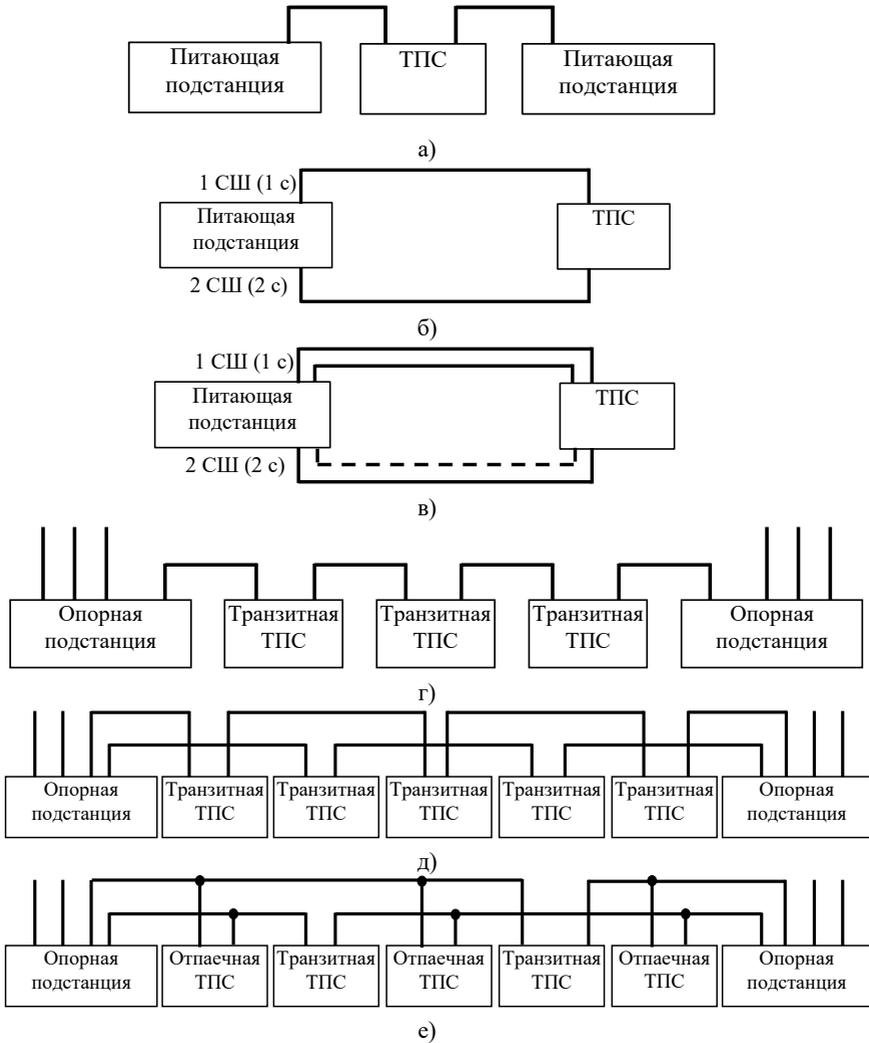
### **III. Требования к схемам внешнего электроснабжения тяговых подстанций**

Обеспечение требований по надежности для питания устройств СЦБ невозможно без установления соответствующих требований к схемам внешнего электроснабжения железнодорожной инфраструктуры. Поэтому при разработке таких схем должно быть исключено одновременное выпадание двух смежных ТПС или пунктов питания. Допустимые способы подключения вновь сооружаемых ТПС к внешним питающим сетям для наиболее грузонапряженных железнодорожных линий (категории «С», «О», I, II) представлены на рис. 2 [7].

В представленных вариантах подключения ТПС (рис. 2 а-е) под опорной понимается подстанция, электроэнергия на которую может быть подана не менее чем по трем ЛЭП. При этом термины «опорная подстанция», «транзитная подстанция» и «отпаечная подстанция» применяются только для подстанций с высшим напряжением 110 кВ и выше [7]. Область применения каждого из рассмотренных на рис. 2 способов подключения ТПС ограничена номинальным напряжением питающей сети (табл. 1).

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что во всех представленных вариантах обеспечивается подключение ТПС в соответствии с требованиями первой категории надежности. Поэтому для наиболее грузонапряженных железнодорожных линий можно считать, что питание ВЛ ПЭ со стороны ТПС также обеспечивается по требованиям первой категории надежности. Для вновь сооружаемых ТПС на железнодорожных линиях с низкой грузонапряженностью (категории III и IV) рекомендуется применение тех же правил, что и для линий с высокой грузонапряженностью. Однако, ввиду меньшей загрузки таких дорог, вводятся некоторые послабления по упрощению схем питания ТПС. Так, допускается подключение ТПС с высшим напряжением 110 кВ и выше:

- к питающим подстанциям, не являющимся опорными;
- к ЛЭП, имеющим одностороннее питание;
- к питающим ЛЭП, не удовлетворяющим требованиям по общему количеству подключенных подстанций (табл. 1).



**Рис. 2. Допустимые способы подключения вновь сооружаемых тяговых подстанций (ТПС) на участках наиболее грузонапряженных железнодорожных линий**

**Fig. 2. Acceptable ways to connect newly constructed traction substations (TS) on sections of the most heavily loaded railway lines**

**Таблица 1.**  
**Допустимые способы подключения вновь сооружаемых тяговых подстанций к питающим электрическим сетям**

**Table 1.**  
**Acceptable ways to connect newly constructed traction substations to the power supply networks**

Описание способа подключения ТПС	Напряжение на высокой стороне ТПС, кВ			
	10 (20)	35	110	220
Двумя ЛЭП к разным питающим подстанциям (рис. 1.1а)	+	+	Допустимо, только если одна из двух питающих подстанций является опорной	
Двумя ЛЭП к разным системам (секциям) сборных шин одной и той же питающей подстанции (рис. 1.1 б)	+	+	Допустимо, только если питающая подстанция является опорной	
Тремя и более ЛЭП к разным системам (секциям) сборных шин одной и той же питающей подстанции (рис. 1.1 в)	+	-	-	-
В рассечку одноцепной ЛЭП между двумя опорными питающими подстанциями (рис. 1.1 г)	-	-	Допустимо, только если после подключения ТПС общее количество подстанций (в том числе, нетяговых), подключенных к данной ЛЭП, будет не более трех	+
В рассечку или на ответвлениях от двухцепной ЛЭП между двумя опорными питающими подстанциями (рис. 1.1 д)	-	-	Допустимо, только если после подключения ТПС общее количество подстанций (в том числе, нетяговых), подключенных к данной ЛЭП, будет не более пяти ТПС постоянного тока или трех ТПС переменного тока	Допустимо, только если после подключения ТПС общее количество подстанций (в том числе, нетяговых), подключенных к данной ЛЭП, будет не более пяти
В рассечку или на ответвлениях от двух одноцепных ЛЭП между двумя опорными питающими подстанциями (рис. 1.1 е)	-	-		

На железнодорожных линиях категории IV (минимальная грузонапряженность) допускается выполнение тяговых подстанций постоянного тока напряжением 35 кВ отпаечными [7]. Однако, даже в этом случае обеспечиваются условия для электроснабжения нетяговых потребителей как потребителей первой категории надежности.

При реконструкции ТПС, проводимой без изменения питающего напряжения подстанции, как правило, сохраняют существующую схему подключения ТПС к питающей сети [7]. На основе анализа схем электроснабжения тяговых подстанций Горьковской железной дороги (ГЖД) установлено, что для действующих ТПС грузонапряженных линий, за исключением отдельных нетиповых случаев, реализуется подключение к питающей сети с обеспечением требований первой категории надежности. Если реконструкция ТПС связана с изменением высшего напряжения подстанции, то при выборе схем подключения к питающей сети действуют те же требования, что и при новом строительстве ТПС [7].

#### IV. Определение уровня напряжения в точках присоединения устройств СЦБ

В то же время обеспечение надежности электроснабжения устройств СЦБ невозможно без выполнения требований по качеству электрической энергии в точках их подключения. Существенная доля однофазных нагрузок тяговых трансформаторов вызывает несимметрию напряжений в центре питания ВЛ СЦБ, а несогласованный диапазон допустимых отклонений напряжения в тяговой и нетяговой сетях [14] может привести к изменению режимов работы рельсовых цепей, снижению эффективности функционирования аппаратуры преобразования информации и работоспособности железнодорожных светофоров [15].

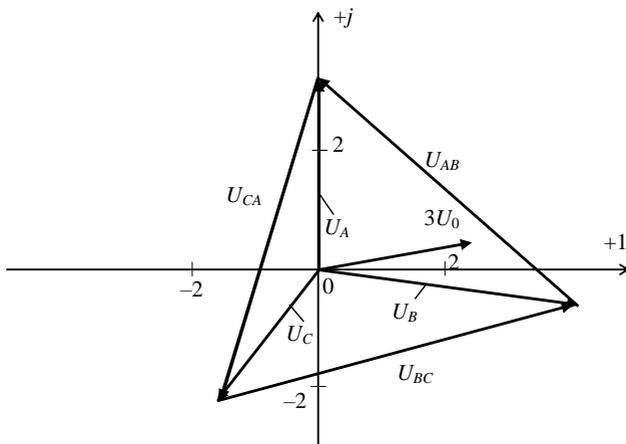


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений на шинах 6 кВ РУ СЦБ одной из тяговых подстанций Нижегородской области

Fig. 3. Phase diagram of the voltage on the 6 kV buses of the SCI switch-gear of one of the traction substations of the Nizhny Novgorod region

На рис. 3 представлена векторная диаграмма фазных и линейных напряжений на шинах 6 кВ РУ СЦБ одной из ТПС Нижегородской области, построенная на основе выборочного контроля напряжений в летние характерные сутки. Трансформатор ТСЦБ подключен последовательно с трехфазным трансформатором собственных нужд с номинальными напряжениями 27,5/0,4 кВ, запитанным от тяговой обмотки силового трансформатора ТПС с номинальным коэффициентом трансформации 115/27,5/6 кВ.

Несимметрия фазных напряжений в центре питания ВЛ СЦБ объясняется мощными однофазными нагрузками тяговой сети и приводит к появлению напряжения нулевой последовательности  $3U_0 = 2,606$  кВ. Усредненные действующие значения составили:  $U_{AB} = 5,616$  кВ,  $U_{BC} = 5,880$  кВ,  $U_{CA} = 5,614$  кВ. Полученные значения показывают, что напряжение в центре питания ВЛ СЦБ не соответствует требованиям ПУЭ [9] по встречному регулированию напряжения и ниже желаемого. Более того, только одно из трех линейных напряжений соответствует диапазону отклонения  $\pm 10\%$  от номинального. Падения напряжения в рассматриваемой ВЛ СЦБ, несмотря на суммарную длину 58 км с учетом отпайки, пренебрежимо малы (не более 30-40 В для наиболее удаленной точки линии при одностороннем режиме питания), поскольку средняя загрузка фаз головного участка не превышает 2,5 А. С учетом емкостного тока линии, наоборот, можно ожидать повышенные напряжения в наиболее удаленных точках подключения нагрузки на 1-3 % [15]. Поэтому для оценки фактического уровня напряжения в точках подключения устройств СЦБ учитываем только напряжение в центре питания, номинальный коэффициент трансформации понижающего трансформатора типа ОМ и падение напряжения в самом трансформаторе.

Активное  $R_T$  и реактивное  $X_T$  сопротивления трансформатора ОМ-1,25/6/0,23 в Г-образной схеме замещения, приведенные к номинальному напряжению обмотки высокого напряжения (ВН), определяются на основе паспортных характеристик по выражениям:

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{50 \cdot 10^{-6} 6^2}{(1,25 \cdot 10^{-3})^2} = 1152 \text{ Ом}; \quad (1)$$

$$Z_T = \frac{U_K \cdot U_{НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{5 \cdot 6^2}{100 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 1440 \text{ Ом}; \quad (2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{1440^2 - 1152^2} = 864 \text{ Ом}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_K$  – потери КЗ в трансформаторе, МВт;  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора, кВ;  $S_{НОМ}$  – номинальная мощность трансформатора, МВА;  $U_K$  – напряжение КЗ трансформатора, %.

Для расчета предельной величины падения напряжения в трансформаторе используется номинальный ток стороны ВН ( $I_{\text{НОМ ВН}}$ ), равный 0,208 А. При этом допустимая перегрузка трансформатора не учитывается. Комплекс максимального тока нагрузки, приведенный к стороне ВН трансформатора, определяется согласно типовому коэффициенту мощности для двухпутных участков ( $\cos\varphi = 0,7$ ) с учетом индуктивного характера потребляемой устройствами СЦБ мощности:

$$\underline{I}_{\text{Н}} = I_{\text{На}} + jI_{\text{Нр}} = I_{\text{НОМ ВН}} \cdot \cos\varphi - jI_{\text{НОМ ВН}} \cdot \sin\varphi = 0,146 - j0,149 \text{ А.} \quad (4)$$

Падение напряжения в трансформаторе составит:

$$\Delta U_{\text{T}} = \underline{I}_{\text{Н}} \cdot \underline{Z}_{\text{T}} = (0,146 - j0,149) \cdot (1152 + j864) = 296,546 - j45,395 \text{ В;} \quad (5)$$

$$|\Delta U_{\text{T}}| = \sqrt{296,546^2 + 45,395^2} = 300 \text{ В.} \quad (6)$$

Более того, при снижении фактического напряжения в точке подключения трансформатора ОМ к линии электропередачи ниже номинального, падение напряжения в трансформаторе дополнительно возрастает.

Для подключения устройств СЦБ к обмотке низкого напряжения (НН) трансформатора ОМ используются низковольтные кабельные вставки длиной от 30 до 300 м [15]. Также в цепь питания аппаратуры сигнальной точки СЦБ последовательно включается обмотка аварийного реле и автоматического предохранителя АВМ, характеризующиеся продольным активным и индуктивным сопротивлениями. Таким образом, в цепи 220 В между обмоткой НН трансформатора и реальными входами приборов потребителей создается дополнительное падение напряжения  $\Delta U_{\text{ЦЕПИ НН}}$  величиной от 2 до 10 В [15].

Величина тока, потребляемого сигнальной точкой СЦБ в максимальном режиме, возникающего при шунтовом режиме работы рельсовых цепей, составляет порядка 5 А [15], что соответствует коэффициенту загрузки трансформатора ОМ-1,25 не менее 0,9. Рассчитаем минимально необходимое напряжение в центре питания ВЛ СЦБ для обеспечения требований ПТЭ железных дорог [5] в точках подключения устройств СЦБ.

Минимальное напряжение на шинах НН трансформатора ОМ:

$$U_{\text{мин НН}} = U_{\text{мин СЦБ}} + \Delta U_{\text{ЦЕПИ НН}} = 198 + 10 = 208 \text{ В.} \quad (7)$$

При приведении напряжения к стороне ВН через номинальный коэффициент трансформации  $n_{\text{T}}$ :

$$U_{\min \text{ ВЛ}} = U_{\min \text{ НН}} \cdot n_{\text{T}} = 208 \cdot \frac{6000}{230} = 5426 \text{ В}; \quad (8)$$

Напряжение в центре питания ВЛ СЦБ с учетом максимального падения напряжения в трансформаторе ОМ:

$$U_{\min \text{ ЦП ВЛ СЦБ}} = U_{\min \text{ ВЛ}} + \Delta U_{\text{T}} = 5426 + 300 = 5726 \text{ В}. \quad (9)$$

Проведенные расчеты показывают, что при номинальном коэффициенте трансформации трансформатора ОМ-1,25 6/0,23 кВ и загрузке его до номинальной мощности, снижение линейного напряжения в центре питания ВЛ СЦБ ниже 5,726 кВ приводит к отклонению напряжения в наиболее удаленной точке подключения устройств СЦБ за пределы нижней границы допустимого диапазона  $198 \text{ В} \leq U_{\text{доп СЦБ}} \leq 242 \text{ В}$ . Выборочный контроль напряжения на рассматриваемой ТПС Нижегородской области показал, что в периоды пиковых суточных нагрузок, ввиду большой присоединенной мощности нетяговых нежелезнодорожных потребителей на стороне НН подстанции и наличии нескольких электроподвижных составов (ЭПС) в межподстанционной зоне, все междуфазные напряжения опускались ниже  $U_{\min \text{ ЦП ВЛ СЦБ}}$ . При этом усредненные действующие значения междуфазных напряжений  $U_{\text{AB}}$  и  $U_{\text{CA}}$  более чем на 100 В ниже рассчитанной минимальной границы.

С целью регулирования напряжения в точках подключения нагрузок СЦБ трансформатор ОМ оснащается устройством переключения без возбуждения (ПБВ). Для переключения ПБВ требуется как минимум отключение трансформатора от сети и выполнение комплекса мероприятий организационного и технического плана, поэтому выбранный номер ответвления должен соответствовать длительному режиму работы. Таким образом, в течение суток коэффициент трансформации остается неизменным, в силу чего встречное регулирование напряжения на трансформаторах ОМ выполнить невозможно. Для повышения минимально необходимого напряжения в центре питания ВЛ СЦБ можно выбрать отпайку обмотки НН трансформатора ОМ  $x \leftrightarrow a5$ , которой соответствует коэффициент трансформации трансформатора 6/0,242 кВ. При этом  $U_{\min \text{ ЦП ВЛ СЦБ}}$  составит 5457 В. Однако такой режим ограничивает верхнюю границу диапазона допустимых напряжений ( $U_{\max \text{ ЦП ВЛ СЦБ}}$ ). При нормальном режиме работы рельсовых цепей потребляемый ток сигнальной точки СЦБ составляет порядка 3 А [15], коэффициент загрузки трансформатора ОМ-1,25 равен 0,55.

Напряжение в центре питания ВЛ СЦБ с учетом падения напряжения в трансформаторе ОМ:

$$\begin{aligned}
 U_{\max \text{ ЦП ВЛ СЦБ}} &= (U_{\max \text{ СЦБ}} + \Delta U_{\text{ЦЕПИ НН}}) \cdot n_{\text{T}} + \Delta U_{\text{T}} = \\
 &= (242 + 2) \cdot \frac{6000}{242} + 0,55 \cdot 300 = 6215 \text{ В.}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

При проведении замеров напряжений в период малых нагрузок электрических сетей и отсутствии ЭПС на плече питания рассматриваемой ТПС, наблюдалось превышение всех трех междуфазных напряжений центра питания ВЛ СЦБ над верхней границей диапазона допустимых напряжений. Выборочный контроль напряжения на ряде других ТПС Нижегородской области, выполненный в период максимальных и минимальных суточных нагрузок, подтвердил полученные результаты. Похожая проблема наблюдается и в точках подключения ВЛ СЦБ на железных дорогах, электрифицированных на постоянном токе [15].

Приведенный анализ показывает, что для выполнения требований по надежности электроснабжения устройств СЦБ на электрифицированных участках дорог необходима разработка новых подходов к обеспечению требуемого уровня напряжения в точках их подключения, основанных как на групповом регулировании напряжения в ВЛ СЦБ, так и на стабилизации напряжения питания конечных нагрузок.

#### **V. Заключение**

Электромагнитное влияние контактной сети на обеспечение надежности электроснабжения устройств СЦБ практически исключается при прокладке ВЛ СЦБ на отдельных опорах с шириной сближения не менее 15 м.

На основе анализа схем электроснабжения тяговых подстанций ГЖД установлено, что для действующих ТПС грузонапряженных линий, за исключением отдельных нетиповых случаев, реализуется подключение к питающей сети с обеспечением требований первой категории надежности.

Выборочный контроль напряжений на ряде ТПС Нижегородской области показал, что в периоды малых суточных нагрузок и в периоды пиковых суточных нагрузок междуфазные напряжения в точках подключения ВЛ СЦБ выходят за границы диапазона допустимых значений, что может привести к изменению режимов работы рельсовых цепей, снижению эффективности функционирования аппаратуры преобразования информации и работоспособности железнодорожных светофоров. Требования встречного регулирования напряжения на трансформаторах ОМ, от вторичных обмоток которых получают питание устройства СЦБ, выполнить невозможно.

Для выполнения требований по надежности электроснабжения устройств СЦБ на электрифицированных участках дорог необходимо предусмотреть дополнительные меры по обеспечению требуемого уровня напряжения в точках их подключения.

Поступила в редакцию 09.07.2024

Принята к публикации 12.08.2024

Received 09.07.2024

Accepted 12.08.2024

### Библиографический список

- [1] ГОСТ Р 53685-2009. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. Введ. 2009-12-15. М.: Стандартинформ, 2010. – 28 с.
- [2] Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. Утв. расп. ОАО «РЖД» № 939р от 17.04.2014 г.
- [3] Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. М.: Транспорт, 1987. – 192 с.
- [4] Вуколов В.Ю. Рациональное определение границ балансовой принадлежности в задаче обеспечения надежности нетяговых сетей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 62-77. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_62
- [5] Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утв. прик. Минтранса России № 250 от 23.06.2022 г.
- [6] СП 226.1326000.2014. Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. Введ. 2014-12-01. М.: 2014. – 83 с.
- [7] СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 86 с.
- [8] ГОСТ Р 57121-2016. Терминалы присоединений интеллектуальные для распределительных устройств тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Технические требования. Введ. 2017-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. – 46 с.
- [9] Правила устройства электроустановок. М.: ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
- [10] Ратнер М.П., Могилевский Е.Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. М.: Транспорт, 1985. – 295 с.
- [11] ЦЭ-4846. Инструкция по категоричности электроприемников нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Введ. 1991-03-11. Отм. 2019-05-22.
- [12] Методические рекомендации для определения категоричности потребителей по надежности электроснабжения. Утв. реш. Электроэнергетического Совета СНГ. Протокол № 55 от 25.10.2019 г.
- [13] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 183 с.
- [14] Вуколов В.Ю. Вопросы обеспечения требуемого уровня напряжения в точках подключения нетяговых потребителей железных дорог // Межд. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения)», Май 31 – Июнь 02, 2023, Иваново, Россия. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 290-293.
- [15] Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Баева И.А., Тарасовский Т.С. Системы электро-снабжения устройств СЦБ. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. – 100 с.

## References

- [1] Electrification and power supply of railways. Terms and Definitions, GOST R 53685-2009, Dec. 2009.
- [2] Instrukciya po tekhnicheskoy ekspluatatsii ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki [Instructions for the technical operation of alarm devices and systems, centralization and blocking]. Approved by Order of JSCo “RZD” no. 939r of April 17, 2014 (in Russian).
- [3] L.A. German, M.I. Veksler and I.A. Shalom, *Ustrojstva i linii ehlektrosnabzheniya avtoblokirovki [Self-locking devices and power supply lines]*. Moscow: Transport, 1987 (in Russian).
- [4] V.Y. Vukolov, “Rational definition of balance affiliation boundary in task of ensuring reliability of non-train power networks”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 62-77, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_62
- [5] Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznyh dorog Rossijskoj Federacii [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation]. Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. 250 of June 23, 2022] (in Russian).
- [6] Power supply of non-traction consumers. Rules for design, construction and reconstruction, SP 226.1326000.2014, Dec. 2014.
- [7] Traction power supply of the railway, SP 224.1326000.2014, Dec. 2014.
- [8] Intellectual feeder terminals for switch-gears of traction substations, transformer substations and linear traction power supply devices of the railway. Technical requirements, GOST R 57121-2016, July 2016.
- [9] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. Moscow: Energoservis, 2007 (in Russian).
- [10] M.P. Ratner and E.L. Mogilevsky, *Ehlektrosnabzhenie netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog [Electricity supply to non-traction railway consumers]*. Moscow: Transport, 1985 (in Russian).
- [11] Instrukciya po kategorijnosti elektropriemnikov netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta [Instructions on the categorization of electrical receivers of non-traction consumers of railway transport], CE-4846, March 1991. Declined: May 2019. (in Russian).
- [12] Metodicheskie rekomendacii dlya opredeleniya kategorijnosti potrebitelej po nadezhnosti ehlektrosnabzheniya [Guidelines for determining the categorization of consumers in terms of power supply reliability]. Approved by Decision of the CIS Electric Power Council, protocol no. 55 of October 25, 2019 (in Russian).
- [13] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, I.A. Lyubchenko and A.V. Cherepanov, *Uluchshenie kachestva ehlektroenergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog [Improving the quality of electricity in the power supply systems of non-traction railway consumers]*. Moscow-Berlin: Direct-Media, 2020 (in Russian).
- [14] V.Y. Vukolov, “Issues of ensuring the required voltage level at the connection points of non-train power consumers of railways”, in proc. *Int. scientific-practical conf. “State and prospects for the development of electrical and thermal technology (XXII Benardos Readings)”*, May 31 – June 02, 2023, Ivanovo, Russia, pp. 290-293.

- [15] B.A. Arzhannikov, B.S. Sergeev, I.A. Baeva and T.S. Tarasovsky, *Sistemy elektros-nabzheniya ustrojstv SCB [Power supply systems for signaling, centralization and interlocking devices]*. Yekaterinburg: UrGUPS, 2016 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Вуколов Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Vladimir Yu. Vukolov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 504.3.054

EDN SGBPWP

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

**О.В. Маслеева**

ORCID: 0000-0001-6535-2275 e-mail: ovm1552@yandex.ru

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

ORCID: 0000-0002-9145-2453 e-mail: kryukov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Я.И. Петухов**

ORCID: 0000-0001-6343-0655 e-mail: petukhov.iai@nntu.ru

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

Рассмотрены вопросы энергетического и экологического сравнения различных видов городского транспорта при их эксплуатации. Приведены результаты расчетов удельных показателей потребления электроэнергии, выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и эмиссии парниковых газов для транспортных средств с бензиновыми и электрическими силовыми установками. Установлено, что при производстве электроэнергии для электромобилей удельная масса выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов выше. При планировании развития городской транспортной системы, кроме экономических аспектов, необходимо учитывать возрастающую экологическую нагрузку на окружающую среду со стороны автотранспорта и электротранспорта за счет возрастания потребления электроэнергии и источников ее производящих.

**Ключевые слова:** энергетическая оценка, экологичность, выбросы вредных веществ, городской транспорт, электрический транспорт.

**Для цитирования:** Маслеева О.В., Крюков Е.В., Петухов Я.И. Энергетическая и экологическая оценка городского транспорта // Интеллектуальная Электро-техника. 2024. № 3. С. 100-115. EDN SGBPWP

## ENERGY AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF URBAN TRANSPORT

**O.V. Masleeva**

ORCID: **0000-0001-6535-2275** e-mail: **ovm1552@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**E.V. Kryukov**

ORCID: **0000-0002-9145-2453** e-mail: **kryukov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Y.I. Petukhov**

ORCID: **0000-0001-6343-0655** e-mail: **petukhov.iai@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article discusses the issues of energy and environmental comparison of various types of urban transport in their operation. The results of calculations of electricity consumption, as well as specific emissions of pollutants and greenhouse gas emissions from electric vehicles and mileage emissions for vehicles with an internal combustion engine are presented. It has been established that the reduced specific mass of emissions of pollutants and greenhouse gases is higher in the production of electricity for the movement of electric vehicles. When planning the development of the urban transport system, in addition to the economic side, it is necessary to take into account the increasing environmental burden on the environment from both motor transport and electric transport due to increased consumption of electricity and sources producing it.

**Keywords:** energy assessment, environmental friendliness, emissions of harmful substances, urban transport, electric transport.

**For citation:** O.V. Masleeva, E.V. Kryukov and Y.I. Petukhov, “Energy and environmental assessment of urban transport”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 100-115, 2024. EDN SGBPWP

### I. Введение

В соответствии с *Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года* [1], одним из ключевых факторов динамики экономического роста страны является развитие транспортного комплекса. Предусмотрено усиление внимания государства к формированию и реализации экологической транспортной политики, в соответствии с которой экологические параметры станут не ограничителем развития транспорта, а его движущим фактором.

В последние годы наблюдается тенденция перехода на электрический вид транспорт – электробус. Однако стремительное развитие электрического транспорта способствует увеличению электропотребления и необходимостью создания инфраструктуры зарядных станций в городах.

Кроме того, основным источником загрязнения атмосферы в городах является автомобильный транспорт, на долю которого приходится около 40 % вредных веществ и 18,5 % глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, из которых 44 % приходится на пассажирские транспортные средства. Увеличение количества городского транспорта оказывает негативное влияние на экологическую обстановку в городе, так как растут выбросы углекислого газа [2, 3]. Высокая концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе оказывает негативное влияние на здоровье населения.

В настоящее время транспортная система крупных городов состоит из следующих видов транспорта: автобусы, электробусы, троллейбусы, трамваи, автомобили и электромобили.

Автобус является самым востребованным видом городского пассажирского транспорта [4]. Основные преимущества бензиновых автобусов и автомобилей: широкая доступность и надежность силовой установки, малое время заправки топливом, а также уже существующая развитая инфраструктура. Однако у бензиновых транспортных средств есть и недостатки: выхлопные газы процесса сжигания топлива, высокая стоимость топлива. Эти газы являются продуктами неполного сгорания углеводородного топлива и образуют парниковые газы и другие загрязняющие атмосферу вещества [5]. В результате повышается допустимая концентрация в воздухе токсических веществ и канцерогенов, что представляет угрозу для здоровья людей и животных. Кроме того, автотранспорт выбрасывает в окружающую среду частицы автомобильных покрышек, дорожного покрытия и продукты износа механических частей, что также негативно влияет на экологическую обстановку. Помимо самих автобусов, загрязнение окружающей среды происходит и на станциях технического обслуживания транспорта, автозаправочных станциях и т.д.

Одним из направлений снижения выбросов вредных веществ и углекислого газа является переход на экологически чистый городской транспорт: троллейбусы, трамваи, электробусы и электромобили, которые используются в такси. Основное достоинство троллейбусов и трамваев перед бензиновыми автобусами и автомобилями – отсутствие пробеговых выбросов вредных веществ в процессе эксплуатации [6, 7]. Трамваи являются очень надежными видами транспорта, так как они следуют по фиксированным маршрутам и не зависят от пробок или погодных условий. Еще одно преимущество – высокая грузоподъемность, которая может быть использована для перевозки тяжелых грузов по городу. К основным недостаткам

трамваев относятся: высокая стоимость производства (для создания вагонов необходимо большое количество стали), сложность создания необходимой инфраструктуры [8], низкая маневренность, а также негативное влияние трамвайных путей на пропускную способность другого типа транспорта. Преимущества троллейбусов – большая маневренность по сравнению с трамваями, низкий уровень шума, простота обслуживания; к недостаткам относятся сложность создания контактной сети и тяговых подстанций.

Наиболее перспективными видами городского транспорта являются электробусы и электромобили, которые активно приходят на замену бензиновым транспортным средствам. Электробусы работают на электрической тяге, что делает их более экологически чистым видом транспорта, чем автобусы с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) [9]. Они не выбрасывают в атмосферу вредные вещества и парниковые газы. Также электробусы требуют меньше обслуживания и ремонта по сравнению с автобусами с ДВС, так как у них нет бензинового двигателя и сложной топливной системы. Однако у электротранспорта присутствуют выбросы твердых частиц, которые образуются из-за износа шин, тормозов и других механических деталей, стирания дорожного полотна не зависят от вида двигателя и будут в наличии всегда. Кроме специальной инфраструктуры зарядных станций, электробусы и электромобили обладают еще одним существенным недостатком – ограниченным запасом хода. Для обеспечения высокой маневренности используют накопитель энергии – тяговый аккумулятор, емкость которого ограничена. К тому же необходимо наличие больших свободных электрических мощностей, расположенных по всему городу в большом количестве [10, 11].

## **II. Задачи исследования**

Актуальность темы расширения электрификации городского транспорта обусловлена возрастающими отрицательными экологическими последствиями использования автомобилей с ДВС, ограниченностью нефтяных ресурсов и возрастающей себестоимостью их добычи.

Целью исследования является проведение энергетического и экологического сравнения различных видов городского транспорта с точки зрения развития электроэнергетики городов и загрязнения воздуха вредными веществами и парниковыми газами в процессе эксплуатации.

В качестве объектов исследования выбраны городские автобусы, троллейбусы, трамваи, электробусы, а также автомобили с ДВС и электродвигателями.

## **III. Энергопотребление**

Потребление топлива в автомобилях с ДВС зависит от множества факторов: единичная мощность силовой установки на массу транспортного средства, тип и качество топлива, аэродинамики и прочих факторов. Нормы

расхода топлива транспортным средством представляется производителем. Потребление электроэнергии электромобилем зависит от мощности электродвигателя, массы транспортного средства, состояния тягового аккумулятора, условий эксплуатации.

Удельный расход электроэнергии (Вт·ч/км) для электрических транспортных средств указывается в технических характеристиках. При расчете генерации электроэнергии на электростанциях были учтены следующие факторы: потери электроэнергии при передаче (8,4 %) и при заряде электромобиля (15 %), а также потребление электроэнергии на собственные нужды электростанции (15 %). Нормы удельного расхода электроэнергии для трамваев и троллейбусов [12] учитывают затраты на движение транспортного средства, а также потери в электроэнергии в тяговых сетях транспорта, которые составляют 7 %.

В Российской Федерации основным типом объектов генерации в городах и областях являются тепловые электростанции (ТЭС). Топливом для ТЭС является газ (~74 %), уголь (~25 %) и прочие энергоносители (~1 %). Также при расчете необходимо учитывать КПД тепловых электростанций, который составляет примерно 35 %.

Исследования проводились для автомобиля и электромобиля с мощностью двигателя 110 кВт, автобуса мощностью 185 кВт, электробуса с суммарной мощностью электродвигателей 250 кВт, четырехосного трамвайного вагона с мощностью электродвигателя 200 кВт и троллейбус с мощностью 230 кВт. Сравнение энергопотребления (удельное потребление топлива / электроэнергии) различных транспортных средств проведено в МДж (табл. 1, рис. 1).

Под удельным потреблением электроэнергии подразумевается потребление электродвигателем на 1 км пути. Удельное производство электроэнергии (ЭЭ) – это производство электроэнергии на электростанциях (с учетом различных видов потерь), которая используется для заряда тягового аккумулятора. Удельное потребление энергии – энергия топлива для электростанций. Под удельным потреблением топлива подразумевается потребление топлива автомобилем с ДВС на 1 км пройденного пути.

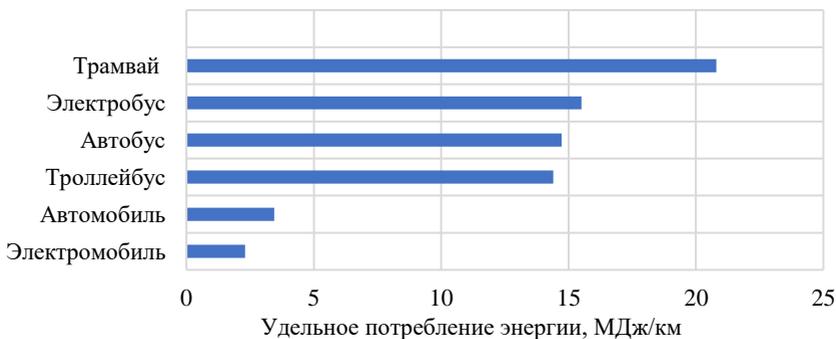
У автомобиля и электромобиля наименьшее удельное потребление энергии, так как они относятся к личным транспортным средствам и совершают наименьшее количество остановок на пути следования. Потребление энергии у автомобиля с ДВС выше, чем у электромобиля. У автомобилей первичным энергоносителем является бензин, а у ТЭС в качестве топлива используется газ. Кроме того, КПД ДВС составляет 25 %, а ТЭС 35 %.

Энергопотребление автобуса, троллейбуса и электробуса отличается не значительно. У трамвая это величина значительно выше, поскольку его масса составляет 20-40 т.

**Таблица 1.**  
**Удельное потребление энергии транспортными средствами**

**Table 1.**  
**Specific energy consumption by vehicles**

Тип электротранспорта	Удельный расход электроэнергии, Вт·ч/км	Удельное потребление топлива, г/км	Удельное производство ЭЭ с учетом потерь, Вт·ч/км	Удельное потребление энергии, МДж/км
Электромобиль	280	–	423	2,3
Электробус	1850	–	2795	15,5
Трамвай	2717	–	3800	20,8
Троллейбус	1881	–	2631	14,4
Автомобиль	–	75	–	3,45
Автобус	–	345	–	14,73



**Рис. 1. Удельное потребление энергии транспортными средствами**

**Fig. 1. Specific energy consumption by vehicles**

В соответствии с *Концепцией по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года*, планируется ввести в эксплуатацию не менее 25000 электротранспортных средств.

По состоянию на 2023 г., в Нижегородской области насчитывают около 120 электробусов и 280 электротакси (из 877). До конца 2024 г. планируют ввести в эксплуатацию около 30 электробусов. С учетом годового пробега и удельного потребления ЭЭ определим суммарное годовое потребление ЭЭ электробусами и электротакси, которое составляет 41611 МВт·ч. Установленная мощность электростанций энергосистемы Нижегородской области составляет 2739,6 МВт. Годовое потребление за 2023 г. составляет

20 229 тыс. МВт·ч. Величина потребления электрической энергии по энергосистеме Нижегородской области оценивается в 2029 г. в объеме 23 409 тыс. МВт·ч при установленной мощности потребления 3659 МВт.

Таким образом, в Нижегородской области наблюдается тенденция увеличения установленной мощности и потребления электрической энергии. При вводе в эксплуатацию новых электробусов и электромобилей увеличится мощность потребителей электроэнергии.

В результате внедрения электрического городского транспорта существенно возрастает электрическая нагрузка на городские сети. При этом, стоит рассматривать синергию возобновляемых источников энергии и электрического транспорта. В городах, где уже существуют объекты альтернативной энергетики (Республика Крым, Ставропольский край, Ростовская область и т.д.), возможно обеспечивать электрических транспорт экологически чистой электроэнергией.

Еще одной ключевой проблемой стремительного развития электрического городского транспорта является наличие специальной инфраструктуры с зарядными станциями, для питания которых при увеличении нагрузки необходимо увеличение мощности трансформаторных подстанций и развитие электрических сетей.

Для автобусных парков, где будут использоваться электробусы, требуются дополнительные мощности, что повлечет за собой увеличение мощности трансформаторов, сечения питающих кабелей. При этом возможно увеличение пиковой нагрузки в часы, когда электробусы массово возвращаются и встают на зарядку.

#### IV. Выбросы вредных веществ

Оценка экологического воздействия городского транспорта выполняется на основе удельных показателей на 1 км пробега. Исходя из статистической информации и справочной литературы, были определены нормы удельных выбросов вредных веществ. Содержание вредных веществ и их количество в выхлопных газах бензиновых транспортных средств зависит от вида топлива, скорости движения и типа транспорта [13].

Значение выбросов  $i$ -го загрязняющего вещества  $M_L$  от движущегося автотранспортного потока на автодороге с фиксированной протяженностью  $L$  (км) определяется по формуле:

$$M_L = M_i^L \cdot \sum_1^n (L_n \cdot r_v), \quad (1)$$

где  $M_i^L$  – удельный пробеговый выброс  $i$ -го вредного вещества (табл. 1), г/км;  $L_n$  – протяженность  $n$ -го участка автодороги, км;  $r_v$  – поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент, учитывающий зависимость изменения количества выбрасываемых загрязняющих веществ от средней скорости движения, составляет: для автомобилей и автобусов  $r_{Vi} = 1$ , для оксидов азота  $r_{Vi} = 1$ , для остальных вредных веществ  $r_{Vi} = 2$ . Также при расчете удельных выбросов вредных веществ учитываются показатели относительной агрессивности веществ.

Исходя из удельных пробеговых выбросов автомобиля и автобуса ( $M^i$ , г/км), с учетом показателей относительной агрессивности ( $A_i$ ) были рассчитаны приведенные удельные выбросы ( $M_{пр}$ , г/км) и суммарные приведенные удельные выбросы. Результаты расчета приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
Удельные пробеговые выбросы загрязняющих веществ  
автомобиля и автобуса

**Table 2.**  
Specific mileage emissions of pollutants from a car and autobus

Загрязняющие вещества	Удельные пробеговые выбросы автомобиля $M^i$ , г/км	Удельные пробеговые выбросы автобуса $M^i$ , г/км	Показатель относительной агрессивности, $A_i$	Относительные удельные выбросы автомобиля, г/км	Относительные удельные выбросы автобуса, г/км
CO	0,8	3,6	1	0,80	4,32
NO <sub>2</sub>	0,3	4,3	43	12,90	184,90
CH	0,24	0,4	0,3	0,07	0,14
Сажа	0,005	0,14	19	0,10	3,19
SO <sub>2</sub>	0,006	0,02	16	0,10	0,38
Формальдегид	0,0014	0,002	240	0,34	0,58
Бензапирен	0,00000016	0,00000018	502973	0,08	0,11
Всего				14,38	193,62

У электрического транспорта отсутствуют пробеговые выбросы вредных веществ, так как нет процесса сжигания топлива при движении. Однако, вредные вещества образуются при производстве ЭЭ на ТЭС: оксиды углерода, азота, серы и сажа. Удельные выбросы вредных веществ при производстве электроэнергии были выбраны в соответствии с [14].

Результаты расчета относительных удельных выбросов при выработке электроэнергии (г/кВт·ч) на ТЭС приведены в табл. 3.

**Таблица 3.**  
**Выбросы загрязняющих веществ при выработке электроэнергии**

**Table 3.**  
**Emissions of pollutants from electricity generation**

Загрязняющие вещества	Удельный выброс вредных веществ при выработке электроэнергии, г/кВт·ч	Показатель относительной агрессивности, $A_i$	Относительные удельные выбросы при выработке ЭЭ, г/кВт·ч
CO	0,0043	1	0,0043
NO <sub>x</sub>	1,13	43	48,59
SO <sub>2</sub>	2,85	16	45,60
Сажа	0,11	19	2,09
Всего			96,28

Относительные удельные выбросы при выработке электроэнергии на ТЭС составляют 96,28 г/кВт·ч. Удельный расход ЭЭ определен с учетом всех электрических потерь. Результаты расчета приведены в табл. 4.

**Таблица 4.**  
**Удельные выбросы загрязняющих веществ при производстве электроэнергии**

**Table 4.**  
**Specific emissions of pollutants in the production of electricity**

Тип электро-транспорта	Удельный расход электроэнергии, Вт·ч/км	Производство электроэнергии, Вт·ч/км	Относительные удельные выбросы, г/км
Электромобиль	280	423	41
Электробус	1850	2795	269
Трамвай	2550	3800	366
Троллейбус	1600	2631	253

Автомобили с ДВС выбрасывают меньше загрязняющих веществ по сравнению с электромобилями. Это связано с особенностями процессов сгорания топлива и конструкциями систем очистки продуктов сгорания.

С одной стороны, развитие электрического автотранспорта способствует снижению негативного воздействия на человека и окружающую среду, с другой — возрастает потребление электроэнергии, что влечет за собой увеличение выбросов загрязняющих веществ. Однако надо учитывать, что выбросы транспорта происходят в атмосферный воздух на территории всех городов, а выбросы ТЭС — в месте их расположения. Следует также учитывать, что ряд крупных ТЭС расположен в городах с высоким уровнем

загрязнения воздуха (Братск, Красноярск, Магнитогорск, Нижний Тагил, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец, Чита).

#### У. Эмиссия парниковых газов

Процесс сжигания топлива сопровождается образованием парниковых газов, удельные выбросы которых зависят от вида топлива. Дополнительным технологическим фактором является расширение использования парогазовых энергоблоков на российских ТЭС [15].

Расчет эмиссии парниковых газов при сжигании топлива для автомобиля выполнен в соответствии с [16]. Расчет выбросов  $\text{CO}_2$  для автомобильного транспорта осуществляется на основе данных о расходе топлива за отчетный период и коэффициентах выбросов. Удельные выбросы парниковых газов для автомобиля и автобуса были рассчитаны с учетом расхода топлива (г/км) и коэффициентах выбросов для бензина и дизельного топлива. Результаты расчета приведены в табл. 5.

*Таблица 5.*

**Удельные выбросы парниковых газов при эксплуатации автомобиля и автобуса**

*Table 5.*

**Specific greenhouse gas emissions from car and autobus operation**

Тип транспорта	Расход топлива, г/км	Удельные выбросы углекислого газа на грамм топлива, г $\text{CO}_2$ /г	Удельные выбросы углекислого газа на км, г $\text{CO}_2$ /км
Автомобиль	75	3,03	227
Автобус	345	3,15	1087

Удельные выбросы парниковых газов при производстве электроэнергии для электротранспорта рассчитаны с учетом коэффициента выбросов, который составляет 0,449 г  $\text{CO}_2$ /Вт·ч. Результаты расчета приведены в табл. 6.

*Таблица 6.*

**Удельные выбросы парниковых газов при производстве электроэнергии**

*Table 6.*

**Specific greenhouse gas emissions from electricity generation**

Тип электротранспорта	Удельное потребление ЭЭ, Вт·ч/км	Удельные выбросы углекислого газа при производстве ЭЭ, г $\text{CO}_2$ /Вт·ч	Удельные пробеговые выбросы углекислого газа, г $\text{CO}_2$ /км
Электромобиль	423	0,449	190
Электробус	2795	0,449	1255
Трамвай	3800	0,449	1706
Троллейбус	2631	0,449	1181

Эмиссия парниковых газов у автомобиля с ДВС в процессе эксплуатации немного выше, чем у электромобиля, за счет горения топлива в ДВС. Автобус и троллейбус имеют практически одинаковые выбросы парниковых газов.

Итоговые результаты расчета удельных приведенных выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов приведены в табл. 7 и на рис. 2.

Таблица 7.

Удельные приведенные выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов

Table 7.

Specific reduced emissions of pollutants and greenhouse gases

Тип транспорта	Выбросы вредных веществ, г/км	Выбросы парниковых газов, г/км
Автомобиль	14	227
Автобус	194	1087
Электромобиль	41	190
Электробус	269	1255
Трамвай	366	1706
Троллейбус	253	1181



Рис. 2. Результаты расчета удельных выбросов:  
а – вредных веществ; б – парниковых газов

Fig. 2. Results of calculation of specific emissions:  
harmful substances (a); greenhouse gases (b)

## VI. Заключение

В результате проведенной энергетической оценки установлено, что электробусы и троллейбусы потребляют примерно равное количество электроэнергии. Удельное потребление электроэнергии у трамвая в 1,4 раза больше, так как масса трамвая гораздо больше, чем у колесных транспортных средств.

При стремительном развитии электробусов и электрического городского транспорта в целом будет наблюдаться резкое увеличение потребления электроэнергии, что приведет к необходимости модернизации существующих систем электроснабжения и создания дополнительной инфраструктуры для электрического транспорта.

Проведенная экологическая оценка дает возможность в полной мере рассматривать влияние на атмосферный воздух городского транспорта с различными двигателями и источниками энергии и оценить программы дальнейшего развития электротранспорта в крупных городах.

Приведенная масса выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов выше при производстве электроэнергии для электрических транспортных средств, чем при движении автомобиля с ДВС за счет различных электрических потерь.

Выбросы вредных веществ при эксплуатации электромобиля в 3 раза больше, чем у автомобиля с ДВС за счет сжигания большего количества первичного энергоносителя на электростанциях. Однако выбросы вредных веществ автомобилями с ДВС происходят в атмосферный воздух городов.

Эмиссия парниковых газов у автомобиля с ДВС в процессе эксплуатации больше за счет более высоко образования парниковых газов при горении топлива у двигателей внутреннего сгорания.

Выбросы загрязняющих веществ и эмиссия парниковых газов у автобуса и троллейбуса имеют практические одинаковый уровень.

Полученные энергетические и экологические данные могут быть использованы при принятии решений по улучшению экологической обстановки для улучшения качества жизни и здоровья населения, снижению расхода электроэнергии и потребления органического топлива.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для стратегического планирования экологической обстановки в городах с учетом выбранных видов городского транспорта.

© Маслеева О.В., 2024

© Крюков Е.В., 2024

© Петухов Я.И., 2024

*Поступила в редакцию 09.08.2024*

*Принята к публикации 03.09.2024*

*Received 09.08.2024*

*Accepted 03.09.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года»

- // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112030006> (дата обращения 27.07.2024).
- [2] Орлов П.С., Соцкая И.М. Электротехнологии, охрана труда и транспорт // Вестник АПК Верхневолжья. 2020. № 4 (52). С. 80-85. DOI: 10.35694/YARCX.2020.52.4.016
- [3] Кучук В.С., Афанасьев А.Н., Дубровина А.В. Городской автобус: Уменьшение токсичности ОГ и экономичность ДВС // III Межд. науч.-практ. конф. «Научный потенциал молодежи и технический прогресс», Май 15, 2020, Санкт-Петербург, Россия. С.-Пб.: ИП Жукова Елена Валерьевна, 2020. С. 49-50. DOI: 10.26160/2618-7493-2020-3-49-50
- [4] Климович А.М., Булычев В.В. История развития автобусов в СССР и России // 4-я Межд. науч.-тех. конф. «Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее», Май 20, 2022, Курск, Россия. Курск: ЮЗГУ, 2022. С. 73-75.
- [5] Elagouz N., Onat N., Kucukvar M. Environmental, economic, and social life cycle impacts of alternative fuel buses: the case for Qatar // 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE), Oct. 21-23, 2021, Istanbul, Turkey: IEEE, 2021. P. 92-97. DOI: 10.1109/ICPSE53473.2021.9656863
- [6] Бешенцев И.Д. Ленинградский трамвай: становление и процветание // VI межд. науч. конф. «Гуманитарные науки в современном вузе: вчера, сегодня, завтра», Декабрь 15, 2023, Санкт-Петербург, Россия. С.-Пб.: СПбГУПТД, 2023. Т. 2. С. 195-204.
- [7] Falvo M.C., Lamedica R., Ruvio. A. An environmental sustainable transport system: A trolley-buses line for Cosenza city // International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Jun. 20-22, 2012, Sorrento, Italy: IEEE, 2012. P. 1479-1485. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264625
- [8] Mwambeleko J.J., Kulworawanichpong T., Greyson K.A. Tram and trolleybus net traction energy consumption comparison // 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Jun. 24-27, 2015, Hua Hin, Thailand: IEEE, 2015. P. 1-5. DOI: 10.1109/ECTICon.2015.7206932
- [9] Тебекин М.Д. Перспективы использования электробусов в качестве городского общественного транспорта // VI Межд. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и инновации на транспорте», Май 20, 2020, Орел, Россия. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2020. С. 262-269.
- [10] Chun-lin G., Li W., Dan W., Wen-bo Q., Xiang-ning X. Impact of electric vehicle charging on power grid // 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Sep. 16-18, 2011, Yichang: IEEE, 2011. P. 2270-2274. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057167
- [11] Bunzel A., Baker B. Energy consumption of electric city buses: Determination as a part of a technological and economic evaluation of bus lines with regards to their electrifiability // 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nov. 07-09, 2018, Nottingham, UK: IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607520

- [12] Распоряжение Министерства транспорта РФ от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р «О введении в действие методических рекомендаций по расчету экономической обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования» // Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/3250> (дата обращения 23.06.2024).
- [13] Приказ Минприроды России от 27.11.2019 г. № 804 «Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912260052> (дата обращения 23.06.2024).
- [14] ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Введ. 2018-07-01. М.: Бюро НДТ, 2017. – 280 с.
- [15] Гимади В. [и др.]. Углеродоемкость электроэнергии в мире и России // Энергетический бюллетень. 2019. № 72. [Электронный ресурс]. URL: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/22245.pdf> (дата обращения 27.07.2024).
- [16] Приказ Минприроды России от 30.06.2015 № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201512170023> (дата обращения 23.06.2024).

### References

- [1] Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 no. 3363-р “Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112030006> [Accessed: July 27, 2024] (in Russian).
- [2] P.S. Orlov and I.M. Sotskaya, “Electrotechnics, occupational safety and transport”, *Herald of Agroindustrial Complex of Upper Volga Region*, vol. 4, no. 52, pp. 80-85, 2020. DOI: 10.35694/YARCX.2020.52.4.016
- [3] V.S. Kuchuk, A.N. Afanasiev and A.V. Dubrovina, “City bus: Reduction of exhaust gas toxicity and efficiency internal combustion engines”, in proc. *III International scientific-practical conference “Nauchnyj potencial molodezhi i tekhnicheskij progress [Scientific potential of youth and technical progress]”*, May 15, 2020, St. Petersburg, Russia, pp. 49-50 (in Russian). DOI: 10.26160/2618-7493-2020-3-49-50
- [4] A.M. Klimovich and V.V. Bulychev, “Istoriya razvitiya avtobusov v SSSR i Rossii [The history of bus development in the USSR and Russia]”, in proc. *4th International scientific-technical conference “Avtomobili, transportnye sistemy i processy: nastoyashchee, proshloe i budushchee [“Cars, transport systems and processes: present, past and future]”*, May 20, 2022, Kursk, Russia, pp. 73-75 (in Russian).

- [5] N. Elagouz, N. Onat and M. Kucukvar, “Environmental, economic, and social life cycle impacts of alternative fuel buses: the case for Qatar”, in proc. *2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE)*, Oct. 21-23, 2021, Istanbul, Turkey, pp. 92-97. DOI: 10.1109/ICPSE53473.2021.9656863
- [6] I.D. Beshentsev, “Leningrad tram: formation and prosperity”, in proc. *VI International scientific conference “Gumanitarnye nauki v sovremennom vuze: vchera, segodnya, zavtra [Humanities in a modern university: yesterday, today, tomorrow]”*, Dec. 15, 2023, St. Peterburg, Russia, vol. 2, pp. 195-204 (in Russian).
- [7] M.C. Falvo, R. Lamedica and A. Ruvio, “An environmental sustainable transport system: A trolley-buses line for Cosenza city”, in proc. *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Jun. 20-22, 2012, Sorrento, Italy, pp. 1479-1485. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264625
- [8] J.J. Mwambeleko, T. Kulworawanichpong and K.A. Greyson, “Tram and trolleybus net traction energy consumption comparison”, in proc. *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Jun. 24-27, 2015, Hua Hin, Thailand, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ECTICon.2015.7206932
- [9] M.D. Tebekin, “Prospects for using electric buses as urban public transport”, in proc. *VI International scientific-practical conference “Informatsionnyye tekhnologii i innovatsii na transporte [Information technologies and innovations in transport]”*, May 20, 2020, Orel, Russia, pp. 262-269 (in Russian).
- [10] G. Chun-lin, W. Li, W. Dan, Q. Wen-bo and X. Xiang-ning, “Impact of electric vehicle charging on power grid”, in proc. *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Sep. 16-18, 2011, Yichang, pp. 2270-2274. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057167
- [11] A. Bunzel and B. Baker, “Energy consumption of electric city buses: Determination as a part of a technological and economic evaluation of bus lines with regards to their electrifiability”, in proc. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nov. 07-09, 2018, Nottingham, UK, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607520
- [12] Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 18, 2013 No. NA-37-r “O vvedenii v deystviye metodicheskikh rekomendatsiy po raschetu ekonomicheskoi obosnovannoy stoimosti perevozki passazhirov i bagazha v gorodskom i prigo-rodnom soobshchenii avtomobilnym i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom obshchego polzovaniya [On the introduction of methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and baggage in urban and suburban traffic by automobile and urban ground electric public transport], *Official Internet resource of the Ministry of Transport of the Russian Federation*. [Online]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/3250> [Accessed: June 23, 2024] (in Russian).
- [13] Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated November 27, 2019 No. 804 “Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferyj vozduh ot peredvizhnyh istochnikov dlya provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosferno

- vozduha» [On approval of the methodology for determining emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile sources for conducting consolidated calculations of atmospheric air pollution]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912260052> [Accessed: June 23, 2024] (in Russian).
- [14] Fuel combustion on large plants for production of energy, ITS 38-2017, July 2018.
- [15] V. Gimadi et al., “Uglerodoemkost' elektroenergii v mire i Rossii [Carbon intensity of electricity in the world and in Russia]”, *Energeticheskij byulleten' [Energy Bulletin]*, no. 72, 2019. [Online]. Available at: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/22245.pdf> [Accessed: July 27, 2024] (in Russian).
- [16] Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated June 30, 2015 No. 300 “Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob"ema vybrosov parnikovyykh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi hozyajstvennyuyu i inuyu deyatel'nost' v Rossijskoj Federatsii [On approval of methodological guidelines and guidance for the quantitative determination of the volume of greenhouse gas emissions by organizations carrying out economic and other activities in the Russian Federation]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201512170023> [Accessed: June 23, 2024] (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Маслеева Ольга Владимировна**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Olga V. Masleeva**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Крюков Евгений Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Evgeny V. Kryukov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Петухов Ярослав Игоревич**, магистр Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Yaroslav I. Petukhov**, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.03.07

EDN QWZTHU

## МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К «ЗЕЛеноЙ» ЭНЕРГЕТИКЕ

**Е.А. Кумагина**

ORCID: 0000-0002-5199-8814 e-mail: elena.kumagina@itmm.unn.ru  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.С. Плехов**

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: aplehov@mail.ru  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

В настоящее время мировая экономика осуществляет энергопереход – изменяется топливно-энергетический баланс, снижается использование ископаемого топлива в электроэнергетике в пользу низкоуглеродных и безуглеродных источников энергии. Однако вопрос о целесообразности использования возобновляемых источников энергии в энергосистемах неразрывно связан с вопросом обеспечения надежного электроснабжения потребителя. Риски нарушения электроснабжения чаще всего вызваны климатическими условиями. При переходе на «зеленую» энергетику данные вопросы должны быть решены. Статья посвящена постановке и решению проектных задач снижения данных рисков. Разработана математическая модель оценки структуры комплексной системы электрогенерации при использовании возобновляемых источников энергии. Посредством целевой функции модели минимизируется дисперсия климатических показателей. Приведены результаты расчетных экспериментов.

**Ключевые слова:** альтернативные источники энергии, потенциальные риски, комплексная система ВИЭ, целевая функция, математическая модель расчета рисков.

**Для цитирования:** Кумагина Е.А., Плехов А.С. Минимизация рисков нарушений электроснабжения при переходе к «зеленой» энергетике // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 116-129. EDN QWZTHU

# ELECTRIC SUPPLY DISRUPTIONS RISK MINIMIZATION DURING THE TRANSITION TO GREEN ENERGY

**E.A. Kumagina**

ORCID: **0000-0002-5199-8814** e-mail: **elena.kumagina@itmm.unn.ru**  
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Plekhov**

ORCID: **0000-0002-6954-3295** e-mail: **aplehov@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Currently, the world economy is undergoing an energy transition – the fuel and energy balance is changing, the use of fossil fuels in the electric power industry is decreasing in favor of low-carbon and carbon-free energy sources. However, the question of the feasibility of using renewable energy sources in energy systems is inextricably linked with the issue of ensuring reliable electricity supply to consumers. The risks of power outages are most often caused by climatic conditions. These situations must be prevented during the transition to green energy. This article is devoted to setting and solving design problems to reduce these risks. A mathematical model for assessing the structure of an integrated power generation system using renewable energy sources has been developed. The model's objective function minimizes the dispersion of climate indicators. The results of computational experiments are presented.

**Key words:** alternative energy sources, potential risks, integrated renewable energy system, objective function, mathematical model for calculating risks.

**For citation:** E.A. Kumagina and A.S. Plekhov, “Electric supply disruptions risk minimization during the transition to green energy”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 116-129, 2024. EDN QWZTHU

## I. Введение

Генерация электроэнергии возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) с каждым годом обретает все большую значимость в мировой энергетике [1]. При этом экономические и экологические предпосылки развития «зеленой» электроэнергетики сталкиваются с рисками неэффективной работы выбранных источников, которые необходимо заранее выявить, рассчитать, применяя обоснованные математические методы оценки [2-4].

Для ветроэнергетики характерны большая стоимость проектирования (из-за необходимости привязки к местности), большая вероятность изменения параметров ветра, дороговизна ремонтных работ, необходимость

прокладывания кабеля через море для шельфовых ветроэлектростанций с использованием при этом вставки постоянного тока для недопущения загрузки кабеля зарядной мощностью; все эти характеристики приводят к длительным срокам окупаемости. Для малой гидроэнергетики характерны сезонная изменчивость потока воды, возможность промерзания русла и наводнений, а также недостоверные данные о гидроресурсах [5].

Эффективность солнечных электростанций ограничена метеоусловиями [6], сложностью поиска и устранения технологических нарушений, дороговизной сопутствующего преобразовательного оборудования.

Возможность применения ВИЭ может быть обеспечена комплексным подходом к модернизации (диверсификации) системы электрогенерации и электроснабжения, обеспечением возможности быстрого включения резервных источников питания, таких как дизель- или аккумуляторно-инверторные электростанции [7].

## **II. Диверсификация источников электрогенерации**

В качестве объекта анализа рассмотрим предлагаемую к реализации комплексную электроэнергетическую систему Якутии, в качестве меры риска нарушения электроснабжения в долгосрочном применении ВИЭ прием дисперсию себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии [8]. Если каждый источник электрогенерации в проектируемой системе ВИЭ характеризуется некоторой дисперсией себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии, себестоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии от комплексной системы ВИЭ имеет дисперсию, определяемую ее составом. Суммарную дисперсию надежности электроснабжения минимизируем, меняя состав проектируемой системы ВИЭ.

Проведем вычислительный эксперимент и установим оптимальное распределение электростанций в определенном регионе России на примере Республики Саха (Якутия). Данный регион имеет автономное энергоснабжение, основанное на ДЭС. Средняя стоимость выработки электроэнергии с помощью ДЭС в данном регионе составляет 80-120 руб. за кВт·ч [9, 10]. Данный регион весьма удален от основных регионов России, поэтому значительно уменьшить стоимость традиционных источников энергии в данной местности нельзя. Именно поэтому данный регион является достаточно перспективным для внедрения ВИЭ [10].

При оценке возможности строительства ветроэлектростанций необходимо учитывать достаточно низкую среднюю скорость ветра (2 м/с) на территории Якутии. Исторический максимум этой скорости (8 м/с) фиксировался только в 1988 г. Установка ВЭС целесообразна в основном на севере, где скорость ветра существенно выше. Во время полярной ночи ветра почти нет, как и в сильные морозы, и такие периоды времени занимают в Якутии большую часть календарного года. Работа ветроэлектростанций

возможна лишь летом, когда средняя скорость ветра существенно увеличивается [11]. Но летний период на данной территории очень короткий, поэтому круглогодичная работа станций практически невозможна, и необходимо вновь возвращаться к дизельному топливу. Средняя стоимость 1 кВт·ч энергии ветроэлектростанций с учетом оборудования невысока ( $\approx 8$  руб.), но погодные условия Якутии не позволяют широко использовать ветроустановки [12].

По данным Института энергетической стратегии, теоретический потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России в течение трех дней, превышает энергию годового производства электроэнергии в стране в целом. Средняя годовая суммарная радиация в Якутске составляет 3712 МДж/м<sup>2</sup>, или 70 % годовой суммы, которая наблюдалась бы при безоблачном небе. Ледостав на реках Якутии длится 6-8 месяцев, мощность ледяного покрова доходит до 3 м [6]. В настоящее время современные электростанции способны функционировать в условиях вечной мерзлоты [13], поэтому суровый климат не будет существенной помехой. Однако следует учитывать, что выработка энергии при отрицательных температурах существенно ниже. Стоимость гидроэнергии с учетом оборудования и его обслуживания составляет 10 рублей за 1 кВт·ч, что также ниже дизельной, которая применяется в Якутии на сегодняшний день [14].

Таким образом, учитывая климатические и экономические составляющие, на территории Республики Саха Якутия наиболее целесообразно в качестве альтернативных источников энергии использовать солнечные батареи и микро-гидроэлектростанции [15].

Данная гипотеза подтвердится, если для данного региона найдется оптимальное распределение различных видов электростанций согласно задаче оптимизации, и при этом стоимость за кВт·ч будет ниже, чем при использовании ДЭС.

### **III. Задача оптимизации**

Сформулируем задачу, решение которой будет рассматриваться в рамках данного исследования. Для обеспечения энергией региона Республика Саха нами выбраны солнечные электростанции (СЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС). Проверим корректность ранее составленных гипотез. Добавим к данному списку один из самых распространенных возобновляемых источников энергии – ветроэлектростанции (ВЭС).

Сформируем задачу оптимизации для расчета оптимального распределения различных видов электростанций.

В рамках данного анализа путем вычисления риска отказов будут использоваться такие характеристики, как дисперсия и среднее квадратичное (стандартное) отклонение. Запишем  $D(Y/a)$  – дисперсию стоимости

энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени, то есть, мощности при разном сочетании долей генерации различными источниками. Эта величина была положена в основу целевой функции для системы ВИЭ [8, 16]:

$$D(Y/a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для  $Y_i, Y_j$ ;  $Y_i$  – стоимость за кВт·ч определенного источника электрогенерации;  $x_i$  – доля, вырабатываемая одним источником энергии;  $D(Y/a)$  – дисперсия стоимости для энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени;  $a$  – количество электроэнергии, вырабатываемое системой ВИЭ в единицу времени, то есть, мощность всей комплексной системы электрогенерации;  $n$  – количество источников энергии.

Переменными являются  $x_i$  – доли, вырабатываемые одним источником энергии в системе ВИЭ,  $i = 1 \dots n$ .

Ограничения, накладываемые на переменные:

$$x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1; \quad (2)$$

$$x_0 r_0 + x_1 m_1 + \dots + x_n m_n \leq A; \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 0 \dots n, \quad (4)$$

где  $x_i$  – доля источника энергии в системе,  $i = 0 \dots n$ ;  $m^i$  – средняя стоимость выработки энергии с помощью рискованного источника,  $i = 1 \dots n$ ;  $r_0$  – стоимость выработки энергии с помощью ДЭС, примем  $r_0 = 90$ , поскольку погодные условия не влияют на работу ДЭС, а средняя стоимость выработки электроэнергии с помощью ДЭС в данном регионе составляет 80 - 120 руб. за кВт·ч [9, 10];  $A$  – максимально допустимый уровень средней стоимости 1 кВт·ч электрической энергии.

Данная задача (задача 1) составлена в общем виде, поэтому необходимо ее конкретизировать под Республику Саха. Так как изучается гипотеза о применении солнечных батарей, микро-гидроэлектростанций и ветроэлектростанций, то  $n = 3$ .

Конкретизированные ограничения задачи записываются следующим образом:

$$x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = 1; \quad (5)$$

$$x_0 r_0 + x_1 m_1 + x_2 m_2 + x_3 m_3 \leq A; \quad (6)$$

$$x_i \geq 0, i = 0 \dots 3, \quad (7)$$

здесь  $x_0$  – доля дизельной энергии, которая является безрисковой;  $x_1$  – доля солнечной энергетики;  $x_2$  – доля гидроэнергетики;  $x_3$  – доля ветроэнергетики;  $m_1, m_2, m_3$  – стоимость выработки энергии с помощью СЭС, ГЭС и ВЭС, соответственно.

Для расчета рисков должна быть известна стоимость кВт·ч каждого источника энергии. Однако подобная информация сложна в оценке и получении. Стоимость энергии ВИЭ зависит от следующих параметров: стоимость самого генератора энергии, стоимость его обслуживания, количество вырабатываемой энергии и амортизационные отчисления. Получаем следующую формулу для вычисления стоимости определенного источника ВИЭ:

$$Y = \frac{E \cdot P + B + Am}{K}, \quad (8)$$

где  $Y$  – стоимость за кВт·ч энергии, полученной от определенного источника энергии;  $E$  – коэффициент окупаемости, обратно пропорциональный сроку окупаемости;  $P$  – стоимость генератора электроэнергии;  $B$  – стоимость обслуживания генератора;  $Am$  – амортизационные отчисления,  $K$  – количество вырабатываемой энергии за определенный период. В данном случае все параметры являются константами или изменяются незначительно, кроме количества вырабатываемой энергии.

Чем больше энергии вырабатывается возобновляемым источником энергии при неизменном количестве генераторов, тем выгоднее их использование и меньше цена за кВт·ч. Имеем обратную зависимость стоимости энергии и количества вырабатываемой энергии. Соответственно, заменим в исходной задаче 1:  $Y_i$  – стоимость за кВт·ч определенного источника энергии на  $1/K_i$  – величину обратно пропорциональную количеству вырабатываемой энергии источником  $i, i = 1 \dots n$ .

В связи с данными изменениями имеем следующую задачу 2:

$$D(1/K) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^* x_i x_j \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $\sigma_{ij}^*$  – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для  $K_i, K_j$ ;  $K_i$  – количество вырабатываемой энергии источником  $i$ ;  $x_i$  – доля, вырабатываемая одним источником энергии,  $i = 1 \dots 3$ ;  $D(1/K)$  – дисперсия количества энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени.

В ограничениях задачи 2 остаются ограничения (5) и (7).

Добавляется ограничение на максимальную долю ДЭС:

$$x_0 \leq 1. \quad (10)$$

Из ограничений было удалено ограничение (6) на стоимость электроэнергии, так как в рамках ранних исследований [14] было выяснено, что в Республике Саха стоимость выработки с помощью любого ВИЭ меньше, чем стоимость выработки с помощью дизельной энергии. Соответственно было добавлено ограничение (10) на максимальную долю дизельной энергии в системе, так как любой другой источник энергии будет дешевле и, ограничив долю  $x_0$ , можно снизить стоимость генерируемой энергии.

Далее определим формулы, с помощью которых находится количество генерируемой энергии каждым из рассматриваемых способов.

Для ветроэлектростанции формула определения мощности вырабатываемой электроэнергии:

$$P_{\text{вт}} = 0,5 \cdot Q \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \text{Eff}_{\text{вт}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{вт}}$  – мощность ветроэлектростанции, Вт;  $Q$  – плотность воздуха (1,23 кг/м<sup>3</sup>);  $S$  – площадь ометания ветроколеса, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветра (0,35...0,45);  $\text{Eff}_{\text{вт}}$  – КПД генератора. В данном случае видно, что все значения в формуле – константы, кроме скорости ветра.

Для солнечной электростанции имеет место следующая формула:

$$P_{\text{сп}} = P_{\text{инс}} \cdot \text{Eff}_{\text{сп}}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{сп}}$  – мощность солнечных панелей, Вт;  $P_{\text{инс}}$  – мощность инсоляции на земной поверхности на одном квадратном метре, кВт/м<sup>2</sup>;  $\text{Eff}_{\text{сп}}$  – КПД солнечной панели. В данном уравнении все значения в формуле константы, кроме среднемесячной инсоляции.

Для миниГЭС:

$$P_{\text{ГЭС}} = 120 \cdot V^3 \cdot D^2, \quad (13)$$

где  $P_{\text{ГЭС}}$  – мощность, Вт;  $V$  – скорость течения воды, м/с;  $D$  – диаметр колеса, м [2].

Для отдельно взятой реки все параметры являются константами, кроме скорости течения. Зачастую вместо скорости течения собираются данные о расходе воды. Из них можно найти скорость реки, зная поперечное сечение русла:  $V = R/S_{\text{русля}}$ , где  $R$  – расход воды в м<sup>3</sup>/с. Отсюда следует, что

единственной переменной в формуле является скорость течения и соответственно расход воды.

В случае с солнечной электроэнергией в течение года изменяется показатель солнечной инсоляции. Чем он больше, тем больше вырабатывается электроэнергии с каждой панели, и тем выгоднее она становится. Так как в формуле инсоляция указана в первой степени, зависимость стоимости и инсоляции обратная линейная. В случае с водной и ветряной электроэнергией имеем обратную кубическую зависимость.

Учитывая вышеописанные зависимости, мы можем заменить стоимость электроэнергии за кВт·ч на климатические данные. По вышеприведенным формулам видно, что количество вырабатываемой электроэнергии также определяется большим количеством констант и изменяются в них только климатические показатели в регионе. В связи с этим, в ранее определенной задаче можно заменить показатель количества вырабатываемой электроэнергии на климатические показатели, так как в целевой функции минимизируется дисперсия, а в данной задаче изменяются только климатические показатели.

Однако при этом стоит учесть, что климатические данные имеют различные единицы измерения, и их непосредственное сравнение будет некорректным. В связи с этим, сравниваться будут не сами единицы измерения, а их относительное изменение в течение года. При выполнении расчетов для СЭС параметры будут обратно пропорциональны климатическим показателям, т.к. увеличение инсоляции приводит к уменьшению стоимости. В случае с ВЭС и ГЭС параметры будут браться в степени «-3», так как скорость ветра и реки указана в (11) и (13) в «3» степени.

Для выборки месячных значений климатического показателя из 12 элементов будет найдена выборка из 11 элементов, которая соответствует относительным изменениям климатического показателя в течение года по месяцам.

Рассчитаем относительное изменение инсоляции по месяцам:

$$G_{ii} = \frac{\frac{1}{P_{\text{инс } i}} - \frac{1}{P_{\text{инс } i-1}}}{\frac{1}{P_{\text{инс } i-1}}}, \quad i = 2 \dots 12. \quad (14)$$

где  $P_{\text{инс } i}$  – солнечная инсоляция в  $i$ -ый месяц года в кВт·ч/м<sup>2</sup>,  $i = 1 \dots 12$ .

Для ВЭС и ГЭС аналогичная выборка будет найдена по формулам, приведенным ниже.

Относительное изменение климатического показателя для ГЭС:

$$G_{2i} = \frac{\frac{1}{R_i^3} - \frac{1}{R_{i-1}^3}}{\frac{1}{R_{i-1}^3}}, \quad i = 2 \dots 12, \quad (15)$$

где  $R_i$  – расход воды в реке в  $i$ -ый месяц года в м<sup>3</sup>/с,  $i = 1 \dots 12$ .

Относительное изменение климатического показателя для ВЭС:

$$G_{3i} = \frac{\frac{1}{V_i^3} - \frac{1}{V_{i-1}^3}}{\frac{1}{V_{i-1}^3}}, \quad i = 2 \dots 12, \quad (16)$$

где  $V_i$  – скорость ветра в  $i$ -ый месяц года в м/с,  $i = 1 \dots 12$ .

Для формирования обобщенного климатического показателя для системы ВИЭ произведем суммирование относительных изменений энергоресурсов.

Таким образом будут подготовлены данные, необходимые для решения задачи 3 с ограничениями (5), (7), (10) и критерием:

$$D(1/G) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^{**} x_i x_j \rightarrow \min, \quad (17)$$

где  $\sigma_{ij}^{**}$  – ковариация между элементами  $G_i$  и  $G_j$ ;  $G_i$  – изменение определенного климатического показателя в течение года.

#### IV. Метод решения задачи

Для решения задачи использован метод переборного типа. В рамках реализованной ИС доли ВИЭ будут перебираться в следующем порядке: сначала будут перебраны все возможные доли СЭС с заданной точностью, затем по перспективным направлениям СЭС будут перебираться доли ГЭС. Перебор оставшихся долей не осуществляется, так как любое вычисление риска с зафиксированной долей СЭС, ГЭС и ВЭС даст гарантированную долю ДЭС, которая следует из условия (5) задачи, и соответственно будет получено конечное решение задачи.

Стоит отметить, что ковариация между двумя источниками энергии может быть отрицательна. Это означает, что увеличение климатического показателя у одного источника энергии может сопровождаться падением показателя у другого. Соответственно, увеличение доли некоторых рискованных источников энергии может привести к уменьшению суммарного риска.

На языке программирования C# создано приложение, при помощи которого произведены расчеты.

#### **V. Результаты расчетов**

Для проведения расчетов использованы следующие климатические данные: инсоляция в течение года в  $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; расход воды в течение года в  $\text{м}^3/\text{с}$ ; скорость ветра в течение года в  $\text{м}/\text{с}$ .

Значения средней инсоляции в течение года в городе Якутск приведены в [3], диапазон их изменения  $1,09 \dots 5,64 \text{ kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ . Значения среднего расхода воды в течение года выбраны для реки Олёкма [5] и находятся в диапазоне  $30\dots 2601 \text{ м}^3/\text{с}$ . Значения средней скорости ветра в течение года составляют  $3,00 \dots 4,26 \text{ м}/\text{с}$  [6].

Для первого эксперимента установлено ограничение на максимальную долю дизельной энергии в 80 %. Точность вычислений была установлена до 0,01. В результате вычислений были получены следующие доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0,8; СЭС – 0,07; ГЭС – 0; ВЭС – 0,13. Следовательно, использование ГЭС без рисков абсолютно невозможно. Это связано с полным замерзанием рек в данном регионе. В связи с этим, многократно уменьшается скорость течения и, соответственно, производство энергии. Во втором эксперименте установленная доля ДЭС равная нулю и точность 0,01. Цель эксперимента – определить, какой из источников энергии предпочтительнее в Республике Саха, и в каком процентном соотношении стоит их размещать.

В результате вычислений получены следующие доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0; СЭС – 0,34; ГЭС – 0; ВЭС – 0,66. Доля ВЭС преобладает над СЭС при полном переходе на ВИЭ. Данное явление наблюдается из-за полярных ночей в данном регионе. В то время как солнечное излучение меняется многократно в течение года, скорость ветра остается достаточно стабильной. Из-за этого использование ветра предпочтительнее в данном регионе.

В заключительном эксперименте была установлена доля дизельной энергии 50 %, тем самым обозначив частичный переход на ВИЭ. Максимальная точность вычислений была установлена 0,0001. Получены следующие результаты – доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0,5; СЭС – 0,1701; ГЭС – 0; ВЭС – 0,3299.

Таким образом, при частичной замене дизельных генераторов на ВИЭ следует 17 % энергии вырабатывать с помощью солнечной энергетики, а 33 % вырабатывать с помощью ветроэлектростанций. Данное распределение источников энергии дает минимальный риск возникновения провалов генерируемой мощности в сетях электроэнергии при доле стабильной дизельной энергетики в 50 %.

## VI. Заключение

В ходе проведенного исследования была поставлена и скорректирована задача оптимизации, в рамках которой вычисляется наилучшее соотношение источников энергии в республике Саха для достижения минимального риска возникновения перебоев в энергосистеме. Наиболее перспективными возобновляемыми источниками энергии в данном регионе являются и ветро- и солнечные электростанции; они могут быть внедрены с минимальным риском для электроснабжения республики. Энергетика, основанная на течении рек, в республике Саха нежизнеспособна.

С некоторыми модификациями современные ГЭС способны работать в условиях замерзания рек. Однако в данном регионе реки замерзают слишком глубоко, в связи с чем их течение замедляется крайне значительно, и добыча энергии из течения реки становится невыгодной. Ветрогенераторы являются самыми перспективными для внедрения в данном регионе. Данные, собранные возле города Якутск, позволяют сделать вывод, что энергия ветра в регионе достаточно стабильна, и из нее можно извлекать электроэнергию. Однако ветер в республике достаточно слабый, в связи с чем необходимо использовать ветрогенераторы с малым размахом лопастей, так как им необходима меньшая минимальная скорость ветра для работы.

В Республике Саха жизнеспособны солнечные электростанции, но достаточно велика длительность полярных ночей, на время которых должны работать дизельные генераторы, так как в эти периоды выработка энергии от солнечных панелей уменьшается.

© Кумагина Е.А., 2024

© Плехов А.С., 2024

*Поступила в редакцию 02.08.2024*

*Принята к публикации 02.09.2024*

*Received 02.08.2024*

*Accepted 02.09.2024*

## Библиографический список

- [1] Сайфудинова Н.З., Мамалимов К.М., Сабирзянов А.И., Байгутлин А.И., Петунин Е.И. Влияние альтернативной энергетики на развитие экономики государства и окружающую среду // Московский экономический журнал. 2020. № 6. С. 177-188. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10419
- [2] Григорьев Л., Голяшев А., Скрябина В., Курдин А., Федоренко Д., Коломиец А., Федоров С. Развитие возобновляемой энергетики на фоне энергетических кризисов // Академия Энергетики.РФ. 2022. № 1 (2). С. 40-45.
- [3] Милютин А.Ю., Готфрид П.А. Политические аспекты применения ветроэнергетических установок. Проблемы внедрения и распространения альтернативной энергетики в России // X Межд. науч.-практ. конф. «Научный форум: Технические и физико-математические науки», Декабрь 11-19, 2017, Москва, Россия. М.: ООО Международный центр науки и образования, 2017. С. 147-155.

- [4] Пупенцова С.В., Прокофьев П.А., Лукьянов А.В. Идентификация рисков проектов перехода на потребление возобновляемой электроэнергии // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Экономика. 2021. № 4. С. 36-43. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-4-36-43
- [5] Лукьянов А.В., Прокофьев П.А. Ключевые факторы риска проектов перехода на потребление возобновляемой электроэнергии // Всерос. студ. науч.-уч. конф. «Молодежная неделя науки ИПМЭиТ», Декабрь 02-04, 2022, Санкт-Петербург, Россия: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. Ч. 2. С. 103-106.
- [6] Инсоляция в Якутске // Nova Sun. Сайт о солнечных батареях и ветряках. [Электронный ресурс]. URL: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/yakutsk> (дата обращения 15.07.2024).
- [7] Карипова И.А., Тишков П.И. Риски предприятий электроэнергетической отрасли в формировании стратегии перехода на возобновляемые источники энергии // Креативная экономика. 2020. №. 14 (11). С. 2977-2992. DOI: 10.18334/ce.14.11.111091
- [8] Велькин В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах. Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
- [9] Общие сведения о Республике Саха (Якутия) // Управление Роскомнадзора по Республике Саха (Якутия). [Электронный ресурс]. URL: <https://14.rkn.gov.ru/about/p7613/> (дата обращения 15.07.2024).
- [10] Лебедева М.А. Особенности развития северных регионов на основе использования альтернативной энергетики // Научный результат. Экономические исследования. 2021. № 7 (2). С. 13-24. DOI: 10.18413/2409-1634-2021-7-2-0-2
- [11] Значение направления и скорости ветра в г. Якутск (Республика Саха) // ООО «Бетаэнерджи». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.betaenergy.ru/windspeed/yakutsk/> (дата обращения 15.07.2024).
- [12] Справочно-информационный портал «Погода и климат». Климатические таблицы. Данные для Якутска. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/24959.htm> (дата обращения 15.07.2024).
- [13] Гетманов В.Н., Блинов В.В., Гончаров Н.Ф., Комаров С.Г., Макаров И.Р., Мандрик М.С. Бесплотинные ГЭС, как источники энергообеспечения отдельных потребителей // III Всерос. науч. конф. с межд. уч. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий», Март 21-23, 2017, Новосибирск, Россия. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2017. С. 179-186.
- [14] Кулешов Л., Тихонов С. Себестоимость электроэнергии по типам электростанций в России // Россети. [Электронный ресурс]. URL: <https://oaomrsk.ru/sebestoimost-elektroenergii-po-tipam-elektrostancij-v-rossii/> (дата обращения 15.07.2024).
- [15] A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for the Arctic Region // Olekma At Kudu-Kel'. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6216> (дата обращения 15.07.2024).
- [16] Богомолов С.И., Щельников В.Н. Повышение энергоэффективности объектов наземной космической инфраструктуры арктической зоны России // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 533-536. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-533-537

## References

- [1] N.Z. Saifudinova, K.M. Mamalimov, A.I. Sabirzyanov, A.I. Baigutlin and E.I. Petunin, "Influence of alternative power engineering on the development of the state's economy and the environment", *Moscow Economic Journal*, no. 6, pp. 177-188, 2020. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10419
- [2] L. Grigoriev, A. Golyashev, V. Skryabina, A. Kurdin, D. Fedorenko, A. Kolomiets and S. Fedorov, "Razvitie vozobnovlyаемoj energetiki na fone energeticheskikh krizisov [Development of renewable energy against the backdrop of energy crises]", *Akademiya Energetiki.RF [Academy of Energy.RF]*, no. 1(2), pp. 40-45, 2022 (in Russian).
- [3] A.Yu. Milyutin and P.A. Gotfried, "Political aspects of the application of wind power plants. Problems of introduction and distribution of alternative energy in Russia", in proc. *X International scientific-practical conference "Nauchnyj forum: Tekhnicheskije i fiziko-matematicheskie nauki [Scientific forum: Technical and physical-mathematical sciences]"*, Dec. 11-19, 2017, Moscow, Russia, pp. 147-166 (in Russian).
- [4] S.V. Pupentsova, P.A. Prokofiev and A.V. Lukyanov, "Risk identification in projects of transition to renewable electricity consumption", *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*, no. 4, pp. 36-43, 2021. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-4-36-43
- [5] A.V. Lukyanov and P.A. Prokofiev, "Klyuchevye faktory riska proektov perekhoda na potreblenie vozobnovlyаемoj elektroenergii [Key risk factors for projects of transition to renewable electricity consumption]", in proc. *All-Russian student scientific-educational conference "Molodezhnaya nedelya nauki IPMEiT [Youth Science Week IPMEiT]"*, Dec. 02-04, 2022, St. Petersburg, Russia, vol. 2, pp. 103-106 (in Russian).
- [6] Insolyaciya v Yakutske [Insolation in Yakutsk]. [Online]. Available at: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/yakutsk> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [7] I.A. Karipova and P.I. Tishkov, "Risks of electric power industry enterprises in developing a strategy for switching to renewable energy sources", *Creative Economy*, vol. 14, no. 11, pp. 2977-2992, Nov. 2020. DOI: 10.18334/ce.14.11.111091
- [8] V.I. Vel'kin, *Metodologiya rascheta kompleksnyh sistem VIE dlya ispol'zovaniya na avtonomnyh ob'ektah [Methodology for calculating complex renewable energy systems for use at autonomous facilities]*. Yekaterinburg: UrFU, 2015 (in Russian).
- [9] Obshchie svedeniya o Respublike Saha (Yakutiya) [General information about the Republic of Sakha (Yakutia)]. [Online]. Available at: <https://14.rkn.gov.ru/about/p7613/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [10] M.A. Lebedeva, "Features of the northern regions' development based on the use of alternative energy", *Research Result. Economic Research*, vol. 7, no. 2, pp. 13-24, 2021. DOI: 10.18413/2409-1634-2021-7-2-0-2
- [11] Znachenie napravleniya i skorosti vetra v g. Yakutsk (Respublika Saha) [The value of wind direction and speed in Yakutsk (Republic of Sakha)]. [Online]. Available at: <https://www.betaenergy.ru/windspeed/yakutsk/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [12] Spravochno-informacionnyj portal «Pogoda i klimat». Klimaticheskie tablicy. Dannye dlya Yakutska [Reference and information portal "Weather and climate". Climate tables. Data for Yakutsk]. [Online]. Available at: <http://www.pogodai-klimat.ru/climate/24959.htm> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).

- [13] V.N. Getmanov, V.V. Blinov, N.F. Goncharov, S.G. Komarov, I.R. Makarov and M.S. Mandrik, “Besplotinnye GES, kak istochniki energoobespecheniya ot del'nykh potrebitel'ej [Damless hydroelectric power stations as sources of energy supply for individual consumers]”, in proc. *III All-Russian scientific conference with international participation “Energ- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy [Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings]”*, Mar. 21-23, 2017, Novosibirsk, Russia, pp. 179-186 (in Russian).
- [14] L. Kuleshov, S. Tihonov, “Sebestoimost' elektroenergii po tipam elektrostancij v Rossii” [Cost of Electricity by Type of Power Plants in Russia]. [Online]. Available at: <https://oao-mrsk.ru/sebestoimost-elektroenergii-po-tipam-elektrostancij-v-rossii/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [15] A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for the Arctic Region. [Online]. Available at: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6216> [Accessed: July 15, 2024].
- [16] S.I. Bogomolov and V.N. Shchel'nikov, “Improving the energy efficiency of ground-based space infrastructure facilities in the arctic zone of Russia”, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 4, pp. 533-536, 2023. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-533-537

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кумагина Елена Александровна**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Плехов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Elena A. Kumagina**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Alexandr S. Plekhov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

---

---

## ХРОНИКА

---

### К 60-летию кафедры «Электроэнергетика, электрообеспечение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

В 2024 г. исполняется 60 лет кафедре «Электроэнергетика, электрообеспечение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Она была основана в 1964 г. как кафедра «Электрообеспечение промышленных предприятий и городов», ее первым заведующим стал видный ученый, д-р техн. наук, профессор **Юрий Леонидович Мукосеев**, занимавший эту должность до 1976 г.

Ю.Л. Мукосеев сыграл большую роль в становлении и развитии специальности «Электрообеспечение промышленных предприятий» в СССР. Во время Великой Отечественной войны он был главным инженером треста «Электроспецмонтаж» и руководил восстановлением системы электрообеспечения Горьковского автозавода после бомбежек. Им было впервые предложено применять в цехах многоамперные магистральные шинопроводы, позволявшие сократить сроки восстановления электрообеспечения заводов. После войны такие шинопроводы начали использоваться на всех промышленных предприятиях.

В 1954 г. опубликовано первое издание книги Ю.Л. Мукосеева «Вопросы электрообеспечения промышленных предприятий», переведенной впоследствии на английский, китайский и венгерский языки. В 1959 г. вышла его монография «Распределение переменного тока в токопроводах», в которой на высоком теоретическом уровне были доказаны преимущества многоамперных комплектных шинопроводов. Материалы докторской диссертации Ю.Л. Мукосеева стали основой для широко известного в СССР вузовского учебника «Электрообеспечение промышленных предприятий» (1973).



**Мукосеев  
Юрий Леонидович**

С 1966 г. Ю.Л. Мукосеев возглавлял научно-методическую комиссию Министерства образования СССР по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий», отделения которой благодаря его усилиям и энергии были открыты более чем в 60 вузах страны.



**Вагин  
Геннадий Яковлевич**

С 1976 по 1994 гг. кафедрой руководил д-р техн. наук, профессор **Геннадий Яковлевич Вагин**. С 1994 по 2018 гг. кафедру возглавлял д-р техн. наук, профессор **Алексей Борисович Лоскутов**. С 2018 г. кафедрой заведует канд. техн. наук, доцент **Александр Александрович Севостьянов**.

Кафедра дважды меняла название. В 2000 г., объединившись с кафедрой «Электроэнергетика», кафедра получила название «Электроэнергетика и электроснабжение». В 2013 г., в связи с образованием в НГТУ института электроэнергетики (ИНЭЛ), произошло слияние кафедр «Электроэнергетика и электроснабжение» и «Промышленная электроника». Объединенная кафедра получила название «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

**Направления подготовки.** Кафедра осуществляет подготовку бакалавров по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

**Бакалавриат.** Направление «Электроэнергетика и электротехника».

**Профиль «Электроснабжение и релейная защита»** предусматривает подготовку специалистов в сфере проектирования и эксплуатации сложного электрохозяйства современных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, транспортных систем, тепловых, гидро- и атомных электростанций, заводов, линий электропередачи, жилых и административных зданий и др.



**Лоскутов  
Алексей Борисович**



**Севостьянов  
Александр  
Александрович**

**Профиль «Электроэнергетические системы и сети».** Выпускники этого профиля готовятся для работы в области передачи, распределения и потребления электрической энергии высокого напряжения; диспетчерского управления электроэнергетическими системами различного иерархического уровня; для работы в районных, региональных энергетических управлениях и предприятиях электрических сетей, в профильных проектных и монтажных организациях.

**Магистратура.** Подготовка магистров на кафедре осуществляется по трем программам: «Электроэнергетические системы и сети»; «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»; «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».



**Кафедра «Электроэнергетика и электроснабжение»  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012 г.**

*Верхний ряд (слева направо): О.Ю. Малафеев, А.А. Петров, В.Ю. Вуколов, М.В. Шарыгин, Б.В. Папков, А.А. Севостьянов, В.В. Севастьянова, С.Н. Юртаев, Г.Я. Вагин, А.И. Гардин, С.А. Петрицкий, Е.Б. Солнцев, П.В. Терентьев, А.В. Шалухо, Р.Ш. Бедретдинов. Нижний ряд (слева направо): А.Н. Фитасов, Т.В. Витюгова, Т.М. Щеголькова, А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.В. Курлова, А.М. Мамонов*

В 2013 г. на кафедре была открыта заочная магистратура по направлению «Электроэнергетика и электротехника», программа «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения».

**Аспирантура.** Подготовка аспирантов ведется по научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы».

Преподаватели кафедры читают лекции по 23 спецкурсам для студентов дневного и заочного обучения. Кафедра имеет 10 лабораторий, оснащенных современным оборудованием.

**Научная деятельность кафедры.** На кафедре с 1965 г. создана научная школа «Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения и электрических сетей», основателем которой является д-р техн. наук, профессор Ю.Л. Мукосеев.

В настоящее время в рамках данной научной школы активно развивается пять научных направлений.

**1. Научное направление «Энергосбережение в промышленности, бюджетной сфере и ЖКХ» (руководители – д-р техн. наук, профессор Г.Я. Вагин; д-р техн. наук, профессор А.Б. Лоскутов)** посвящено технологиям повышения энерго- и ресурсоэффективности в промышленности, бюджетной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве.

*Результаты:* энергетические обследования режимов работы электроприемников (коэффициентов загрузки, включения, графиков нагрузки) на различных промышленных предприятиях (ГАЗ, ВАЗ, Кулебакский и Выксунский металлургические предприятия, завод Красный якорь, Сормовский судостроительный завод и др.)

*Разработаны методы:* проведения инструментальных обследований при энергоаудите; проведения энергетических обследований (энергоаудита) бюджетных учреждений; проведения энергетических обследований (энергоаудита) образовательных учреждений.

*Федеральные и региональные программы энергосбережения в энергоемких отраслях промышленности:* оптимизация энергозатрат в ОПК России; энергосбережение на объектах Минобразования РФ; энергосбережение в Нижегородской области; модернизация систем наружного освещения районных центров и городов Нижегородской области; программа по использованию местных и нетрадиционных возобновляемых источников энергии; программа по разработке и созданию типового ряда линии ТЭЦ на базе газопоршневых агрегатов.

В 1996 г. по предложению ученых направления при НГТУ создан «Нижегородский региональный учебно-научный инновационный центр энергосбережения» (НИЦЭ). При нем были организованы курсы подготовки и переподготовки энергоаудиторов, которые окончили более 500 спе-

циалистов из 20 регионов России. Совместно с НИЦЭ учеными НГТУ проведены энергетические обследования более 1000 бюджетных учреждений страны (вузов, техникумов, школ, дошкольных, медицинских). Научное направление широко представлено проектами международного сотрудничества: по контракту с Европейской экономической комиссией ООН провели обучение специалистов среднеазиатских государств (Казахстан, Киргизстан, Узбекистан, Таджикистан) и республики Белоруссия по вопросам рационального и эффективного использования водных и энергетических ресурсов (2002, 2003); совместно с фирмами «Хасконинг», «Индустрия» (Нидерланды) разработали и реализовали проект модернизации системы наружного освещения (г. Дзержинск).

*Учебные пособия:* учебник для вузов «Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве» (2012); учебные пособия для вузов («Экономия энергии в промышленности» (1998), «Экономия энергоресурсов» (2013)); справочно-методические пособия («Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях» (2001), «Теория и практика энергосбережения в образовательных учреждениях» (2006), «Экономия энергоресурсов в промышленности, бюджетных организациях, жилищно-коммунальном хозяйстве» (2007), «Использование маркировки инженерного оборудования зданий при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения» (2014).

*Нормативные документы:* «Методика проведения инструментальных исследований при энергоаудите» (1998); «Методика проведения энергетических обследований бюджетных учреждений» (2003); «Методика проведения энергетических обследований образовательных учреждений» (2009).

*Монографии:* «Электроснабжение электротехнологических установок» (1985); «Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии» (1990); «Расчет электрических нагрузок систем электроснабжения» (1992); «Режимы электросварочных машин» (2005).

Всего по данному направлению опубликовано более 500 статей, докладов и тезисов. Получено 20 охранных документов на изобретения и патенты. Более 10 лет проводились Всероссийские конференции и выставки по энергосбережению, ежеквартально выпускался научно-технический журнал «Энергоэффективность. Опыт. Проблемы. Решения».

*Кандидатские диссертации:* Г.Я. Вагин (1970), А.И. Гардин (1983), А.Б. Лоскутов (1985), С.А. Шалаев (1995), Е.Н. Соснина (2001), А.М. Мамонов (2006), С.А. Петрицкий (2010), С.А. Бугров (2011), О.Ю. Малафеев (2017).

*Докторская диссертация:* Е.Н. Соснина (2013).

**2. Научное направление «Интеллектуальные электрические сети и подстанции» (научный руководитель д-р техн. наук, профессор А.Б. Лоскутов)** связано с исследованиями в сфере определения и разработки основных технических и технологических решений, обеспечивающих повышение управляемости, надежности, эффективности и снижения ресурсоемкости функционирования электросетевого комплекса и перевода его на технологию *Smart Grids* (умные сети). Для проведения этих исследований создана лаборатория «Цифровое моделирование электроэнергетических систем в реальном времени», позволяющая выполнить инженерные расчеты, разработку, испытания и наладку цифрового оборудования.

*Работки:* проект «Разработка математической имитационной модели компрессорного цеха с газоперекачивающим агрегатом в программном комплексе *Matlab/Simulink*» для ОАО «НИПОМ»; интеллектуальная цифровая защита с характеристиками, независимыми от режимов работы активно-адаптивной электрической сети», позволяющая повысить надежность электроснабжения распределительных сетей; выполнен проект «Разработка технических решений программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции» с использованием отечественной элементной базы и операционных систем в составе устройств уровня присоединения и среднего уровня; «Разработка тиристорных автоматических регуляторов напряжения» для повышения качества, снижения электрических потерь и эффективного управления потоками мощности в интеллектуальных электрических сетях среднего напряжения; «Разработка возобновляемых источников электроэнергии на базе топливных элементов».

*Кандидатские диссертации:* А.В. Шалухо (2013), А.А. Лоскутов (2015), Д.В. Зырин (2017).

*Докторская диссертация:* А.И. Чивенков (2015).

С 2018 г. по данному направлению ежеквартально выпускается научно-технический журнал «Интеллектуальная электротехника», который в 2022 г. включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, рекомендуемых для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций по специальности 2.4.2. и 2.4.3.

**3. Научное направление «Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии» (научный руководитель д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ Г.Я. Вагин)**

*Результаты и разработки:* обследование качества электроэнергии на автомобильных, металлургических и машиностроительных предприятиях, рекомендации по корректировке нормативных документов по качеству электроэнергии и электромагнитной совместимости; исследование влияния качества электроэнергии и электромагнитных помех на различные

электроприемники и их системы управления, рекомендации по электромагнитной совместимости электроприемников, внедренные при проектирование систем электроснабжения ВАЗа, КАМАЗа, Красноярского завода автоприцепов, реконструкции ГАЗа и завода «Красный якорь»; первая в СССР установка продольной компенсации для стабилизации напряжения в сварочных сетях, разработанная и смонтированная на заводе «Красный якорь», позволившая в два раза снизить брак на сварке цепей; два прибора для анализа электромагнитных помех: и «Фликерметр» и «Измеритель токов коротких замыканий» (приборы отмечены дипломами на выставке в Болгарии).

*Издания:* учебник для вузов «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» (2020); учебное пособие «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» (2004); монография «Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий» (1992).

*Кандидатские диссертации:* О.Н. Котельников (1975), В.С. Орлов (1981), И.Г. Крахмалин (1982), Е.Б. Солнцев (1986), О.А. Салтыкова (1987), В.А. Чечков (1988), Ф.В. Шарутин (1992), Е.В. Редькин (1993), А.А. Севостьянов (2003), С.Н. Юртаев (2012), П.В. Терентьев (2014).

*Докторские диссертации:* Г.Я. Вагин (1985) и А.Б. Лоскутов (1994).

**4. Научное направление «Методы и средства цифровой релейной защиты и автоматики» (научный руководитель д-р техн. наук, профессор А.Л. Куликов)** связано с усовершенствованием алгоритмов и аппаратно-программных средств релейной защиты и методов определения мест повреждений в электрических сетях.

*Результаты и разработки:* методы распознавания волновых электромагнитных процессов для решения задач защиты и управления интеллектуальных электрических сетей; программно-аппаратный комплекс определения мест повреждения в распределительных сетях при однофазных и двойных замыканиях на землю; серия цифровых терминалов защит электрических сетей 110-220 кВ с поддержкой МЭК 61850; экспериментальный образец интеллектуальной релейной защиты.

*Монографии:* «Дистанционное определение мест повреждения ЛЭП методами активного зондирования» (2006); «Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП» (2006); «Основы теории систем для электроэнергетиков» (2011); «Анализ и оценка последствий отключения потребителей электроэнергии» (2014); «Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями» (2017); «Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией» (2019).

*Учебные пособия:* «Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП» (2007); «Системы коммуникаций релейной защиты

и автоматизированных систем технологического управления объектов электроэнергетики» (2015).

*Кандидатские диссертации:* В.А. Петрова (2015), М.Д. Обалин (2016), В.В. Ананьев (2017), П.А. Колобанов (2019), А.А. Колесников (2019), А.О. Мирзаабдуллаев (2020), Д.И. Бездушный (2022), П.С. Пелевин (2024), В.Ю. Осокин (2024).

*Докторские диссертации:* М.В. Шарыгин (2017), П.В. Илюшин (2019).

### **5. Научное направление «Распределенная энергетика и возобновляемые источники энергии (научный руководитель д-р техн. наук, профессор Е.Н. Соснина).**

Главными исследовательскими ориентирами являются изучение режимов работы возобновляемых источников энергии (ветровых, солнечных энергоустановок, на топливных элементах и др.) и повышение энергоэффективности ВИЭ и систем сопряжения для совместной работы с распределительной электрической сетью.

*Результаты и разработки:* различные варианты вольтодобавочных устройств для повышения качества электроэнергии в электрических сетях 6, 10 кВ; экспериментальный образец интеллектуальной системы управления ветродизельной электростанции; лабораторные стенды «Виртуальная электростанция с возобновляемыми источниками энергии» и «Участок электрической сети с ТРН и ВИЭ, функционирующей по принципу интернета энергии», позволяющие моделировать различные режимы совместной работы возобновляемых источников и энергосистем.

*Учебные пособия:* «Общая энергетика» (2008); «Экологическая оценка возобновляемых источников энергии» (2017); «Экологическая безопасность электроэнергетики» (2021); «Возобновляемая энергетика» (2017, 2023).

*Монографии:* «Экологические аспекты биоэнергетики» (2012); «Экологические проблемы возобновляемых источников энергии» (2014).

*Кандидатские диссертации* Д.А. Филатов (2016), Р.Ш. Бедретдинов (2016), И.А. Липужин (2017), А.Ю. Кечкин (2018), Е.В. Крюков (2018).

За период существования научной школы по всем научным направлениям опубликовано более 1000 статей, докладов и тезисов, 4 учебника для вузов, более 20 учебных пособий, 14 монографий, получено более 50 патентов на изобретения. Научные доклады ученых кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» были представлены на международных конференциях в 30 странах мира.

**Награды.** Профессор Г.Я. Вагин – заслуженный деятель науки РФ и лауреат премии АН УССР. Профессор А.Б. Лоскутов – почетный работник

Минобрнауки России и лауреат премии Правительства Российской Федерации 2002 г. за разработку программы энергосбережения в системе Министерства образования и науки РФ. В 2020 г. премия Правительства РФ была присуждена А.Б. Лоскутову, А.Л. Куликову, М.В. Шарыгину и В.Ю. Вуколову за разработку и внедрение инновационных технологий и оборудования для управления и повышения надежности цифровых электрических сетей.

Дипломами, серебряными и золотыми медалями награждены ученые кафедры на международных выставках изобретений в России, Южной Корее, Швейцарии, Кипре.

**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 2024**

*The journal is issued 4 times in year*

**Editor-in-Chief A.B. Loskutov**

**EDITORIAL STAFF**

A.B. Dar'enkov (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)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, 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*  
*III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

**ISSN 2658-6754**

© Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2024

## CONTENT

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS .....</b>	<b>4</b>
<b>A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, R.I. Illarionov.</b> Application of the Nelder-Mead algorithm for fault location on overhead power transmission lines with branches .....	<b>4</b>
<b>O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov, T.Z. Bilyaletdinov.</b> Stand alone diesel generator power plant based on asynchronous generator with valve excitation and automatic voltage control system with vector control.....	<b>19</b>
<b>S.V. Popov, O.A. Burmakin, Y.S. Malyshev,</b> Justification of the use of frequency electric drives for ship anchor and mooring mechanisms.....	<b>32</b>
<b>A.I. Beloshistov, A.L. Serov, A.A. Beloshistov.</b> New series of microprocessor remote control devices BDU-D.....	<b>50</b>
<b>POWER INDUSTRY .....</b>	<b>65</b>
<b>A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.E Kryukov.</b> Modeling of electromagnetic influences of traction networks equipped with reactive power compensation means on pipelines.....	<b>65</b>
<b>V.Yu. Vukolov.</b> On power supply reliability of electrified railways signaling devices .....	<b>82</b>
<b>O.V. Masleeva, E.V. Kryukov, Y.I. Petukhov.</b> Energy and environmental assessment of urban transport.....	<b>100</b>
<b>E.A. Kumagina, A.S. Plekhov.</b> Electric supply disruptions risk minimization during the transition to green energy.....	<b>116</b>
<b>CRONICLE .....</b>	<b>130</b>
On the 60th anniversary of the Department of «Electric Power Engineering, Power Supply and Power Electronics» of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev.....	<b>130</b>

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**№ 3**

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

*Редакция:*

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
smart\_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 16.09.2024. Дата выхода в свет: 27.09.2024

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,75. Тираж 100 экз. Заказ .

---

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

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