

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Нижний Новгород 2023

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 2 (22). – 139 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

Анатолий Викторович Кузнецов

д-р техн. наук, профессор

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мещеряков

д-р техн. наук, профессор

Георгий Борисович Онищенко

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Vitezslav Styskala

д-р техн. наук, профессор (Чехия)

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

Roustiam Chakirov

д-р техн. наук, профессор (Германия)

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.nttu.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, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	4
Корнев А.С., Кузнецов Н.В., Вольский С.И., Викулов И.П. Алгоритм поиска аналитического решения для расчета переходных процессов методом матричной экспоненты.....	4
Гуныко Ю.Л., Бачаев А.А., Козырин В.А., Козина О.Л., Васин Е.Н. Влияние некоторых добавок на емкостные характеристики и срок службы никель-цинковых аккумуляторов.....	21
Рыжова Е.Л. Повышение энергоэффективности на железнодорожном транспорте путем применения систем накопления энергии.....	36
Завьялов В.М., Абейдулин С.А, Гайдук С.В., Углова М.Б. Исследование перенапряжений на конденсаторах последовательного резонансного контура беспроводной зарядной станции.....	49
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	62
Вуколов В.Ю. Рациональное определение границ балансовой принадлежности в задаче обеспечения надежности нетяговых сетей.....	62
Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Федосов Д.С. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения.....	78
Кузнецов А.В., Чикин В.В. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения.....	90
Слузова А.В., Лоскутов А.А. Компенсация токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с применением фазоповоротного устройства.....	101
Устинов Д.А., Айсар А.Р. Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия).....	121
Издательская жизнь НГТУ 2023	135

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.011.713

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_04

**АЛГОРИТМ ПОИСКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ
ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
МЕТОДОМ МАТРИЧНОЙ ЭКСПОНЕНТЫ****А.С. Корнев**

ORCID: 0000-0001-6055-3350 e-mail: alex_kornev46@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
*Санкт-Петербург, Россия***Н.В. Кузнецов**

ORCID: 0000-0002-6474-9657 e-mail: nkuznetsov239@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
*Санкт-Петербург, Россия***С.И. Вольский**

ORCID: 0000-0002-4175-869X e-mail: volsky-s@yandex.ru

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
*Москва, Россия***И.П. Викулов**

ORCID: 0000-0002-1859-6530 e-mail: i_vikulov@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия

Предложен аналитический способ расчета переходных процессов методом матричной экспоненты в линейных электрических цепях с начальными условиями, в состав которых входят: один источник переменного (гармонического) тока или ЭДС, управляемый ключ, резистивные и реактивные элементы, приводящие к комплексным корням. Подобные электрические цепи широко применяются в статических преобразователях электрической энергии различного назначения, которые содержат управляемые полупроводниковые приборы. Предложен алгоритм поиска аналитического решения, который базируется на составлении двух систем уравнений. Первая система организует связь матрицы первых производных переменных состояния с матрицей самих переменных состояния. Вторая система устанавливает

связь между искомой выходной величиной, переменными состояниями и источником внешнего воздействия. При составлении алгоритма использованы законы Кирхгофа, теорема Гамильтона-Келли и матричный вычислительный аппарат. Разработанный алгоритм позволяет получать искомые величины в виде тригонометрических функций с различными угловыми частотами, минуя сложные алгебраические преобразования. В качестве примера реализации предложенного алгоритма взята электрическая цепь, в которой до момента коммутации ключа через реактор протекал установившийся переменный ток. Точность полученных аналитических выражений искомых переходных функций токов и напряжений с относительным расхождением результатов не более 0,1 % была подтверждена компьютерным моделированием в *MATLAB Simulink*. Рассмотренная теоретическая разработка представляет интерес для специалистов, занятых исследованиями и расчетами переходных процессов в преобразовательных устройствах с управляемыми полупроводниковыми приборами (транзисторами или тиристорами).

Ключевые слова: комплексные корни, матричные уравнения, метод матричной экспоненты, переходные процессы, теорема Гамильтона-Келли, цепь переменного тока.

Для цитирования: Корнев А.С., Кузнецов Н.В., Вольский С.И., Викулов И.П. Алгоритм поиска аналитического решения для расчета переходных процессов методом матричной экспоненты // Интеллектуальная Электротехника. 2023. №2. С. 4-20. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_04

SEARCH ALGORITHM FOR CALCULATING TRANSIENTS BY MATRIX EXPONENTIAL METHOD

A.S. Kornev

ORCID: 0000-0001-6055-3350 e-mail: alex_kornev46@mail.ru

State Marine Technical University
Saint-Petersburg, Russia

N.V. Kuznetsov

ORCID: 0000-0002-6474-9657 e-mail: nkuznetsov239@gmail.com

State Marine Technical University
Saint-Petersburg, Russia

S.I. Volskiy

ORCID: 0000-0002-4175-869X e-mail: volsky-s@yandex.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University)
Moscow, Russia

I.P. Vikulov

ORCID: 0000-0002-1859-6530 e-mail: i_vikulov@mail.ru

Emperor Alexander I St.Petersburg State Transport University
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. An analytical method is proposed for calculating transients by the matrix exponential method in line electrical circuits with initial conditions, which include one source of alternating (harmonic) current or electromotive force, a controlled switch, resistive and reactive elements leading to complex roots. Such electric circuits are widely used in static converter of electrical energy for various purposes, containing controlled semiconductor devices. The proposed search algorithm of the analytical solution is based on the compilation of two simultaneous equations, the first of which organizes the connection of the matrix of the first derivatives of state variables with the matrix of the state variables themselves, and the second system establishes a connection between the required output values, state variables and the source of external action. In this case, Kirchhoff's laws, Hamilton-Cayley theorem and a matrix computing equipment are used. The developed algorithm allows to obtain the required values in the form of trigonometric functions with different angular frequencies, bypassing complex algebraic transformations. As an example of the implementation of the proposed algorithm, an electric circuit is taken in which, until the moment of switching the key, the reactor had alternating current. The accuracy of the obtained analytical expressions of the required transient functions of currents and voltages was confirmed by computer modeling in MATLAB Simulink with a relative discrepancy of results no more than 0.1 %. The theoretical development considered in the article is of interest to electrical engineers who are engaged in theoretical research and calculations of transients in converter with controlled semiconductor devices (transistors or thyristors).

Keywords: AC electrical circuits, complex roots, Hamilton-Cayley theorem, matrix equations, method of matrix exponential, transient characteristics.

For citation: A.S. Kornev, N.V. Kuznetsov, S.I. Volskiy and I.P. Vikulov, «Search algorithm for calculating transients by matrix exponential method», *Smart Electrical Engineering*, no .2, pp. 4-20, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_04

I. Введение

В настоящее время широко применяются статические преобразователи электрической энергии, содержащие, помимо источника ЭДС или тока, резистивных и реактивных элементов, управляемые полупроводниковые приборы – транзисторы или тиристоры [1-3]. В результате коммутации данных приборов возникают переходные процессы, которые зависят от начальных условий и параметров элементов статического преобразователя. При исследовании таких переходных процессов эффективно использовать компьютерное моделирование, с помощью которого существенно сокращается время, необходимое для определения искомых токов и напряжений элементов, входящих в состав таких устройств [4-6]. Однако для анализа взаимосвязи и влияния параметров элементов статического преобразователя на переходные процессы возникает необходимо найти аналитическое решение.

Одним из универсальных путей исследования аналитических моделей статических преобразователей является использование метода матричной экспоненты, который базируется на применении матричного вычислительного аппарата [7-9]. В основу данного метода заложены система уравнений состояния электрической цепи в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \times \mathbf{x} + \mathbf{B} \times \mathbf{u}, \quad (1)$$

и системы уравнений для выходных (искомых) переменных:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \times \mathbf{x} + \mathbf{D} \times \mathbf{u}, \quad (2)$$

где \mathbf{x} и $\dot{\mathbf{x}}$ – матрицы столбцы переменных состояния и их производные по времени; \mathbf{A} – квадратная матрица параметров электрической схемы (матрица Якоби); \mathbf{B} – матрица связи между источниками и переменным состоянием; \mathbf{u} – матрица столбец источников внешнего воздействия; \mathbf{C} – связная матрица переменных состояния с выходом электрической цепи (искомые токи и напряжения); \mathbf{D} – матрица прямой связи входа с выходом электрической цепи.

Во многих случаях при составлении системы уравнений состояния используют либо законы Кирхгофа [10-12], либо метод наложения [11, 13], либо топологический метод [10, 11, 14]. Первые два метода больше всего приемлемы при расчете переходных процессов в простых электрических цепях, содержащих не более трех реактивных элементов. При большем количестве реактивных элементов целесообразно применять топологический метод.

В любом случае аналитическое решение составленной системы уравнений состояния можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{x} = e^{\mathbf{A}t} \cdot \mathbf{x}(\mathbf{0}) + e^{\mathbf{A}t} \cdot \int_0^t e^{-\mathbf{A}\tau} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $e^{\mathbf{A}t}$ – матричная экспонента; $\mathbf{x}(\mathbf{0})$ – начальные условия.

При этом наиболее трудным действием является определение матричной экспоненты. Для этого традиционно используют теорему Гамильтона-Келли [10, 11, 15] или метод Сильвестра [11, 15] либо операторный метод [10, 16, 17].

Обычно в литературных источниках исследуются переходные процессы в электрических цепях с нулевыми начальными условиями, аналитическое решение которых содержит вещественные корни. При этом нахождение аналитического решения переходных процессов подобных электрических цепей особых затруднений не вызывает. В данной статье объектом

расчета переходных процессов являются электрические цепи с начальными условиями, содержащие источник переменного ЭДС или тока, идеальный ключ, резистивные и два реактивных элемента, приводящие аналитическое решение к комплексным корням.

II. Предложенный алгоритм расчета переходных процессов с начальными условиями и комплексными корнями

Для рассматриваемого случая предложен алгоритм поиска аналитического решения расчета переходных процессов на базе метода матричной экспоненты с использованием законов Кирхгофа, теоремы Гамильтона-Келли с учетом двух первых членов ряда и матричного вычислительного аппарата, который позволяет получать искомые величины в виде тригонометрических функций с различными угловыми частотами, минуя сложные алгебраические преобразования.

Поиск аналитического решения расчета переходных процессов изложен ниже.

1. Выбирают переменные состояния, которыми являются токи в реакторах и напряжения на конденсаторах.
2. Составляют систему уравнений состояния посредством использования первого и второго законов Кирхгофа для электрической схемы после замыкания ключа.
3. Преобразовывают полученную систему уравнений состояния к матричной форме (1).
4. Формируют систему уравнений для выходных переменных (искомых токов, протекающих через конденсаторы и напряжений на реакторах).
5. Преобразовывают полученную систему уравнений для выходных переменных к матричной форме (2).
6. Определяют численные значения корней из характеристического уравнения:

$$\Delta(\mathbf{p}) = \det(\mathbf{p} \times \mathbf{1} - \mathbf{A}) = 0, \quad (4)$$

где $\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ – единичная диагональная матрица; \mathbf{p} – независимая переменная.

7. Подставляют полученные численные значения корней характеристического уравнения в следующее выражение:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \begin{pmatrix} p_2 & -p_1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{p_1 \cdot t} \\ e^{p_2 \cdot t} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты первых двух членов ряда при определении экспоненциальной матричной функции с использованием теоремы Гамильтона-Кели:

$$e^{A \cdot t} = a_0 \cdot \mathbf{1} + a_1 \cdot \mathbf{A}. \quad (6)$$

Следует заметить, что (5) получено из уравнения:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & p_1 \\ 1 & p_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} e^{p_1 \cdot t} \\ e^{p_2 \cdot t} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

путем подстановки обратной матрицы:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{\mathbf{1}}{|\mathbf{A}|} \times \mathbf{A}^T = \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \begin{pmatrix} p_2 & -p_1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

8. Записывают матричную экспоненциальную функцию (6) с учетом вычисленных значений в (5).
9. Подставляют полученные численные значения в интеграл второго члена (3):

$$\int_0^t e^{-A \cdot \tau} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (9)$$

10. Осуществляют интегрирование (9) с учетом того, что:

$$\int_0^t e^{p \cdot t} \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{1}{p^2 + \omega^2} (p \cdot \sin(\omega t) - \omega \cdot \cos(\omega t)). \quad (10)$$

11. Подставляют численные значения экспоненциальной функции, найденной в п. 9, и интеграла, определенного в п. 11, во второй член (3):

$$e^{A \cdot t} \cdot \int_0^t e^{-A \cdot \tau} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

12. Записывают начальные условия $\mathbf{x}(0)$ при $t = 0$.
13. Подставляют численные значения экспоненциальной функции, полученной в п. 9, и начальных условий в первый член (3):

$$e^{At} \cdot \mathbf{x}(0). \quad (12)$$

14. Получают окончательное решение переменных состояния, подставив численные значения (12) и (11) в (3).
15. Находят выходные (искомые) переменные, подставив в систему уравнений п. 5 численные значения переменных состояния, полученных в п. 15.
16. Определяют остальные требуемые значения токов и напряжений с использованием законов Кирхгофа и полученных численных значений переменных состояния и выходных переменных.

III. Пример определения аналитического решения расчета переходных процессов в электрической цепи

В качестве примера реализации предложенного алгоритма поиска аналитического решения расчета переходных процессов взята электрическая цепь (рис. 1), в которой до момента коммутации ключа K через реактор L протекал установившийся переменный ток. С подобными топологиями зачастую приходится сталкиваться при исследовании выходных характеристик статических емкостных накопителей электрической энергии, имеющих сходную конфигурацию элементов.

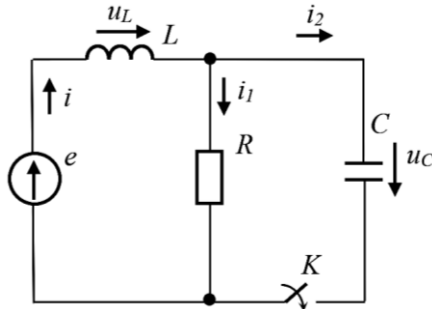


Рис. 1. Пример электрической цепи

Fig. 1. Example of an electrical circuit

Для данной электрической схемы были выбраны параметры элементов, приводящие в совокупности к комплексным корням, а именно:

$$e = 80 \sin(\omega t), \text{ В}; \quad \omega = 300, \text{ с}^{-1}; \quad L = 0,25, \text{ Гн}; \quad R = 1, \text{ кОм}; \quad C = 30, \text{ мкФ}.$$

Предложенный алгоритм поиска аналитического решения искомых переменных переходного процесса для рассматриваемой электрической цепи реализуется следующим образом.

Вначале записывается система уравнений состояния согласно первому и второму законам Кирхгофа после замыкания ключа K :

$$\begin{cases} u_L + R \cdot i_1 = e; \\ -R \cdot i_1 + u_C = 0; \\ -i + i_1 + i_2 = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Затем из (13) определяются производные $\frac{di}{dt}$ и $\frac{du_C}{dt}$.

Поскольку:

$$i_2 = C \cdot \frac{du_C}{dt}, \quad (14)$$

то после подстановки (14) в третье уравнение системы (13) следует, что:

$$i_1 = i - C \cdot \frac{du_C}{dt}, \quad (15)$$

Подставив (15) во второе уравнение системы (13):

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C + \frac{1}{C} \cdot i. \quad (16)$$

Из второго уравнения системы (13) следует:

$$i_1 = \frac{u_C}{R}. \quad (17)$$

Поскольку:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (18)$$

после подстановки (17) и (18) в первое уравнение системы (13):

$$\frac{di}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot u_C + \frac{1}{L} \cdot e. \quad (19)$$

В результате система уравнений состояния (1) в матричной форме принимает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{u}_c \\ u_c \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R \cdot C} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_c \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} \cdot (e), \quad (20)$$

где после подстановки численных значений:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -33,3 & 33,3 \cdot 10^3 \\ -4,0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix}; \quad (e) = (80 \cdot \sin(300 \cdot t)).$$

Из второго уравнения системы (13) определяются:

$$u_c = R \cdot i_1; \quad (21)$$

$$i_1 = \frac{u_c}{R}. \quad (22)$$

Подставив (21) в первое уравнение системы (13) и (22) в третье уравнение системы (13), получим выражения для расчета выходных (искомых) переменных:

$$u_L = -u_c + e; \quad (23)$$

$$i_2 = -\frac{1}{R} \cdot u_c + i. \quad (24)$$

В результате система (2) для выходных (искомых) переменных в матричной форме принимает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} u_L \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{R} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_c \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot (e), \quad (25)$$

где после подстановки численных значений:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -10^{-3} & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Затем, подставив в (4) численные значения:

$$\Delta(\mathbf{p}) = \det \left\{ \begin{pmatrix} p + 33,3 & -33,3 \cdot 10^3 \\ 4,0 & p \end{pmatrix} \right\} = 0. \quad (26)$$

Из (26) следует:

$$\Delta = \begin{vmatrix} p+33,3 & -33,3 \cdot 10^3 \\ 4,0 & p \end{vmatrix} = p^2 + 33,3 \cdot p + 13,3 \cdot 10^4 = 0. \quad (27)$$

В результате определены корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -16,7 + j \cdot 365; \quad (28)$$

$$p_2 = -16,7 - j \cdot 365. \quad (29)$$

После подстановки численных значений (28) и (29) в (5) получаем следующее выражение:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 \cdot e^{p_1 t} + M_2 \cdot e^{p_2 t} \\ -j \cdot 13,7 \cdot 10^{-4} e^{p_1 t} + -j \cdot 13,7 \cdot 10^{-4} e^{p_2 t} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

где $M_1 = 0,5 - j \cdot 22,9 \cdot 10^{-3}$; $M_2 = 0,5 + j \cdot 22,9 \cdot 10^{-3}$.

В результате, с учетом (30), из (6) определяется матричная экспоненциальная функция:

$$e^{A \cdot t} = \begin{pmatrix} M_2 \cdot e^{p_1 t} + M_1 \cdot e^{p_2 t} & -j \cdot 45,7 \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \\ -j \cdot 54,8 \cdot 10^{-4} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) & M_1 \cdot e^{p_1 t} + M_2 \cdot e^{p_2 t} \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Подставив (31) в интегральный член (9) уравнения (3):

$$\int_0^t e^{-A \cdot t} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau = \begin{pmatrix} -j \cdot 14,6 \cdot 10^3 \cdot \int_0^t F_1 d\tau + j \cdot 14,6 \cdot 10^3 \cdot \int_0^t F_2 d\tau \\ (160 - j \cdot 7,31) \cdot 10^3 \cdot \int_0^t F_1 d\tau + (160 + j \cdot 7,31) \cdot \int_0^t F_2 d\tau \end{pmatrix}. \quad (32)$$

где $\omega_1 = 300$; $F_1 = e^{-p_1 \tau} \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau)$; $F_2 = e^{-p_2 \tau} \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau)$.

Затем необходимо интегрировать (32) с учетом (10):

$$\begin{aligned} & \int_0^t e^{-A \cdot t} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau = \\ & = \begin{pmatrix} K_{11} - K_{12} \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot e^{-p_1 t} + K_{13} + K_{14} \cos(\omega_1 t) \cdot e^{-p_2 t} + 53,9 \\ K_{21} + K_{22} \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot e^{-p_1 t} + K_{23} + K_{24} \cos(\omega_1 t) \cdot e^{-p_2 t} - 2,05 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (33)$$

где дополнительные вспомогательные переменные:

$$\begin{aligned} K_{11} &= (117 - j \cdot 27,5) \cdot F_1; & K_{12} &= 27 - j \cdot 94,8; & K_{13} &= (117 + j \cdot 27,5) \cdot F_2; \\ K_{14} &= -27 + j \cdot 94,8; & K_{21} &= (0,36 + j \cdot 1,26) \cdot F_1; & K_{22} &= 1,02 - j \cdot 0,34; \\ K_{23} &= (0,36 - j \cdot 1,26) \cdot F_2; & K_{24} &= 1,02 + j \cdot 0,34. \end{aligned}$$

Перемножая (31) на (33), получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} e^{A \cdot t} \cdot \int_0^t e^{-A \cdot \tau} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{u}(\tau) d\tau = \\ = \begin{pmatrix} 23,4 \cdot \sin(\omega_1 t) - 53,9 \cdot \cos(\omega_1 t) - (190 \cdot \sin(\omega_2 t) - 53,9 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t} \\ 0,72 \cdot \sin(\omega_1 t) + 2,05 \cdot \cos(\omega_1 t) - (0,685 \cdot \sin(\omega_2 t) + 2,05 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (34)$$

где $\omega_2 = 365$.

Следует отметить, что начальные условия (при $t = 0$) имеют следующий вид:

$$\mathbf{x}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 79,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(-4,28^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -59,5 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Следовательно, с учетом (31) и (35), определяется первый член (3):

$$\begin{aligned} e^{A \cdot t} \cdot \mathbf{x}(0) = \\ = \begin{pmatrix} -0,544 \cdot \sin(\omega_2 t) \cdot e^{-16,7t} \\ -59,5 \cdot 10^{-4} \cos(\omega_2 t) \cdot e^{-16,7t} - 27,2 \cdot 10^{-5} \sin(\omega_2 t) \cdot e^{-16,7t} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (36)$$

Подставив (36) и (34) в (3), получим аналитическое решение переменных состояния:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= 234 \cdot \sin(\omega_1 t) - 53,9 \cdot \cos(\omega_1 t) - (190 \cdot \sin(\omega_2 t) - \\ &\quad - 53,9 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t}; \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= 0,719 \cdot \sin(\omega_1 t) + 2,05 \cdot \cos(\omega_1 t) - (0,685 \cdot \sin(\omega_2 t) + \\ &\quad + 2,05 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t}. \end{aligned} \quad (38)$$

Затем, с учетом (37) и (38), из (25) определены выходные (искомые) переменные. После преобразований:

$$\begin{aligned} u_L(t) &= -154 \cdot \sin(\omega_1 t) + 53,9 \cdot \cos(\omega_1 t) + (190 \cdot \sin(\omega_2 t) - \\ &\quad - 53,9 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t}; \end{aligned} \quad (39)$$

$$i_2(t) = 0,485 \cdot \sin(\omega_1 t) + 2,1 \cdot \cos(\omega_1 t) - (0,495 \cdot \sin(\omega_2 t) + 2,11 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t}. \quad (40)$$

На завершающем этапе расчета определен ток i_1 из третьего уравнения системы (13):

$$i_1(t) = 0,234 \cdot \sin(\omega_1 t) - 0,054 \cdot \cos(\omega_1 t) - (0,19 \cdot \sin(\omega_2 t) + 0,054 \cdot \cos(\omega_2 t)) \cdot e^{-16,7t}. \quad (41)$$

Таким образом, с помощью предложенного алгоритма выведены выражения (37)–(41), которые являются аналитическим решением расчета переходных процессов электрической схемы, приведенной на рис. 1. Данные выражения позволяют в зависимости от времени вычислить необходимые токи и напряжения в рассматриваемой цепи, с помощью которых можно проводить исследования переходных процессов после коммутации ключа K .

III. Результаты проверки полученного аналитического решения расчета переходных процессов

Компьютерное моделирование – современное универсальное средство проверки полученных результатов. Для этих целей широко используют интерактивный объектно-ориентированный интерфейс в среде моделирования *Simulink* пакета *MATLAB* [4, 5]. Совместное применение блок-моделей библиотек *SimPowerSystems Specialized Technology* [5, 6] и *Simulink* при использовании функций самого пакета *MATLAB* дает почти неограниченные возможности для компьютерного моделирования любых электротехнических средств, включая статические преобразователи.

На первом этапе был выполнен расчет переходных характеристик напряжений и токов рассматриваемой электрической цепи посредством использования (37)–(41). В качестве примера на рис. 2 и 3 представлены результаты таких расчетов. Затем для проверки расчетных результатов была разработана имитационная компьютерная модель рассматриваемой электрической цепи с использованием *SimPowerSystems* и *Simulink*, с помощью которой были определены аналогичные переходные характеристики напряжений и токов.

Проведенный сопоставительный анализ переходных характеристик, рассчитанных по предложенному алгоритму и полученных с помощью разработанной имитационной компьютерной модели, показывает их полное совпадение, как по амплитудным параметрам, так и по их длительности с относительной погрешностью, которая не превышает 0,1 %.

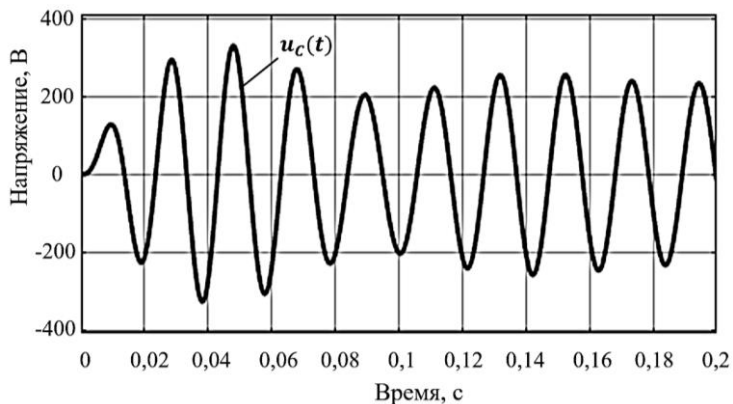


Рис. 2. Вычисленные значения напряжения

Fig. 2. Calculated values of voltage

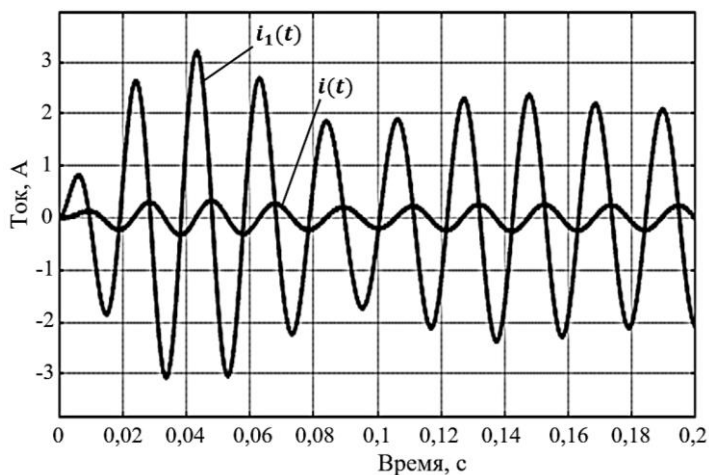


Рис. 3. Вычисленные значения токов

Fig. 3. Calculated values of currents

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование подтвердило правильность разработанного алгоритма, посредством которого были получены расчетные выражения переменных состояния и выходных (искомых) переменных.

IV. Заключение

Предложенный алгоритм поиска аналитического решения для расчета переходных процессов на базе метода матричной экспоненты с использованием законов Кирхгофа, теоремы Гамильтона-Келли и матричного вычислительного аппарата позволяет с высокой достоверностью проводить количественные и качественные исследования линейных электрических цепей. Сопоставительный анализ переходных характеристик, рассчитанных по предложенному алгоритму и полученных с помощью разработанной имитационной компьютерной модели, показывает их полное совпадение, как по амплитудным параметрам, так и по их длительности с относительной погрешностью, которая не превышает 0,1 %.

Представленный материал может быть полезен для специалистов и инженерных работников, занимающихся исследованиями и расчетами переходных процессов в электротехнических устройствах переменного тока, включая статические преобразователи с управляемыми полупроводниковыми приборами.

© Корнев А.С., 2023

© Кузнецов Н.В., 2023

© Вольский С.И., 2023

© Викулов И.П., 2023

Поступила в редакцию 13.05.2023

Принята к публикации 31.05.2023

Received 13.05.2023

Accepted 31.05.2023

Библиографический список

- [1] Зиновьев Г.С. Силовая электроника. М.: Юрайт, 2018. – 667 с.
- [2] Makarov S.N., Ludwig R., Bitar S.J. Practical Electrical Engineering. Washington: Worcester Polytechnic Institute, 2016. – 664 p. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2
- [3] Skorokhod Yu., Philin D., Volskiy S. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction // proc. 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic: IEEE, 2020. P. 133-137. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [4] Терехин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. М.: Юрайт, 2022. – 306 с.
- [5] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
- [6] Джандубаев А.-З. Р., Алиев И.И. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике. Черкесск: БИЦ СевКавГГА, 2014. – 137 с.
- [7] Доманова Е.Д. Матричная экспонента. Теория и практика. Новосибирск: НГУ, 2020. – 237 с.
- [8] Мартынов В.А., Голубев А.Н. Матричные методы анализа электрических и магнитных цепей. Иваново: ИГЭУ, 2017. – 148 с.

- [9] Овсянников А.Я. Дополнительные главы теории матриц. Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 107 с.
- [10] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2023. – 831 с.
- [11] Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. СПб.: Питер, 2003. – 463 с.
- [12] Ким К.К., Корнев А.С., Ткачук А.А., Шпилев М. А. Руководство к решению задач по основам теории электрических цепей. С.-Пб.: ПГУПС, 2015. – 68 с.
- [13] Матвиенко В.А. Основы теории цепей. Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 162 с.
- [14] Осипов Ю.М., Борисов П.А. Методы расчета линейных электрических цепей. СПб.: ИТМО, 2012. – 120 с.
- [15] Денисова А.В. Применение операторного метода и метода переменных состояния для расчета переходных процессов. Методические указания. СПб.: ИТМО, 2012. – 105 с.
- [16] Доброжанова Н.И., Раимова А.Т. Расчет переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами. Оренбург: ОГУ, 2014. – 43 с.
- [17] Батюков С.В., Иваницкая Н.А., Шилин Л.Ю. Теория электрических цепей. Минск: БГУИР, 2012. – 116 с.

References

- [1] G.S. Zinoviev, *Silovaya elektronika [Power Electronics]*. Moscow: Yurayt, 2018 (in Russian).
- [2] S.N. Makarov, R. Ludwig and S.J. Bitar, *Practical Electrical Engineering*. Washington: Worcester Polytechnic Institute, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2
- [3] Yu. Skorokhod, D. Philin and S.Volskiy, “Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction”, in proc. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic, pp. 133-137. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [4] V.B. Terekhin and Yu.N. Dementiev, *Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink [Computer simulation of prospective and prospective current electric drive systems in Simulink]*. Moscow: Yurayt, 2022 (in Russian).
- [5] I.V. Chernykh, *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow: DMK Press, 2008 (in Russian).
- [6] A.-Z.R. Dzhendubaev and I.I. Aliev, *MATLAB, Simulink i SimPowerSystems v elektroenergetike [MATLAB, Simulink and SimPowerSystems in the electric power industry]*. Cherkessk: BIC SevKavGGTA, 2014 (in Russian).
- [7] E.D. Domanova, *Matrichnaya eksponenta. Teoriya i praktika [Matrix exponent. Theory and practice]*. Novosibirsk: NSU, 2020 (in Russian).
- [8] V.A. Martynov and A.N. Golubev, *Matrichnye metody analiza elektricheskikh i magnitnyh cepej [Matrix methods for the analysis of electrical and magnetic circuits]*. Ivanovo: ISPU, 2017 (in Russian).
- [9] A.Ya. Ovsyannikov, *Dopolnitel'nye glavy teorii matric [Additional chapters of matrix theory]*. Yekaterinburg: UrFU, 2020 (in Russian).

-
- [10] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie cepej [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]*. Moscow: Yurayt, 2023 (in Russian).
- [11] K.S. Demirchyan, L.R. Neiman, N.V. Korovkin and V.L. Chechurin, *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*. St. Petersburg: Peter, 2003 (in Russian).
- [12] K.K. Kim, A.S. Kornev, A.A. Tkachuk and M.A. Shpilev, *Rukovodstvo k resheniyu zadach po osnovam teorii elektricheskikh cepej [Guidelines for solving problems on the basics of the theory of electrical circuits]*. St. Petersburg: PGUPS, 2015 (in Russian).
- [13] V.A. Matvienko, *Osnovy teorii cepej [Fundamentals of the theory of circuits]*. Yekaterinburg: UrFU, 2016 (in Russian).
- [14] Yu.M. Osipov and P.A. Borisov, *Metody rascheta linejnykh elektricheskikh cepej [Methods for calculating linear electrical circuits]*. St. Petersburg: ITMO, 2012 (in Russian).
- [15] A.V. Denisova, *Primenenie operatornogo metoda i metoda peremennykh sostoyaniya dlya rascheta perekhodnykh processov. Metodicheskie ukazaniya [Application of the operator method and the method of state variables for the calculation of transient processes. Methodical instructions]*. St. Petersburg: ITMO, 2012 (in Russian).
- [16] N.I. Dobrozhanova and A.T. Raimova, *Raschet perekhodnykh processov v elektricheskikh cepeyah s sosredotochennymi parametrami [Calculation of transient processes in electrical circuits with lumped parameters]*. Orenburg: OGU, 2014 (in Russian).
- [17] S.V. Batyukov, N.A. Ivanitskaya and L.Yu. Shilin, *Teoriya elektricheskikh cepej [Theory of electrical circuits]*. Minsk: BSUIR, 2012 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Корнев Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургского государственного
морского технического университета,
г. Санкт-Петербург, Российская
Федерация

Alexander S. Kornev, Dr. Sci. (Eng.),
professor of the State Marine Technical
University, Saint-Petersburg, Russian
Federation

Кузнецов Николай Владимирович,
член-корреспондент РАН, доктор
физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
Санкт-Петербургского государственного
морского технического университета,
г. Санкт-Петербург, Российская
Федерация

Nikolay V. Kuznetsov, Corresponding
member of RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
professor, head of the department of
the State Marine Technical University,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Вольский Сергей Иосифович,
доктор технических наук, профессор
Московского авиационного института
(Национальный исследовательский
университет), г. Москва, Российская
Федерация

Sergey I. Volskiy, Dr. Sci. (Eng.),
professor of the Moscow Aviation
Institute (National Research
University), Moscow, Russian
Federation

Викулов Илья Павлович,
кандидат технических наук, доцент
Петербургского государственного
университета путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-
Петербург, Российская Федерация

Илья P. Vikulov, Cand. Sci. (Eng.),
associate professor of the Emperor
Alexander I St. Petersburg State
Transport University, Saint-Petersburg,
Russian Federation

УДК 541.138.2

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_21

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ДОБАВОК НА ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СРОК СЛУЖБЫ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Ю.Л. ГунькоORCID: 0000-0002-9094-2477 e-mail: gunko.ul@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***А.А. Бачаев**ORCID: 0000-0002-8815-1342 e-mail: bachaev_tep@list.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***В.А. Козырин**ORCID: 0000-0002-6190-0067 e-mail: kozyrin.v@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***О.Л. Козина**ORCID: 0000-0002-9284-7465 e-mail: cn-gunko2008@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***Е.Н. Васин**ORCID: 0000-0003-1565-7286 e-mail: eugeny.vasin-evg2017@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

Приведены результаты исследований, показывающих, что некоторые добавки в электролит или активную массу никель-цинковых аккумуляторов увеличивает срок службы источников тока. Это позволяет использовать для питания различных энергетических систем НЦ-аккумуляторы вместо дорогостоящих литий-ионных источников тока. Показано, что повышение скорости растворения оксида цинка в щелочном растворе и увеличение поляризуемости катодного восстановления цинкатных ионов в щелочном растворе приводят к более длительному поддержанию высокой концентрации цинката калия у поверхности пористого цинкового электрода, снижает вероятность возникновения коротких замыканий и стабилизирует емкость аккумуляторов при длительном циклировании. Рассмотрено влияние доба-

вок серии БЦ, обладающей указанными свойствами, на возникновение коротких замыканий и стабилизацию емкости никель-цинковых аккумуляторов при их длительном циклировании.

Ключевые слова: дендриты, диффузия, емкость, короткие замыкания, никель-цинковый аккумулятор, поляризация, срок службы, цинкатный электролит, цинковый электрод.

Для цитирования: Гунько Ю.Л., Бачаев А.А., Козырин В.А., Козина О.Л., Васин Е.Н. Влияние некоторых добавок на емкостные характеристики и срок службы никель-цинковых аккумуляторов // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 21-35. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_21

INFLUENCE OF SOME ADDITIVES ON CAPACITY CHARACTERISTICS AND SERVICE LIFE OF NICKEL-ZINC BATTERIES

Yu.L. Gunko

ORCID: **0000-0002-9094-2477** e-mail: **gunko.ul@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Bachaev

ORCID: **0000-0002-8815-1342** e-mail: **bachaev_tep@list.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Kozyrin

ORCID: **0000-0002-6190-0067** e-mail: **kozyrin.v@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

O.L. Kozina

ORCID: **0000-0002-9284-7465** e-mail: **cn-gunko2008@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

E.N. Vasin

ORCID: **0000-0003-1565-7286** e-mail: **eugeny.vasin-evg2017@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. It is shown that use of certain additives in electrolyte or active mass of nickel-zinc batteries increases the lifetime of current sources. This makes possible using of nickel-zinc batteries instead of expensive lithium-ion current sources to supply various energy systems. A study of the influence of additives on the occurrence of short circuits and the stability of the capacitive characteristics of nickel-zinc batteries is presented. It is shown that an increase of dissolution rate of zinc oxide in an alkaline solution and an increase in the polarizability of the cathodic reduction of zincate ions in an alkaline solution lead to a longer maintenance of a high concentration of potassium zincate at the surface of a porous zinc electrode, reduces the probability of short circuits and stabilizes the battery capacity during long-term cycling. The effect of additives of the BC series with unique properties on the occurrence of short circuits and capacity stabilization of nickel-zinc batteries during their long-term cycling is considered.

Keywords: capacitance, dendrites, diffusion, nickel-zinc battery, polarization, service life, short circuits, zinc electrode, zincate electrolyte.

For citation: Yu.L. Gunko, A.A. Bachaev, V.A. Kozyrin, O.L. Kozina and E.N. Vasin, «Influence of some additives on capacity characteristics and service life of nickel-zinc batteries», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 21-35, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_21

I. Введение

В настоящее время для питания различных бытовых устройств и транспортных средств распространены литий-ионные источники тока. Однако в последние годы внимание исследователей снова привлекли Ni-аккумуляторы, которые, по мнению ряда авторов, могут найти широкое применение, включая беспроводные бытовые электроинструменты, мобильные телефоны, цифровые камеры, легковые автомобили [1].

Электрические характеристики Ni-аккумуляторов вполне соизмеримы с некоторыми типами литиевых источников тока, например, с литий-железо-фосфатными [2]. Это связано с их малой стоимостью, доступностью компонентов активных масс электродов и электролита, безопасностью при эксплуатации. Необходимо отметить и более простую и дешевую утилизацию вышедших из строя никель-цинковых аккумуляторов и элементов по сравнению с литиевыми.

Среди источников тока с водным электролитом высокими удельной емкостью и разрядным напряжением обладают серебряно-цинковые (СЦ) и никель-цинковые аккумуляторы (Ni), а также воздушно-цинковые источники тока [2]. Такие источники тока имеют давнюю историю, они были широко распространены во второй половине XX в. С появлением источников тока с неводными электролитами, например, литиевых, электрохимических топливных элементов, обладающих более высокими электрическими характеристиками и большим сроком службы, их применение в значительной степени сократилось. Однако в начале XXI в. вновь отмечается повышение интереса к

таким традиционным электрохимическим системам, в частности к никель-цинковым источникам тока [3]. Благодаря хорошей работоспособности при больших разрядных токах источники тока такой системы могут использоваться в качестве стартерных аккумуляторов, а также для питания различных бытовых устройств. Более активному возвращению традиционных щелочных источников тока к массовому потребителю может способствовать повышение их эксплуатационных характеристик, в первую очередь, срока их службы.

Выход из строя щелочно-цинковых аккумуляторов обусловлен рядом причин, например, перемещением активного вещества в теле отрицательного электрода и укрупнением частиц активного вещества, что приводит к уменьшению электрохимически активной поверхности и соответственно к постепенному снижению емкости. Однако следует отметить, что этот фактор проявляется при длительном циклировании аккумуляторов [2] и в значительной степени предсказуем. В то же время возникновение коротких замыканий зачастую происходит спонтанно, часто при невыработанном сроке службы аккумулятора [4].

Все вышесказанное определило постановку цели работы: выявление причин появления внутренних коротких замыканий, поиск мероприятий по их устранению и стабилизация емкости никель-цинковых источников тока при их длительном циклировании.

Нормальная эксплуатация никель-цинковых аккумуляторов связана с образованием на отрицательном электроде губчатых осадков [5]. Причины кристаллизации цинка в виде рыхлых и дендритных катодных осадков исследовались в работах [6, 7]. Значительное число исследований посвящено влиянию различных добавок на склонность к дендритообразованию при заряде щелочно-цинковых аккумуляторов. Так, в [8] показано, что добавка свинца может значительно тормозить образование и рост дендритов цинка.

Возникновение внутренних градиентов концентраций по ионам гидроксида и цинката будет, кроме создания условий для роста дендритов цинка, также способствовать переносу активного материала отрицательного электрода и соответственно уменьшению емкости при циклировании аккумулятора [9].

Однако полностью решить проблемы возникновения внутренних коротких замыканий щелочно-цинковых аккумуляторов из-за образования дендритов цинка и снижения емкости при длительном циклировании аккумуляторов в настоящее время не удалось. Это может быть связано с недостаточными знаниями особенностей восстановления оксида цинка в условиях минимального объема щелочно-цинкатного электролита, наличия полупроницаемого гидратцеллюлозного сепаратора на отрицательном электроде и плотной сборки электродного блока. В такой ситуации невозможно

осознанно подойти к выбору добавок и условий заряда, улучшающих работоспособность отрицательного электрода никель-цинковых аккумуляторов.

II. Экспериментальная часть

При эксплуатации никель-цинковых аккумуляторов происходят значительные изменения концентрации щелочи и цинката в электролите оксидноникелевого и цинкового электродов при заряде и разряде [10, 11]. Возникновение таких концентрационных градиентов по щелочи и цинкату калия между пространствами положительного и отрицательного электродов и в теле самих электродов может являться причиной выхода из строя длительно циклирующихся аккумуляторов из-за возникновения при заряде межэлектродных замыканий в виде цинковых дендритов, прорастающих через гидратцеллюлозную сепарацию. Кроме этого, появление внутриэлектродных градиентов концентрации щелочи и цинката калия может приводить к внутри- и внеэлектродному массопереносу активного вещества цинкового электрода и уменьшению его емкости.

Рост цинковых дендритов через гидратцеллюлозный сепаратор в направлении положительного электрода связан с особенностями диффузионных потоков реагирующих ионов цинката. Преимущественное восстановление цинкатных ионов в поверхностных слоях электрода приведет к сильному снижению концентрации цинката калия из-за расходования здесь основной массы оксида цинка (рис. 1).

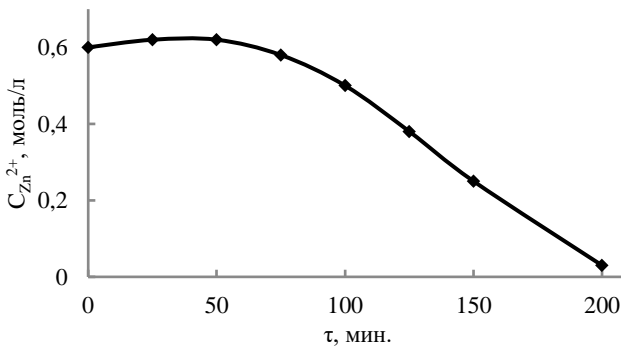


Рис. 1. Изменение концентрации цинката калия у поверхности цинкового электрода при заряде НЦ-аккумулятора:

плотность тока $-15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Электролит $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{ KOH} + \text{ZnO}_{\text{насыщ}}$

Fig. 1. The change of the concentration of potassium zincate at the surface of the zinc electrode when charging a nickel-zinc battery:

current density $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Electrolyte $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{ KOH} + \text{ZnO}_{\text{sat}}$

Это приводит к интенсификации диффузии цинкатоных ионов из глубинных зон отрицательного электрода и внеэлектродного пространства через сепарацию. Рост дендритных осадков цинка происходит по направлению к зонам электролита, богатым цинкатом калия. Перенос цинката из глубинных зон электрода приводит к перемещению активного вещества при заряде во внешние зоны оксидноцинкового электрода. Замедленная диффузия цинката калия из зоны положительного электрода через гидратцеллюлозный сепаратор приведет к постепенному прорастанию цинковых дендритов и возникновению внутренних коротких замыканий в аккумуляторе.

Поддержание достаточной концентрации цинката в поверхностных зонах электрода в конце заряда может быть достигнуто как путем равномерного распределения тока по глубине электрода за счет увеличения поляризуемости процесса восстановления ионов цинката, так и за счет интенсификации диффузионного переноса цинката калия из глубинных зон электрода за счет поддержания там длительного времени его высокой концентрации. Последнее связано с увеличением скорости гетерогенной химической реакции растворения оксида цинка в образующемся избытке щелочи при восстановлении цинката. В этом случае наблюдается катодное осаждение предпочтительно губчатых, а не дендритных отложений цинка [12]. Поэтому можно предположить, что добавки в электролит или в активную массу отрицательного электрода, ускоряющие растворение оксида цинка в порах электрода, будут способствовать и замедлению прорастания цинковых дендритов через сепарацию при заряде щелочно-цинкового источника тока.

На кафедре ТЭП НГТУ (ГПИ) [13, 14] проводились исследования влияния некоторых добавок, применяемых для улучшения качества цинковых покрытий из щелочных электролитах, на характер образующихся гальванических осадков цинка. Наибольший интерес представляли добавки серии БЦ на основе бензилникотиновой кислоты и триэтаноламина (БЦ-1, НБЦ-М). Изучение влияния этих добавок на характеристики порошковых цинковых электродов показало улучшение работоспособности порошковых цинковых электродов в их присутствии [15]. Однако механизм действия таких улучшающих добавок в указанных работах не приводился, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований.

По результатам этих исследований отмечено существенное ускорение растворения оксида цинка в растворе калиевой щелочи в присутствии БЦ (рис. 2). Так в щелочи концентрацией $7 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$, содержащей $5 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ добавки БЦ-1, начальная скорость растворения оксида цинка примерно в 1,6 раза больше, чем в щелочном растворе без добавки.

Добавки БЦ также заметно изменяют характер катодных поляризационных зависимостей восстановления цинката в щелочно-цинкатных растворах (рис. 3). Отмечается некоторое торможение процесса катодного выделения цинка в присутствии добавки БЦ-1.

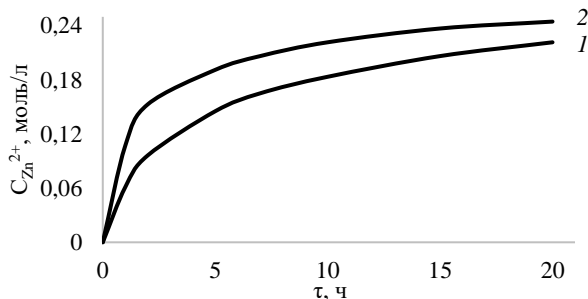


Рис. 2. Зависимость концентрации цинката калия во времени при растворении оксида цинка в щелочи.
 Состав электролита: $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$: 1 – без добавок; 2 – $5 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1

Fig. 2. Dependence of the concentration of potassium zincate in time during the dissolution of zinc oxide in alkali.

The composition of electrolyte: $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$:
 1 – without additives; 2 – $5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1

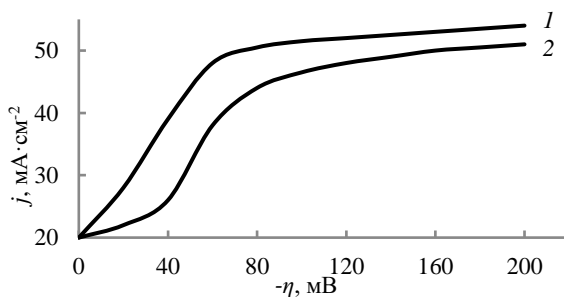


Рис. 3. Катодные потенциодинамические зависимости восстановления цинката на монолитном цинковом электроде.

Состав электролита $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1} + 0,64 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1} \text{ K}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$:

1 – без добавок; 2 – $5 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1.

Скорость развертки потенциала – $1,0 \text{ мВ}\cdot\text{с}^{-1}$

Fig. 3. Cathodic potentiodynamic dependences of zinc reduction on a monolithic zinc electrode.

Electrolyte composition $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} + 0,64 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} \text{ K}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$

1 – without additives; 2 – $5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1. Potential sweep rate $1.0 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$

Повышение электрических характеристик пористых цинковых электродов и, соответственно, всего никель-цинкового аккумулятора при введении предложенных добавок серии БЦ увеличивает поляризацию катодного восстановления оксида цинка и скорость его растворения в щелочных растворах обосновано в работе [16]. Введение добавки НБЦ-М в электролит НЦ-аккумуляторов затрудняет процесс катодного восстановления оксида цинка и увеличивает электродную поляризацию порошковых отрицательных электродов при заряде на начальных этапах эксплуатации никель-цинковых аккумуляторов (рис. 4).

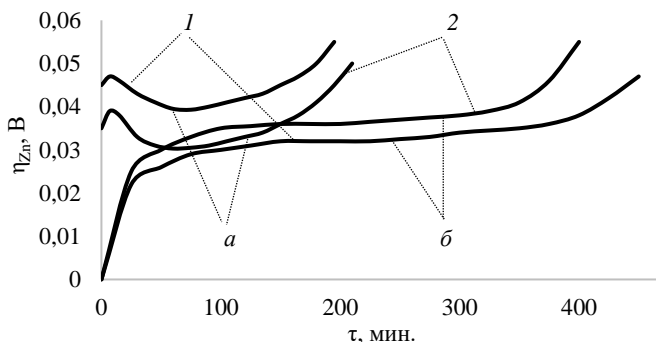


Рис. 4. Изменение потенциала цинкового электрода при заряде никель-цинкового аккумулятора при плотностях тока 15 (а); 6 (б) $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Добавка в активной массе Zn-электрода:

1- 3 % раствор НБЦ-М; 2-3 % раствор поливинилового спирта

Fig. 4. Change of the potential of the zinc electrode when charging a nickel-zinc battery at current densities 15 (a); 6 (b) $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Additive in the active mass of zinc electrode:

1- 3 % solution of NBC-M; 2-3 % solution of polyvinyl alcohol

Такое повышение поляризации способствует развитию поверхности активного вещества отрицательного электрода при заряде аккумулятора. Однако такое развитие поверхности в итоге приводит уменьшению истинной плотности зарядного тока и проявляется уже в снижении зарядного потенциала пористого цинкового электрода. Данный эффект сохраняется и при малых токах заряда. Прямые измерения концентрации цинката калия у поверхности пористого цинкового электрода в условиях заряжающегося НЦ-аккумулятора показали, что введение в электролит добавки НБЦ-М приводит к более длительному сохранению повышенного содержания цинката калия из-за увеличения скорости растворения оксида цинка в щелочи (рис. 5).

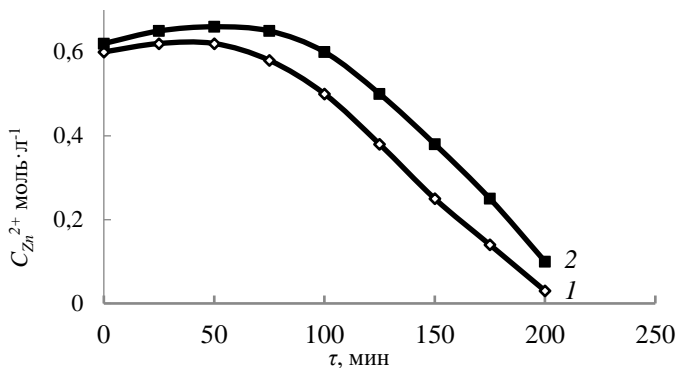


Рис. 5. Изменение концентрации цинката калия у поверхности оксидно-цинкового электрода при заряде НЦ-аккумулятора.

Состав электролита: KOH 7 моль·л⁻¹ + ZnO_{насыщ.}

1 – без добавок; 2 – 5 г·л⁻¹ БЦ-1 Плотность тока 15 мА·см⁻²

Fig. 5. Change of the concentration of potassium zincate at the surface of the zinc oxide electrode during of the charging of battery.

Electrolyte composition KOH 7 mol·l⁻¹ + ZnO_{sat}:

1 – without additives; 2 – 5 ml·l⁻¹ BC-1. Current density 15 mA·cm⁻²

В условиях НЦ-аккумулятора из-за неэквивалентного по емкости количеств активных веществ в положительном и отрицательном электродах заряд цинкового электрода прекращается при степени заряженности активного вещества 35-40 %, что соответствует области высокой концентрации цинката калия у поверхности отрицательного электрода (рис. 6). Это должно способствовать длительному сохранению достаточно большого количества оксида цинка и, соответственно, поддержанию высокой концентрации цинката у поверхности заряжающегося пористого цинкового электрода. Однако из-за различия в отдачах по току положительного и отрицательного электродов никель-цинкового аккумулятора через некоторое количество циклов цинковый электрод еще до окончания заряда положительного электрода оказывается полностью заряженным. Это приводит к резкому падению скорости наработки цинката калия и соответственно способствует образованию дендритных осадков и возникновению внутренних замыканий.

Таким образом, увеличение скорости реагирования оксида цинка со щелочью в присутствии добавки БЦ-1 и повышение поляризации при катодном восстановлении цинкатных ионов приводит к более длительному поддержанию высокой концентрации цинката в поверхностных зонах электрода (рис. 5) и, соответственно, может замедлить рост дендритных осадков

через сепарацию во внеэлектродное пространство с повышенным содержанием цинката. Прямые опыты по определению времени прорастания дендритов цинка через два слоя гидратцеллюлозной сепарации после полного заряда порошкового цинкового электрода, проведенные на специальной ячейке [4], показали, что время появления межэлектродных замыканий в присутствии в электролите аккумулятора добавки БЦ-1 увеличивается почти в полтора раза с 88 до 125 мин.

Такое влияние добавки БЦ-1 позволило увеличить срок службы макетов НЦ-аккумуляторов – у контрольных аккумуляторов внутренние короткие замыкания наблюдались уже на 35-37 циклах, у опытных аккумуляторов – на 50-60 циклах. Исследуемая добавка БЦ-1, увеличивая скорость растворения оксида цинка и поляризуемость катодного процесса, привела к повышению срока службы НЦ-аккумуляторов и стабилизации их емкости при циклировании (табл. 1).

Таблица 1.
Влияние добавок в активной массе цинкового электрода на емкостные характеристики макетов НЦ-аккумуляторов при циклировании. Плотность тока 15 мА/см²

Table 1.
Influence of additives in the active mass of zinc electrode on the capacitance characteristics of samples of batteries during cycling. Current density 15 mA·cm²

№	Содержание добавок в активной массе, масс. %		Емкость цинкового электрода, А·ч	
	Связующее поливиниловый спирт	Добавка БЦ-1	10 цикл	60 цикл
1	7	-	0,50	0,26
2	-	6	0,52	0,41

Стабилизация емкости цинковых аккумуляторов наблюдается как при малых, так и при больших разрядных плотностях тока. При малых плотностях разрядного тока к шестидесятому циклу падение емкости для контрольных аккумуляторов составило около 40 %, в то время как в присутствии добавки БЦ-1 емкость цинкового электрода НЦ-аккумулятора уменьшилась на 20 %. При плотности разрядного тока 34 мА·см⁻² разница в емкостях контрольных и опытных аккумуляторов составила уже около 40 %.

Повышение работоспособности цинкового электрода в присутствии добавки БЦ-1 привело к более редкому проведению периодических глубоких разрядов и, соответственно, улучшило разрядные характеристики положительного оксидноникелевого электрода, в том числе, при разрядах большими плотностями тока (рис. 6).

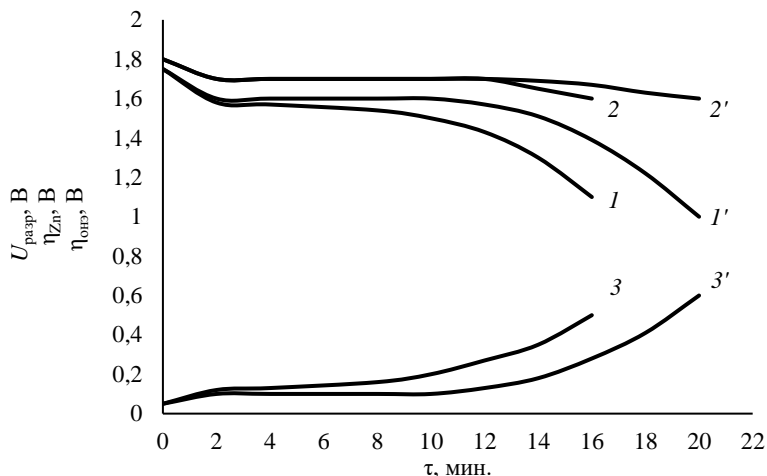


Рис. 6. Разрядные кривые цинковых и оксидоникелевых электродов и разрядного напряжения макетов НЦ-аккумуляторов на 30 цикле.
*Плотность разрядного тока $62 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Состав электролита $\text{KOH } 7 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$:
 1, 2, 3 – без добавок; 1', 2', 3' – $5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ БЦ-1*

Fig. 6. Discharge curves of zinc and nickel oxide electrodes and discharge voltage of prototypes of NC batteries at cycle 30. Discharge current density $62 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.
*Electrolyte composition: $\text{KOH } 7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$:
 1, 2, 3 – without additives; 1', 2', 3' – $5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ BC-1*

Таким образом, обеспечение максимального срока службы никель-цинковых аккумуляторов и стабильной разрядной емкости на протяжении большого количества зарядно-разрядных циклов возможно при введении в электролит или в состав активной массы источника тока добавок, повышающих скорость растворения оксида цинка в щелочном растворе и увеличивающих катодную поляризацию процесса восстановления цинката калия.

III. Выводы

Благодаря введению в электролит и активную массу никель-цинковых аккумуляторов добавок серии БЦ срок службы источников тока увеличивается. Это расширяет возможности применения НЦ-аккумуляторов вместо литий-ионных источников тока для питания различных энергетических объектов. Поддержание высокой концентрации цинката калия у поверхности заряжающегося цинкового электрода снижает вероятность возникновения внутренних коротких замыканий при циклировании щелочно-цинковых аккумуляторов.

Исследовано влияние добавок серии БЦ (БЦ-1, БЦ-М) на характеристики никель-цинковых аккумуляторов. Показано замедление роста дендритов цинка за счет увеличения скорости растворения оксида цинка в щелочном растворе в присутствии указанных добавок.

Добавки серии БЦ (БЦ-1, БЦ-М), введенные в электролит, повышают поляризуемость процесса восстановления цинката калия, что приводит к стабилизации емкости при циклировании никель-цинковых аккумуляторов, особенно при больших разрядных токах.

© Гунько Ю.Л., 2023

© Бачасв А.А., 2023

© Козырин В.А., 2023

© Козина О.Л., 2023

© Васин Е.Н., 2023

Поступила в редакцию 17.02.2023

Принята к публикации 21.03.2023

Received 17.02.2023

Accepted 21.03.2023

Библиографический список

- [1] Melhem Z. Electricity transmission, distribution and storage systems. Woodhead Publishing, 2013. – 512 p.
- [2] Коровин Н.В., Скундин А.М. Химические источники тока. М. МЭИ, 2003. – 740 с.
- [3] «Астерpower». Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://астерpower.ru/> (дата обращения 02.02.2023).
- [4] Шапот М.Н., Левенфиш П.Г., Левин Н.И., Кочетова Т.И. Исследование причин коротких замыканий в серебряно-цинковом аккумуляторе // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1970. С. 124-132.
- [5] Решетова Г.Н., Афанасьева Н.А., Архангельская З.П. Влияние условий осаждения губчатого цинка на свойства пористого электрода // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1969. С.150-157.
- [6] Diggle J.W., Despic A.R., Bockris J.O. The mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc // Journal of The Electrochemical Society. 1969. № 116 (11). P. 1503-1513. DOI: 10.1149/1.2411588
- [7] Кудрявцев Н.Т. Причины образования губчатых осадков цинка на катоде // Доклады АН СССР. 1950. № 72 (1). С. 93-97.
- [8] Diggle J.M., Danijanović A. The inhibition of the dendritic electrocrystallization of zinc from doped alkaline zincate solutions // Journal of The Electrochemical Society. 1972. № 119 (12). P. 1649-1658. DOI: 10.1149/1.2404065
- [9] Архангельская З.П., Иванов Е.Г., Котоусов С.Г., Неуворужева Е.М. Серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые источники тока на современном этапе развития // Сборник работ по ХИТ. Ленинград: Энергия, 1974. С. 249-268.

- [10] Гунько Ю.Л., Пасманик Е.В., Михаленко М.Г. Моделирование процесса разряда никель-цинкового аккумулятора // IX Всесоюз. конф. «Химическая информатика», Январь 11-15, 1992. Черноголовка, Россия: РАН, Институт физиологии активных веществ, 1992. С. 286.
- [11] Козырин В.А., Гунько Ю.Л., Михаленко М.Г. Моделирование процесса заряда пористого оксидно-цинкового электрода щелочноцинкового аккумулятора // IX Всесоюз. конф. «Химическая информатика», Январь 11-15, 1992. Черноголовка, Россия: РАН, Институт физиологии активных веществ, 1992. С. 289.
- [12] Mojtahedi M., Goodarzi M., Sharifi B., Khaki J. Effect of electrolysis condition of zinc powder production on zinc-silver oxide battery operation // *Energy Conversion and Management*. 2011. № 52 (4). P. 1876-1880. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.11.001
- [13] Меркулов А.В., Флеров В.Н., Страхов Н.Л., Быкадоров А.Т., Пятин Б.П. Электролит цинкования, Пат. 876799 SU, заявл. 29.12.79; опубл. 30.10.81. – Бюл. № 40.
- [14] Андрухив А.И., Бачасв А.А., Скобелева И.В. Оптимизация состава цинкатного электролита для получения электролитически осажденных порошковых цинковых электродов // *Журнал прикладной химии*. 2013. № 86 (10). С. 1525-1534. DOI: 10.1134/S1070427213100042
- [15] Козырин В.А., Гунько Ю.Л., Михаленко М.Г. Стабилизация характеристик порошковых цинковых электродов щелочно-цинковых аккумуляторов // *Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики*, Саратов: Изд-во СГУ, 1999. С. 197-198.
- [16] Гунько Ю.Л., Козырин В.А., Козина О.Л., Ананьева Е.Ю., Михаленко М.Г. Катодное восстановление оксида цинка в щелочном электролите // *Электрохимия*. 2022. № 58 (1). С. 13-27. DOI: 10.31857/S0424857022010054
- [17] «Лиотех» Официальный сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.liotech.ru/> (дата обращения 02.02.2023).

References

- [1] Z. Melhem, *Electricity transmission, distribution and storage systems*. Woodhead Publishing, 2013.
- [2] N.V. Korovin and A.M. Skundin, *Himicheskie istochniki toka. Spravochnik [Chemical current sources]*. Moscow: MEI, 2003 (in Russian).
- [3] Oficial'nyj sajt kompanii «AcmePower» [Official site of the AcmePower company]. [Online]. Available at: <http://acmepower.ru/> [Accessed: Feb. 2, 2023] (in Russian).
- [4] M.N. Shapot, P.G. Levenfish, N.I. Levin and T.I. Kochetova, “Issledovanie prichin korotkih замыkanij v serebryano-cinkovom akkumulyatore [Study of the causes of short circuits in a silver-zinc battery]”, in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works on HIT]*, Leningrad: Energiya, 1970, pp. 124-132 (in Russian).
- [5] G.N. Reshetova, N.A. Afanasyeva and Z.P. Arkhangelskaya, “Vliyanie uslovij osazhdeniya gubchatogo cinka na svoystva poristogo elektroda [Influence of the deposition conditions of spongy zinc on the properties of a porous electrode]”, in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works of HIT]*, Leningrad: Energiya, 1969, pp.150-157 (in Russian).

- [6] J.W. Diggle, A.R. Despic and J.O. Bockris, "The mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 116, no. 11. pp. 1503-1513, Nov. 1969. DOI: 10.1149/1.2411588.
- [7] N.T. Kudryavtsev, "Prichiny obrazovaniya gubchatykh osadkov cinka na katode [Reasons for the formation of spongy zinc deposits on the cathode]", *Reports of the USSR Academy of Sciences*, vol. 72, no.1. pp. 93-97, Jan. 1950.
- [8] J.W. Diggle, A. Danijanović, "The inhibition of the dendritic electrocrystallization of zinc from doped alkaline zincate solutions", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 119, no. 12. pp. 1649-1658, Dec. 1972. DOI: 10.1149/1.2404065
- [9] Z.P. Arkhangelskaya, E.G. Ivanov, S.G. Kotousov and E.M. Neuvorueva "Serebryano-cinkovye i serebryano-kadmievye istochniki toka na sovremennom etape razvitiya [Silver-zinc and silver-cadmium current sources at the present stage of development]", in *Sbornik rabot po HIT [Collection of works of HIT]*, Leningrad: Energiya, 1974, pp. 249-268 (in Russian).
- [10] Yu.L. Gunko, E.V. Pasmanik and M.G. Mikhalenko, "Modelirovanie processa razryada nikel'-cinkovogo akkumulyatora [Modeling the process of discharging a nickel-zinc battery]", in proc. IX Vsesoyuz. konf. "Himicheskaya informatika" [IX All-Union. conf. "Chemical informatics"], Jan. 11-15, 1992, Chernogolovka, Russia, p. 286 (in Russian).
- [11] V.A. Kozyrin, Yu.L. Gunko, and M.G. Mikhalenko, "Modelirovanie processa zaryada poristogo oksidno-cinkovogo elektroda shchelochnocinkovogo akkumulyatora [Modeling of the process of charging a porous zinc oxide electrode of an alkaline zinc battery]", in proc. IX Vsesoyuz. konf. "Himicheskaya informatika" [IX All-Union. conf. "Chemical Informatics"], Jan. 11-15, 1992, Chernogolovka, Russia, p. 289 (in Russian).
- [12] M. Mojtahedi, M. Goodarzi, B. Sharifi and J. Khaki, "Effect of electrolysis condition of zinc powder production on zinc-silver oxide battery operation", *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4. pp. 1876-1880, Apr. 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.11.001
- [13] A.V. Merkulov, V.N. Flerov, N.L. Strakhov, A.T. Bykadorov and B.P. Pyatin, "Electrolite tincovaniya [Galvanizing electrolyte]", Patent SU 876799, Oct. 30, 1981 (in Russian).
- [14] A.I. Andrukhiy, A.A. Bachaev and I.V. Skobeleva, "Optimization of the composition of zincate electrolyte for fabrication of electrodeposited zinc powder electrolytes", *Journal of Applied Chemistry*, vol. 86, no. 10, pp. 1525-1534, 2013. DOI: 10.1134/S1070427213100042
- [15] V.A. Kozyrin, Yu.L. Gunko and M.G. Mikhalenko, "Stabilizaciya harakteristik poroshkovykh cinkovykh elektrodov shchelochno-cinkovykh akkumulyatorov [Stabilization of the characteristics of zinc powder electrodes in alkaline zinc batteries]", in *Fundamental'nye problemy elektrohimicheskoy energetiki [Fundamental problems of electrochemical energy]*, Saratov: Publishing House of Saratov State University, 1999, pp. 197-198 (in Russian).
- [16] Yu.L. Gunko, V.A. Kozyrin, O.L. Kozina, E.Yu. Ananyeva and M.G. Mikhalenko, "Cathodic reduction of zinc oxide in an alkaline electrolyte", *Electrochemistry*, vol. 58, no. 1, pp. 13-27, 2022. DOI: 10.31857/S0424857022010054

- [17] Official'nyj sajt kompanii "Liotech" [Official site of the Liotech company]. [Online]. Available at: <https://www.liotech.ru/> [Accessed: Feb. 2, 2023] (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Yuri L. Gun'ko, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Бачаев Александр Андреевич,
кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

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

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

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

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

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

Васин Евгений Николаевич,
ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Eugeny N. Vasin, assistant of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Е.Л. Рыжова

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта при использовании различных систем накопления энергии, в первую очередь, рекуперативной энергии торможения. Актуальность работы определена тем, что на электрифицированных участках железных дорог недостаточно реализован потенциал рекуперативного торможения. Главная причина – отсутствие регенерационных приемников энергии, в результате чего наблюдается повышение уровня напряжения в контактной сети выше допустимых норм, что вызывает ряд негативных последствий, включая прекращение процесса рекуперации и снижение уровня безопасности движения поездов. Соответственно, встает задача разработки технических и технологических решений, повышающих энергетическую эффективность железной дороги и безопасности движения поездов. Представлены основные возможности энергосбережения на железнодорожном транспорте с использованием различных типов накопителей энергии, наиболее перспективным из которых является использование гибридных накопителей энергии. Сделан вывод о необходимости мер для дальнейшего роста экологичности и энергетической эффективности железнодорожного электротранспорта путем внедрения самых современных инновационных систем накопления энергии. Решение задачи предполагает правильный подбор накопителей энергии, выполнение необходимых расчетов и моделирования с учетом всех особенностей эксплуатации.

Ключевые слова: аккумуляторные батареи, железнодорожный транспорт, рекуперативная энергия торможения, системы накопления энергии, суперконденсаторы, топливные элементы, экологичность, энергетическая эффективность.

Для цитирования: Рыжова Е.Л. Повышение энергоэффективности на железнодорожном транспорте путем применения систем накопления энергии // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 36-48.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_36

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN ROAD TRANSPORT BY USING ENERGY STORAGE SYSTEMS

E.L. Ryzhova

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article discusses the importance of increasing the energy efficiency of railway transport using various energy storage systems and, first of all, regenerative braking energy. The potential of regenerative braking on electrified sections of railways is not fully realized. The main reason for this is the lack of regenerative energy receivers, as a result of which there is an increase in the voltage level in the contact network above the permissible norms, which causes a number of negative consequences, including the termination of the recovery process and a decrease in the train safety level. The most important research task is the development of solutions aimed at improving the energy efficiency of the railway and train safety. The paper analyzes and summarizes the data of scientific and technical literature, presents the main possibilities for energy saving in railway transport using various types of energy storage devices. The most promising direction is the use of hybrid energy storage devices. Thus, there is a need to develop measures to further increase the environmental friendliness and energy efficiency of railway electric transport through the introduction of the most modern innovative energy storage systems. To solve this problem, it is necessary to correctly select energy storage devices, perform the necessary calculations and modeling, taking into account all the features of their operation.

Keywords: batteries, energy efficiency, energy storage systems, environmental friendliness, fuel cells, railway transport, regenerative braking, supercapacitors.

For citation: E.L. Ryzhova, «Improving energy efficiency in road transport by using energy storage systems», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 36-48, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_36

I. Введение

Железнодорожное транспортное сообщение – одна из наиболее энергоэффективных отраслей экономики, а железная дорога – самый экологичный вид транспорта, имеющий значительный энергосберегающий потенциал. Большая часть грузов в России перевозится электрифицированным железнодорожным транспортом, поэтому российские железные дороги по энергосбережению занимают лидирующие позиции в мире.

Повышение экологичности и энергоэффективности железнодорожного электротранспорта в стране обеспечивается систематическим внедрением инновационных систем накопления энергии (СНЭ). Электроэнергетические и технические характеристики СНЭ напрямую зависят от варианта их расположения, параметров тяговой электросистемы, профиля путей,

массы подвижного состава. При этом важнейшими показателями эффективности применения накопителей являются экономические и технические последствия их использования. Инновационные СНЭ – основа дальнейшего повышения энергетической эффективности транспорта железных дорог и снижения негативного экологического влияния отрасли на окружающую среду [1]. Для снижения потерь энергии в процессе ее преобразования могут использоваться различные виды запасной энергии [2, 3]. Требуются инструменты, которые способны влиять на снижение потребляемого топлива, а также уменьшение выбросов в атмосферу углекислых газов и прочих загрязнителей при эксплуатации железнодорожного транспорта в России и за рубежом [4].

II. Объект и методика

В настоящее время существуют комплексные эксплуатационно-технологические мероприятия по повышению энергоэффективности железнодорожной отрасли:

- накопление рекуперативной энергии и повышение уровня ее рекуперации;
- интеллектуальное управление процессами перевозок, применение экологически безопасных методов вождения и управления движением подвижного состава;
- улучшение технического состояния поездов, уменьшение потерь мощности в электросетях и в тяговом электрооборудовании, снижение массы подвижного состава;
- усовершенствование систем отопления, освещения, терморегулирования, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также рекуперация отработанного тепла в различных режимах работы [5, 6].

При системном внедрении на железнодорожном транспорте указанных технологий и мер возможно снижение потребления энергии примерно на 25-35 %. При этом наибольший эффект может дать применение различных систем накопления энергии и, в первую очередь, использование рекуперативной энергии торможения (до 96 %), осуществляемое четырьмя основными способами:

- 1) преобразуется в тепловую энергию через сопротивление силовой электроники;
- 2) одновременно используется другим подвижным составом при стартовом и разгонном движениях напрямую передается в железнодорожную сеть;
- 3) возвращается обратно в электрическую сеть низкого напряжения через инвертор для использования другими потребителями;
- 4) накапливается в СНЭ для последующего применения при движении поездов и передачи другим потребителям [7, 8].

Обязательное условие устойчивой рекуперации – наличие приемников избыточной рекуперационной энергии, которая не может потребляться другими, находящимися в движении поездами на участке. Рекуперативное торможение связано с множеством преимуществ перед механическим и реостатным торможением, которые заключаются в возврате электроэнергии в контактную сеть. Возврат электроэнергии позволяет уменьшить энергопотребление транспорта, определяемое уровнем потребления мощности тяговыми подстанциями. Энергию рекуперующего электровоза могут потреблять другие локомотивы, работающие в режиме тяги, при этом ее избыток может быть преобразован в тепловую энергию или передан в первичную питающую сеть переменного тока. В 2022 г. уровень энергорекуперации на российской железной дороге превысил 1 млрд кВт·ч [9].

III. Результаты исследования

Одним из способов повышения эффективности рекуперативного торможения является использование выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), с помощью которых производится инвертирование избыточного рекуперативного тока на тяговых подстанциях. Исследования [10, 11] показали, что ВИП на участках постоянного тока имеют большое значение для эффективного использования рекуперативной энергии и, следовательно, для применения рекуперативного торможения: 90-95 % энергии рекуперации получают с помощью преобразовательных установок из полупроводниковых вентилях с преобразовательными трансформаторами. ВИП, мощность которых составляет 8 000-10 000 кВт, имеют высокий КПД (98-99 %), просты по конструкции, имеют меньшие потери энергии, что позволяет повысить надежность электроснабжения тяговой сети. Выпрямительно-инверторный агрегат переходит из режима выпрямителя в режим инвертора и наоборот, автоматически при уменьшении нагрузки и увеличении напряжения на шинах постоянного тока относительно напряжения переменного тока. При этом расположение ВИП на тяговых подстанциях или накопителей энергии в системах тягового электроснабжения (СТЭ) должно быть экономически целесообразным и научно обоснованным [10].

Экспериментально подтверждена высокая энергетическая эффективность рекуперативного торможения на однопутных участках с невысокой интенсивностью железнодорожного движения, которую определяют наличие и исправность рекуперационных систем на электроподвижном составе (ЭПС) и ВИП тяговых подстанций этих участков. При увеличении интенсивности движения поездов роль ВИП на участках постоянного тока и переменного тока снижается, а эффективность рекуперации на таких участках в большей мере определяется характеристиками контактной сети и состоянием поездных условий на участке. Потери в выпрямительно-инверторных

агрегатах и трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока в основном определяются средней мощностью потерь холостого хода понижающих трансформаторов. Если использование ВИП связано с увеличением потерь преобразовательного трансформатора подстанции и с невозможностью сгладить график электрических нагрузок, то применение СНЭ на тяговых подстанциях или на ЭПС позволяет избежать этих недостатков. Одним из преимуществ СНЭ перед ВИП является возврат рекуперационной энергии в контактную сеть, что не только позволяет снизить потери мощности в трансформаторах и элементах подстанции, но и устраняет необходимость балансового расчета с энергоснабжающими организациями по возврату энергии рекуперации [12]. Следовательно, использование накопителей в СТЭ и на ЭПС является наиболее перспективным вариантом повышения энергоэффективности перевозок.

Появившиеся на транспорте и в электроэнергетической сфере СНЭ показывают техническую эффективность и дают возможность рассматривать возможность их использования на участках постоянного тока с использованием рекуперативного торможения. СНЭ на основе преимущественно кинетических накопителей применяются для рекуперации энергии торможения, компенсации скачков и стабилизации напряжения, как аварийные источники питания и для регулирования частоты, при этом достигается до 30 % экономия энергии подвижным составом [13, 14].

Для снижения энергопотребления, издержек на эксплуатацию и обслуживание железнодорожной системы для рекуперации энергии торможения применяются стационарные (в составе электрической железнодорожной инфраструктуры), а также бортовые (на подвижном составе) СНЭ, а также повторное использование электроэнергии для питания подвижного состава (в режиме ускорения или замедления, во время движения в зонах без контактной сети). В качестве накопителей СНЭ используются аккумуляторные батареи и суперконденсаторы двойного электрического слоя благодаря их преимуществам:

- высокой удельной мощности (до 50 кВт/кг) и КПД (до 98 %);
- долгому сроку службы (от 10 до 20 лет);
- широкому диапазону температуры при эксплуатации (-50°C...+75°C);
- повышенным вибростойкости и ударопрочности;
- экологичности.

Эксплуатация СНЭ компанией *Bombardier Transportation* в 2003 г. на транспортных средствах *LRV, Metro-Train*, показала сокращение потребления энергии на 30 %, а применение бортовой СНЭ на *Diesel Multiple* привело к снижению энергозатрат и выбросов на 25–40 %. Суперконденсаторы в составе СНЭ подвижного состава, выполняя функции рекуперации энергии

торможения и стабилизации напряжения в сети, могут быстро перезаряжаться при торможении. Исследования и разработки в области применения углеродных нанотрубок в суперконденсаторах могут повысить удельную энергию до 85 Вт·ч/кг.

Аккумуляторные батареи являются наиболее распространенными накопителями и источниками энергии, в том числе, на железнодорожном транспорте. Неперезаряжаемые батареи обычно используются в качестве легкого источника питания и/или для автономности энергоснабжения (измерительные приборы, счетчики электрической энергии, медицинские аппараты, оборудование для регистрации данных и систем связи и др.) Основным назначением перезаряжаемых батарей является хранение энергии в системах ее накопления.

Используемые на железнодорожном транспорте свинцово-кислотные батареи, несмотря на высокую мощность и низкую цену, в составе СНЭ не применяются, поскольку имеют очень ограниченную удельную энергию, малый срок эксплуатации, низкую надежность и значительное снижение производительности в условиях экстремальных температур.

В тяговых устройствах в качестве аварийных и резервных источников энергии для питания аварийного освещения, запуска двигателей дизелей в системах управления железнодорожным транспортом широко применялись никель-кадмиевые батареи. Но применение данного типа батарей в составе систем накопления энергии проблематично в связи с наличием кадмия и эффекта памяти, когда из-за заряда после неполного разряда батарея постепенно теряет максимальную энергетическую емкость. Несмотря на имеющийся недостаток никель-металлогидридных батарей, которые могут терять около 20-50 % емкости после полугодового хранения, батареи данного типа нашли свое применение на железнодорожном транспорте в составе СНЭ благодаря высокой удельной мощности, простоте в управлении, медленному старению, высокой надежности и умеренному эффекту памяти.

В данный момент в составе СНЭ используются как самые популярные и конкурентоспособные на железной дороге литий-ионные, так и литий-титанатные батареи. Они имеют существенные преимущества: высокую удельную мощность (0,25-1,3 кВт/кг), увеличенную поверхность электродов. При их изготовлении используют новые мультикомпозиционные материалы, способные увеличить их долговечность и термоустойчивость для их применения на высокоскоростном транспорте. Несмотря на явные достоинства, использование новых энергоресурсов на железных дорогах осложняется вредным воздействием литий-ионных батарей на окружающую среду в процессе их производства и утилизации [15].

Особого внимания заслуживают современные рекуперационные системы с суперконденсаторами, которые имеют высокую энергоемкость, работают в режимах пиковых нагрузок и перепадов температур от $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Суперконденсаторы позволяют увеличить энергоэффективность подвижного состава на 40 %, но их удельная мощность ниже, чем у электрохимических аккумуляторов.

Электрохимические накопители энергии также могут применяться в СТЭ. Они обладают высокой удельной энергоемкостью и высоким КПД в режиме длительного разряда, однако при пиковом и форсированном режимах, и при температурах ниже $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ их КПД снижается [16].

Кроме того, для эффективного использования рекуперированной энергии могут использоваться и кинетические накопители. Так, компания «Кинетик» разработала проект по внедрению накопителей кинетической энергии на объектах СТЭ ОАО «РЖД» при рекуперативном торможении ЭПС. Данная технология безопасных динамических систем накопления и хранения базируется на основе ленточного витого супермаховика – это конструкция из тонкой высокопрочной стальной ленты со склейкой витков, навитой на специальный центр. Такая конструкция отличается разрывобезопасностью, не требует дополнительных сдерживающих устройств и армированных корпусов. Основной материал – тонкая лента с минимальной толщиной сечения, хорошими условиями прокаливаемости, легко обнаруживаемыми дефектами и высокой прочностью – до 2500 МПа. Имеющаяся технология позволяет навивать такие маховики с заранее заданными распределениями напряжений в теле маховика, где самым напряженным является внешний виток маховика, который напряжен в 1,5 раза больше, чем остальные витки [13].

Последние исследования показывают, что для рекуперации энергии торможения наиболее эффективны гибридные накопители энергии (литиевые аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). Работая совместно, они обладают преимуществами накопителей обоих типов: и удельной энергией суперконденсатора, и удельной мощностью аккумуляторной батареи, более компактны по сравнению с обычными накопителями и допускают эксплуатацию в широком диапазоне температур (табл. 1).

Суперконденсаторы СНЭ несколько тысяч раз в сутки в течение 15-20 с накапливают энергию торможения, вызывая повышение напряжения в контактной сети. Кроме того, гибридная СНЭ выполняет функцию модуляции нагрузки для обеспечения частотного регулирования в энергосистеме, при этом потребление электроэнергии из сети сокращается на 20 % [17, 18].

Таблица 1.
Гибридный накопитель энергии

Table 1.
Hybrid energy storage

Гибридный источник питания			
Суперконденсатор		Аккумуляторная батарея	
Заряд	1~30 с	Заряд	0,3~3 ч
Разряд	1~30 с	Разряд	1~5 ч
Энергия	1~20 Вт·ч/кг	Энергия	20~400 Вт·ч/кг
Мощность	1000~7000 Вт·ч/кг	Мощность	50~2500 Вт·ч/кг
Количество циклов заряд-разряд	500 000~1 000 000	Количество циклов заряд-разряд	500~3 000

Исследования [19, 20], показали, что емкостные, инерционные и индуктивные накопители энергии наиболее эффективны в системах электропитания, включая метрополитены. В целом почти все специалисты сходятся в том, что применение химических аккумуляторов для работы в режимах коротких и мощных циклов заряд-разряд от тысячи и более в сутки нецелесообразно, поскольку небольшое количество рабочих циклов и длительный срок зарядки не соответствует установленным циклам службы. Использование индуктивных низкотемпературных сверхпроводящих накопителей рассматривается лишь теоретически, так как их капитальные и эксплуатационные расходы на 1 кВт установленной мощности и 1 кВт·ч емкости являются одними из самых высоких из всех видов накопителей.

Технически самые подходящие к применению при резко переменных графиках нагрузок, характерных для электротранспорта в целом, а также для метрополитена в частности, являются кинетические накопители и суперконденсаторы. Примечательно, что количество сэкономленной электроэнергии в сравнении с одним кинетическим накопителем прямо пропорционально интенсивности движения на линии, где он установлен, т.е. чем чаще ходят и тормозят электропоезда в метро, тем больше будет экономия.

По возврату в цикл потребления рекуперированной электроэнергии электропоездов метро лучшие результаты показывают маховиковые стационарные накопители кинетической энергии, позволяющие запасать и выдавать до 40 %, а во многих случаях – почти половину от рекуперированной тяговыми электродвигателями электроэнергии поездов. Статические преобразователи подстанций позволяют вернуть в централизованную сеть до 33 % энергии торможения поездов. Маховики-накопители, устанавливаемые на борту электропоездов, следующие по эффективности, возвращают

до 30 % энергии торможения, за ними следуют установленные на борту суперконденсаторы – до 20-30 %. Наименее эффективными являются стационарно установленные на подстанциях суперконденсаторы, которые сохраняют только до 10 % энергии рекуперации. Таким образом, очевидны основные тенденции в применении накопительных технологий: для использования накопителей энергии для хранения и выдачи в нужный момент энергии рекуперации при торможении поезда наиболее подходят два типа – маховики и суперконденсаторы. Кроме прямых эффектов экономии энергоресурсов, накопители благоприятно влияют на энергосистему метрополитена: уменьшают перепады напряжения при неравномерном графике энергопотребления, снижают потребность в большом резервировании мощностей подстанций, тем самым, сокращают капитальные затраты при их строительстве и реконструкции, а также снижают износ оборудования тяговых подстанций. Многие пилотные проекты в метрополитенах направлены на использование стационарных накопителей, чтобы не увеличивать потери энергии при перевозке на борту больших накопителей, а также не ограничивать их габариты при увеличении числа их применения на борту. Показана довольно значительная – до 40 % экономическая эффективность в пилотных проектах при этом эффективность маховичных накопителей намного больше, чем у суперконденсаторов. Удельная стоимость киловатта установленной мощности для метрополитена имеет большое значение - цена киловатта мощности для суперконденсаторов превышает стоимость киловатта мощности для маховиков разных типов от 1,5 до 5 раз [20].

Эффект от использования накопителей в СТЭ, где возможен процесс рекуперации, зависит от того, как утилизируется сгенерированная энергия. Использование СНЭ позволит получать избыточную энергию от рекуперирующих установок и высвобождать энергию в периоды пиковой нагрузки. Массовое использование СНЭ сдерживается сложностью устройств соединения накопителя с сетью, динамикой изменения нагрузки и высокой ценой накопителя. Но постепенное внедрение СНЭ позволяет пройти процесс перехода от разовых внедрений к широкому применению накопителей энергии, получив ожидаемые положительные экономический и технический эффекты. При этом уровень мощности рекуперации, при котором накопители энергии становятся эффективными, составляет около 40 % от количества энергии, потребляемой самим подвижным составом [21]. Таким образом, анализ существующих технических мероприятий по повышению энергоэффективности рекуперативного торможения с применением СНЭ для приема и последующего накопления энергии рекуперации позволяет сделать вывод о возможности их использования не только для обеспечения необходимого диапазона тока рекуперации, но и для снижения отклонения напряжения на токоприемнике электровоза от номинального значения.

IV. Заключение

Применение систем накопления энергии является одной из перспективных технологий с наибольшим потенциалом с точки зрения энергосбережения на железнодорожном транспорте.

Использование систем накопления энергии должно стать частью комплексного плана мероприятий по повышению энергоэффективности и экологичности железнодорожного транспорта. Оно может дать экономию электроэнергии до 30 % при правильном подборе и применении накопителей энергии, учитывая все особенности их эксплуатации.

©Рыжова Е.Л., 2023

Поступила в редакцию 17.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 17.03.2023

Accepted 28.04.2023

Библиографический список

- [1] Schut D., Wisniewski J. A global vision for railway development. Paris: UIC, 2015. – 44 p.
- [2] Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах. М.: Высшая школа, 1989. – 158 с.
- [3] Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 1. С. 42-46.
- [4] Ковальчук В.В., Свистунов П.В. Энергосбережение как результат взаимодействия государства и бизнеса // Энергосбережение. 2009. № 7. С. 30-37.
- [5] Гапанович В.А. [и др.]. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: НИТУ МИСиС, 2012. – 619 с.
- [6] Молин Н.И., Крюков А.В. Повышение эффективности использования электроэнергии на предприятиях железнодорожного транспорта // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и энергобезопасности в Сибири», 2003, Барнаул, Россия. Барнаул: АлтГУ, 2012. С. 139-143.
- [7] Аннин В.А. Рекуперация электроэнергии - основное направление энергосбережения // Локомотив. 2013. № 7 (679). С. 8-11.
- [8] Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 3 (47). С. 64-69.
- [9] Бегагоин Э.И., Русаков А.Г. Оценка энергетической эффективности рекуперативного торможения // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 1. С. 57-60.

- [10] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Незевак В.Л. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2 (6). С. 48-52.
- [11] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Каштанов А.Л., Вильгельм А.С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока. Омск: ОмГУПС, 2016. – 176 с.
- [12] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60-70.
- [13] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Применение накопителей энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2 (42). С. 158-164.
- [14] Мусабеков М.О., Елшибеков А.М. Инновационный способ использования энергии рекуперации // Материалы ХLI Международ. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика», Апрель 03-04, 2017, Алматы, Казахстан: КазАТК им. М. Тынышпаева, 2017. Т. 3. С. 162-166.
- [15] Лапидус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2019. Т. 78. № 5. С. 274-283. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-283
- [16] Сулов К.В. Модели и методы комплексного обоснования развития изолированных систем электроснабжения: дис. док. техн. наук, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, 2020. – 297 с.
- [17] Евстафьев А.М. Об использовании суперконденсаторов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 2. С.31-32.
- [18] Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 308-315.
- [19] Носков В.Н. К вопросу использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в энергосистемах железнодорожного транспорта // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2008. № 3 (31). С. 54-59.
- [20] Шевлюгин М.В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии. М.: МИИТ, 2007. – 151 с.
- [21] Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Оценка эффективности использования стационарных емкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2010. № 1. С. 62а-65.

References

- [1] D. Schut and J. Wisniewski, *A global vision for railway development*. Paris: UIC, 2015.
- [2] Yu.N. Astakhov, *Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemah [Energy storage in electrical systems]*. Moscow: Higher school, 1989 (in Russian).
- [3] B.A. Alekseev, “Primenenie nakopitelej energii v elektroenergetike [The use of energy storage devices in the electric power industry]”, *Elektro. Elektrotehnika, elektro-energetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry]*, no. 1, pp. 42-46, 2005 (in Russian).
- [4] V.V. Kovalchuk and P.V. Svistunov, “Energoberezhenie kak rezul'tat vzaimodejstviya gosudarstva i biznesa [Energy saving as a result of interaction between the state and business]”, *Energoberezhenie [Energy Saving]*, no. 7, pp. 30-37, 2009 (in Russian).
- [5] V.A. Gapanovich et al., *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport]*. Moscow: NUST MISIS, 2012 (in Russian).
- [6] N.I. Molin, A.V. Kryukov, “Improving the efficiency of electricity use at railway transport enterprises”, in proc. *All-Russian scient. and pract. conf. “Problemy energoberezheniya i energobezопасnosti v Sibiri [Problems of energy saving and energy security in Siberia]*”, 2003, Barnaul, Russia, pp. 139-143 (in Russian).
- [7] V.A. Annin, “Rekuperaciya elektroenergii – osnovnoe napravlenie energoberezheniya [Recuperation of electricity – the main direction of energy saving]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 7, no. 679, pp. 8-11, 2013 (in Russian).
- [8] O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, A.O. Linkov, “Raising of power factor of electric locomotive at regenerative braking regime”, *World of Transport and Transportation*, vol. 11, no. 3 (47), pp. 64-69, 2013.
- [9] E.I. Begagoin and A.G. Rusakov, “Estimation of energetic efficiency of regenerative braking”, *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, no. 1, pp. 57-60, 2014.
- [10] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov and V.L. Nezevak, “Vybor mest ustanovki nakopitelej elektroenergii na poligone postoyannogo toka po kriteriyu energoeffektivnosti [Choice of places for installation of electric power storage devices at the DC test site according to the criterion of energy efficiency]”, *Nauka i transport. Modernizaciya Zheleznodorozhnogo Transporta [Nauka i transport. Modernization of Railway Transport]*, vol. 2, no. 6, pp. 48-52, 2013 (in Russian).
- [11] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov, Kashtanov A.L. and A.S. Vilgelm, *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya na poligone postoyannogo toka [Improving the Energy Efficiency of Regenerative Braking at the DC Range]*. Omsk: OSTU, 2016 (in Russian).
- [12] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov and A.S. Vilgelm, “Methodology for assessing the energy efficiency of regenerative braking the use and energy recovery”, *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 1, no. 25, pp. 60-70, 2016.
- [13] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and A.V. Cherepanov, “Use of energy stores in traction power supply systems of alternating current railroads”, *Modern technologies. System Analysis. Modeling*, vol. 2, no. 42, pp. 158-164.
- [14] M.O. Musabekov and A.M. Elshibekov, “Innovacionnyj sposob ispol'zovaniya energii rekuperacii [An innovative way to use energy recovery]”, in proc. *Materialy XLI*

- Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. Innovacionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika [Proceedings of the XLI International. scientific-practical. conf. Innovative technologies in transport: education, science, practice]*, Apr. 03-04, 2017, Almaty, Kazakhstan, vol. 3, pp. 162-166 (in Russian).
- [15] B.M. Lapidus, "Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport", *Russian Railway Science Journal*, vol. 78, no. 5, pp. 274-283, 2019. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-283
- [16] K.V. Suslov, "*Modeli i metody kompleksnogo obosnovaniya razvitiya izolirovannykh sistem elektrosnabzheniya [Models and methods of complex substantiation of the development of isolated power supply systems]*", Dis. Doc. Tech. Sci., Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia, 2020 (in Russian).
- [17] A.M. Evstafyev, "Ob ispol'zovanii superkondensatorov [On the use of supercapacitors]", *Zheleznodorozhnyj transport [Railway transport]*, no. 2, pp. 31-32, 2010 (in Russian).
- [18] A.V. Kryukov, V.P. Zakaryukin and A.V. Cherepanov, "Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh nakopitel'yami energii [Simulation of modes of traction power supply systems equipped with energy storage devices]", *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences]*, vol. 1, pp. 308-315, 2014 (in Russian).
- [19] V.N. Noskov, "About a superconductive magnetic energy storages (SMES) applications in railway traction", *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, no. 3 (31), pp. 54-59, 2008.
- [20] M.V. Shevlyugin, *Snizhenie raskhoda energii i rabochej moshchnosti osnovnogo silovogo oborudovaniya tyagovykh podstancij elektricheskikh zheleznnykh dorog s pomoshch'yu nakopitelej energii [Reduction of energy consumption and operating power of the main power equipment of traction substations of electric railways with the help of energy storage devices]*. Moscow: MIIT, 2007 (in Russian).
- [21] L.A. Baranov, Yu.A. Brodsky, V.A. Grechishnikov, A.I. Podaryuev, V.N. Pupynin, and M.V. Shevlyugin, "Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya stacionarnykh emkostnykh nakopitelej energii v metropolitene na osnove eksperimental'nykh zamerov pokazatelej raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Evaluation of the efficiency of using stationary capacitive energy storage devices in the subway based on experimental measurements of the performance indicators of the traction power supply system]", *Elektrotehnika*, no. 1, pp. 62a-65, 2010 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

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

УДК 621.315

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_49

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА КОНДЕНСАТОРАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ

В.М. Завьялов

ORCID: 0000-0001-8485-9864 e-mail: vmzavyalov@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

*Севастополь, Россия***С.А. Абейдулин**

ORCID: 0009-0004-5273-7597 e-mail: saabeidulin@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

*Севастополь, Россия***С.В. Гайдук**

ORCID: 0009-0003-8092-8529 e-mail: svgaidyk@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

*Севастополь, Россия***М.Б. Углова**

e-mail: mbuglova@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

Севастополь, Россия

Рассмотрена система беспроводной передачи энергии с последовательной топологией элементов, применяемая для создания беспроводных зарядных станций электромобилей и других транспортных средств, получающих энергию от тяговых аккумуляторных батарей. Работа систем беспроводной передачи энергии с последовательной топологией осуществляется в режиме резонанса напряжений, в связи с чем максимальные значения напряжения, прикладываемого к обкладкам конденсатора могут в разы превышать напряжение источника питания, что необходимо учитывать при проектировании систем беспроводной передачи энергии. Для оценки превышения напряжений на обкладках конденсаторов первичной и вторичной цепей резонансного контура над напряжением источника питания на базе методов теории автоматического управления были получены параметрические зависимости превышения напряжения на конденсаторах над входным напряжением. Учитывая, что одна и та же резонансная частота возможна при разных соотношениях индуктивностей и емкостей резонансного контура, были проведены исследования влияния соотношения на превышение величины напряжения на обкладках конденсаторов. Ре-

зультаты исследований показали, что при определенных соотношениях индуктивностей и емкостей можно получить минимум превышения напряжений на конденсаторах, что является наиболее благоприятным для работы систем беспроводной передачи энергии с последовательной топологией. Математические зависимости, приведенные в статье, могут быть полезны для инженеров, занимающихся разработкой беспроводных зарядных станций.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), беспроводная передача энергии (БПЭ), перенапряжения, последовательная топология, резонансный контур, электромобиль.

Для цитирования: Завьялов В.М., Абейдулин С.А, Гайдук С.В., Углова М.Б. Исследование перенапряжений на конденсаторах последовательного резонансного контура беспроводной зарядной станции // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 49-61. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_49

INVESTIGATION OF OVERVOLTAGES ON CAPACITORS OF SERIES RESONANCE CIRCUIT OF WIRELESS CHARGING STATION

V.M. Zavyalov

ORCID: 0000-0001-8485-9864 e-mail: vmzavyalov@sevsu.ru

Sevastopol State University

Sevastopol, Russia

S.A. Abeidulin

ORCID: 0009-0004-5273-7597 e-mail: saabeidulin@sevsu.ru

Sevastopol State University

Sevastopol, Russia

S.V. Gaiduk

ORCID: 0009-0003-8092-8529 e-mail: svgaidyk@sevsu.ru

Sevastopol State University

Sevastopol, Russia

M.B. Uglova

e-mail: mbuglova@sevsu.ru

Sevastopol State University

Sevastopol, Russia

Abstract. The article considers a wireless power transmission system with a serial topology of elements. These systems are used to create wireless charging stations for electric vehicles and other vehicles that receive energy from traction batteries. The operation

of wireless power transmission systems with serial topology is carried out in the voltage resonance mode, and therefore the maximum voltage values applied to the capacitor plates can exceed the power supply voltage by several times. This fact must be taken into account when designing wireless power transmission systems. To assess the excess voltage on the capacitor plates of the primary and secondary circuits of the resonant circuit over the voltage of the power source, based on the methods of automatic control theory, parametric dependences of the voltage excess on the capacitors over the input voltage were obtained. Considering that the same resonant frequency is possible with different ratios of inductances and capacitances of the resonant circuit, studies were carried out on the influence of the ratio on the excess voltage on the capacitor plates. The research results have shown that with certain ratios of inductances and capacitances, it is possible to obtain a minimum excess voltage on capacitors, which is most favorable for the operation of wireless power transmission systems with a serial topology. The mathematical dependencies given in the article may be useful for engineers involved in the development of wireless charging stations.

Key words: electric vehicle, frequency response (AFC), resonant circuit, series topology, surges, wireless power transmission (WPT).

For citation: V.M. Zavyalov, S.A. Abeidulin, S.V. Gaiduk and M.B. Uglova, «Investigation of overvoltages on capacitors of series resonant circuit of wireless charging station», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 49-61, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_49

I. Введение

Технологии беспроводной передачи энергии (БПЭ) в начале XXI в. активно разрабатываются и внедряются в народное хозяйство. Особенно активно они используются при обеспечении бесконтактной подзарядки аккумуляторов различных устройств, от мобильных телефонов до электромобилей. Преимущества технологии БПЭ заключаются в отсутствии физического электрического контакта зарядной станции с заряжаемым устройством, что обеспечивает высокие показатели надежности и безопасности для устройств, использующих данную технологию.

Одна из первых работ, представивших технологию сильно связанного магнитного резонанса, была опубликована исследовательской группой из Массачусетского технологического института в 2007 г. [1]. Развитие этой технологии продолжается, что показано далее в обзоре литературы.

Основной принцип резонансной индуктивной передачи энергии рассмотрен в [2], а именно, представлен всесторонний обзор беспроводных технологий, проведен сравнительный анализ различных методов беспроводной зарядки для электромобилей. Обозначено, что описание БПЭ не имеет точной, полной и исчерпывающей информации, поэтому необходимы практические исследования для стандартизации указанных систем. Одной

из важных задач при проектировании систем БПЭ является правильный выбор параметров резонансного контура и конструкции элементов, участвующих в процессе передачи энергии. В [3] обсуждаются конструкции передающей/приемной катушки и архитектура системы, рассматривается определение максимальной эффективности, дается сравнительный анализ БПЭ с двумя и тремя катушками. Также в этой работе произведена оценка условий нагрузки и взаимной индуктивности путем измерения только входного тока и входного напряжения. Показано, что взаимная индуктивность и величина нагрузки могут быть однозначно определены указанным путем. Выведено значение оптимального сопротивления нагрузки для получения максимальной эффективности.

Обзор технологии беспроводной передачи энергии с магнитно-резонансной связью для зарядки электромобилей дан в [4-6]. Так, в [4] проведен анализ типов топологий беспроводных зарядных устройств. Рассмотрена концепция магнитного резонанса, проанализирована модель схемы магнитной связи, составлено уравнение эффективности. Основным способом компенсации индуктивности рассеяния является добавление конденсаторов с обеих сторон. В зависимости от положения конденсаторов относительно катушек, рассмотрены четыре основных типа компенсации, выведены значения емкости для компенсации различных топологий. Сделан вывод, что только для схемы с последовательной топологией значение емкости не зависит от изменений соединения или нагрузки. Проведен сравнительный анализ различных конструкций обмоток для резонансного контура. Рассмотрены стандарты безопасности для проектирования устройств БПЭ.

В [5] представлен обзор технологии беспроводной зарядки для электромобилей, дан сравнительный обзор конструкции системы, который включает описание прототипов, схем, топологий схемы компенсации и международных стандартов зарядки. Проведен обзор беспроводной зарядки электромобиля, включая статическую и динамическую беспроводную зарядку электромобиля, в котором основное внимание уделяется конструкции катушки и эффективности передачи энергии.

В [6] авторы представляют обзор резонансных цепей для БПЭ с акцентом на нерезонансные преобразователи, резонансные инверторы, компенсационные сети и селективные резонансные цепи. Их характеристики и ключевые особенности, такие как рабочая частота, уровень мощности, отказоустойчивость, рассмотрены в аспекте преимуществ и недостатков. Высказана мысль, что высокочастотные и высокоомощные инверторы для системы БПЭ будут основным направлением исследований для зарядки электромобилей.

Основополагающее значение для понимания и проектирования резонансной системы беспроводной зарядки являются принцип работы и математические расчеты. В [7] выведена формула комплексного сопротивления с учетом условия резонанса, которая используется для оценки максимальной передаваемой мощности. Каждый передатчик имеет максимальное напряжение и максимальный ток, который может быть ограничен передающей катушкой. Чтобы максимизировать мощность приемника, передатчик должен работать близко к максимальному току и напряжению. Выделяют три основных вида связи: сверхсвязанная или избыточная связь, недостаточная или случайная связь и идеальная связь. Построены графики эффективности в зависимости от связи между передатчиком и приемником. Показано, что максимально достижимый КПД в основном определяется КПД приемника. Чем выше добротность передатчика, тем выше эффективность.

Таким образом, в секторе беспроводной передачи энергии, технология магнитного резонанса продолжает развиваться. КПД передачи энергии увеличилась с 70 до более чем 95 %, при этом расстояние передачи увеличилось с нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Анализ специализированной литературы показал, что вопрос определения зависимостей напряжений на конденсаторах резонансного контура от его параметров в настоящее время должным образом не исследован. В данной статье рассматриваются зависимости максимального напряжения на конденсаторах от параметров резонансного контура.

II. Актуальность исследования

Проектирование систем БПЭ сопряжено с рядом технических ограничений: допустимые габаритные размеры приемной и передающей катушек, а также диапазон частот тока, в котором осуществляется передача энергии. Помимо этого, при последовательном включении индуктивности и емкости резонансного контура напряжение на конденсаторах, при частотах близких к резонансной может в разы превышать входное напряжение. В связи с тем, что одной из характеристик конденсаторов является предельное напряжение на их обкладках, актуальной задачей при проектировании систем БПЭ является оценка максимальных напряжений на конденсаторах резонансного контура для их выбора по указанному параметру. Кроме того, актуальной задачей является поиск оптимальных параметров элементов резонансного контура, обеспечивающих минимум значения максимального напряжения на конденсаторах.

В качестве исследуемой системы БПЭ в данной работе рассматривается схема с S-S (последовательной) топологией [8-10], так как она обеспечивает лучший коэффициент передачи мощности и имеет минимальную чувствительность резонансной частоты от взаимной индуктивности.

III. Объект исследования

Электрическая схема силового канала передачи энергии представлена на рис. 1.

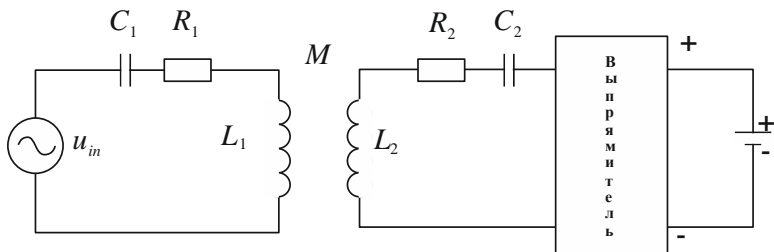


Рис. 1. Схема беспроводной зарядной станции с s-s топологией

Fig. 1. Diagram of a wireless charging station with s-s topology

Для проведения последующих расчетов приведем схему, представленную на рис. 1, к эквивалентному виду (рис. 2), заменив выпрямитель и аккумуляторную батарею на эквивалентное сопротивление, величина которого будет определяться:

$$R_{load} = \frac{U_{АКБ}}{I_{заряда}},$$

где $U_{АКБ}$ – напряжение на аккумуляторной батарее при зарядке, $I_{заряда}$ – ток заряда аккумуляторной батареи.

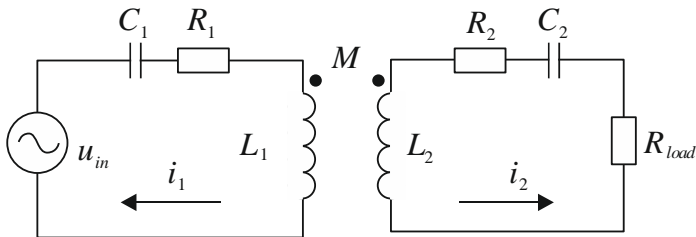


Рис. 2. Эквивалентная схема беспроводной зарядной станции

Fig. 2. Wireless charging station equivalent circuit

Математическая модель во временной области представлена системой уравнений (1).

В математической модели (1) приняты следующие допущения:

- не учитываются потери в конденсаторах;
- не учитываются реальные характеристики инвертора;
- источник питания идеальный;
- нагрузка представлена активным сопротивлением, величина которого определяется из номинальных значений тока и напряжения для заряда аккумуляторной батареи;
- не учитывается эффект вытеснения тока в проводниках (поверхностный эффект).

$$\begin{cases} u_{in} = u_{c_1} + i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 = u_{c_2} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_{2\Sigma}; \\ i_1 = C_1 \frac{du_{c_1}}{dt}; \\ i_2 = C_2 \frac{du_{c_2}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где u_{in} – входное напряжение; u_{c_1} – напряжение на конденсаторе в первичной цепи; u_{c_2} – напряжение на конденсаторе во вторичной цепи; i_1 – ток первичной цепи; i_2 – ток вторичной цепи; R_1, R_2, C_1, C_2 – сопротивления и емкости первичной и вторичной цепей; R_{load} – эквивалентное сопротивление аккумуляторной батареи; L_1, L_2 – индуктивности первичной и вторичной катушек; M – взаимная индуктивность; $R_{2\Sigma} = (R_2 + R_{load})$.

Для приведения данной функции к параметрическому виду, воспользуемся методом передаточных функций. Применив преобразования Лапласа, получим математическую модель, описанную следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{in}(p) = U_{C_1}(p) + I_1(p)R_1 + pI_1(p)L_1 + pI_2(p)M; \\ 0 = U_{C_2}(p) + pI_2(p)L_2 + pI_1(p)M + I_2(p)R_{2\Sigma} \\ pU_{C_1}(p)C_1 = I_1(p); \\ pU_{C_2}(p)C_2 = I_2(p). \end{cases} \quad (2)$$

Представим резонансный контур в виде структурных схем (рис. 3), приняв в качестве входного сигнала напряжение на входе резонансного контура, а выходного – напряжение на соответствующем конденсаторе.

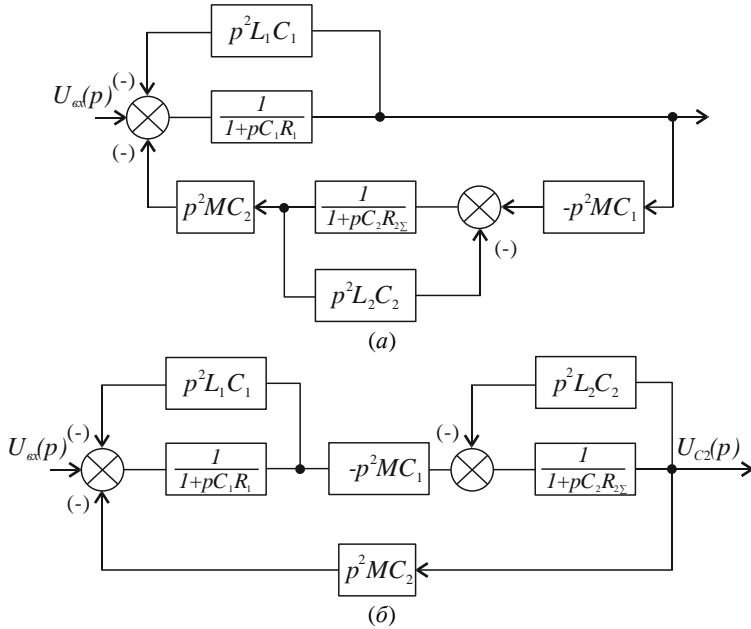


Рис. 3. Структурная схема системы беспроводной передачи энергии, где выходной сигнал (а) напряжение на конденсаторе C_1 ; напряжение на конденсаторе C_2 (б)

Fig. 3. Structural diagram of a wireless power transmission system, where the output signal is (a) the voltage across the capacitor C_1 ; the voltage across capacitor C_2 (b)

На основании приведенных на рис. 3 структурных схем, с учетом уравнений (2), получим передаточные функции:

$$\begin{aligned}
 W_{U_{C_1}}(p) &= \frac{U_{C_1}(p)}{U_{in}(p)} = \frac{(p^2 a_2 + p a_3 + 1)}{p^4 b_4 + p^3 b_3 + p^2 b_2 + p b_1 + 1}; \\
 W_{U_{C_2}}(p) &= \frac{U_{C_2}(p)}{U_{in}(p)} = -\frac{p^2 a_5}{p^4 b_4 + p^3 b_3 + p^2 b_2 + p b_1 + 1},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где: $a_1 = C_1 C_2 M$; $a_2 = C_2 L_2$; $a_3 = C_2 R_2$; $a_4 = C_1$; $a_5 = C_1 M$;
 $b_1 = C_1 R_1 + C_2 R_2$; $b_2 = C_1 C_2 R_1 R_2 + C_1 L_1 + C_2 L_2$; $b_3 = C_1 C_2 (R_1 L_2 + R_2 L_1)$;
 $b_4 = C_1 C_2 (L_1 L_2 - M^2)$.

Перейдя в частотную область, получим амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для передаточных функций:

$$\begin{aligned} A_{U_{C_1}}(\omega) &= \sqrt{\operatorname{Re}(W_{U_{C_1}}(j\omega))^2 + \operatorname{Im}(W_{U_{C_1}}(j\omega))^2}; \\ A_{U_{C_2}}(\omega) &= \sqrt{\operatorname{Re}(W_{U_{C_2}}(j\omega))^2 + \operatorname{Im}(W_{U_{C_2}}(j\omega))^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(W_{U_{C_1}}(j\omega)) &= \frac{(1 - \omega^2 a_2)(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1) - \omega a_3(\omega b_1 - \omega^3 b_3)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}; \\ \operatorname{Im}(W_{U_{C_1}}(j\omega)) &= \frac{(1 - \omega^2 a_2)(\omega b_1 - \omega^3 b_3) + \omega a_3(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}; \\ \operatorname{Re}(W_{U_{C_2}}(j\omega)) &= \frac{\omega^2 a_5(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}; \\ \operatorname{Im}(W_{U_{C_2}}(j\omega)) &= \frac{\omega^2 a_5(\omega b_1 - \omega^3 b_3)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}. \end{aligned}$$

Полученные АЧХ отражают зависимости превышения напряжения на соответствующем конденсаторе над напряжением на входе от параметров резонансного контура.

Анализируя данные, приведенные в [10], можно сделать вывод, что для плоских, квадратных катушек активное сопротивление, взаимная индуктивность и величина обратная емкости, при фиксации резонансной частоты, имеют зависимости от индуктивности катушек близкие к линейным. В связи с этим, исключим из уравнения АЧХ параметры R_1 , R_2 , M , C_1 , C_2 , заменив их следующими функциями:

$$R_1 = d_r L; \quad R_2 = d_r L + R_{load}; \quad M = d_m L; \quad \frac{1}{C} = d_c L, \quad (5)$$

где d_r , d_m , d_c – коэффициенты линейной аппроксимации.

Рассмотрим плоскую однослойную квадратную катушку с внешними размерами 0,6 м на 0,3 м, для нее получены коэффициенты линейной аппроксимации, имеющие следующие значения: $d_r=684$, $d_m=0,181$, $d_c=3 \times 10^{11}$. По зависимостям (3) и (4) с учетом (5) построены графики на рис. 4.

Из полученных графических зависимостей можно увидеть, что при варьировании отношением значений индуктивности и емкости резонансного контура, обеспечивая постоянство резонансной частоты, будем иметь различную величину максимального напряжения на конденсаторах резонансного контура. При этом для первичной цепи при малой индуктивности имеется существенное перенапряжение, которое сначала резко снижается, а затем монотонно увеличивается по мере роста величины индуктивности.

Перенапряжение на конденсаторе вторичного контура имеет меньшее значение при малых значениях индуктивности, но по мере роста последней также растет. Исходя из этого, при конструировании систем беспроводной передачи энергии необходимо акцентировать внимание на определение минимума величины перенапряжения на конденсаторах, и учитывать это при выборе параметров элементов резонансного контура.

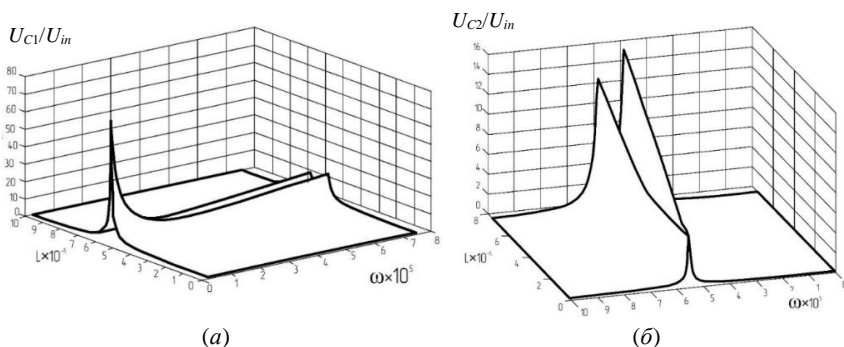


Рис. 4. Зависимость отношения максимального напряжения на конденсаторе C_1 (а) и C_2 (б) к входному напряжению от индуктивности катушек в условиях ограничений частоты резонансного контура

Fig. 4. Dependence of the ratio of the maximum voltage on the capacitor C_1 (a) and C_2 (b) to the input voltage on the inductance of the coils, under conditions of frequency limitation of the resonant circuit

Для исследуемого типоразмера катушки с внешним размером 0,3 м на 0,6 м, условие выполняется при индуктивности около 24 мГн, с обеспечением резонансной частоты 90 кГц.

IV. Заключение

В результате проведенных исследований получены параметрические зависимости, позволяющие на стадии проектирования систем беспроводных зарядных станций для электромобилей оценить величину максималь-

ных значений напряжения на конденсаторах резонансного контура, что поможет выбрать конденсаторы по классу напряжения. Анализ полученных зависимостей показал, что при варьировании соотношения индуктивности и емкости резонансного контура имеется оптимум, обеспечивающий минимум напряжения на конденсаторах резонансного контура при работе на резонансной частоте. Результаты работы могут быть полезны для инженеров, занимающихся разработкой систем беспроводной передачи энергии.

© Завьялов В.М., 2023

© Абейдулин С.А., 2023

© Гайдук С.В., 2023

© Углова М.Б., 2023

Поступила в редакцию 24.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 24.03.2023

Accepted 28.04.2023

Библиографический список

- [1] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P. and Soljacic M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // *Science*. 2007. № 317 (5834). P. 83-86. DOI: 10.1126/science.1143254
- [2] Niu S., Xu H., Sun Z., Shao Z.Y., Jian. L. The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. № 114 (8). 109302. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109302
- [3] Sun L., Ma D., Tang H. A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. № 91. P. 490-503. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.016
- [4] Joseph P.K., Elangovan D. A review on renewable energy powered wireless power transmission techniques for light electric vehicle charging applications // *Journal of Energy Storage*. 2018. № 16. P. 145-155. DOI: 10.1016/j.est. 2017.12.019
- [5] Gladwin D., Mou X., Zhao R., Sun H. A survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging // *IET Power Electronics*. 2019. № 12 (12). P. 3005-3020. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0529
- [6] Jiang C., Chau K.T., Liu C., Lee C.H.T. An overview of resonant circuits for wireless power transfer // *Energies*. 2017. № 10 (7). 894. DOI: 10.3390/en10070894
- [7] Schaecher S., Brandl M. Resonant wireless power transfer. White Paper 05-2018. Infineon Technologies AG, 2018.
- [8] Zhang W., Mi C.C. Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. № 65 (6). P. 4768-4778. DOI: 10.1109/TVT.2015.2454292
- [9] Jayalath S., Khan A. Design, Challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. № 9 (5). P. 6196-6218. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625

- [10] Zavylov V.M., Abeidulin S.A., Dubkov E.A., Veliliaev A.S., Semykina I.Y. Criteria for choosing of resonant circuit parameters of wireless power transfer charging system // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2022. № 18 (1). 2236. DOI: 10.22068/IJEEE.18.1.2236

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljagic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, 2007. DOI: 10.1126/science.1143254
- [2] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z.Y. Shao and L. Jian, "The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, no. 8, 109302, Oct. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109302
- [3] L. Sun, D. Ma and H. Tang, "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 490-503, Aug. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.016
- [4] P.K. Joseph and D. Elangovan, "A review on renewable energy powered wireless power transmission techniques for light electric vehicle charging applications", *Journal of Energy Storage*, vol. 16, pp. 145-155, Apr. 2018. DOI: 10.1016/j.est.2017.12.019
- [5] D. Gladwin, X. Mou, R. Zhao and H. Sun, "A survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging", *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 12, pp. 3005-3020, Oct. 2019. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0529
- [6] C. Jiang, K.T. Chau, C. Liu and C.H.T. Lee, "An overview of resonant circuits for wireless power transfer", *Energies*, vol. 10, no. 7, 894, Jun. 2017. DOI: 10.3390/en10070894
- [7] S. Schaecher and M. Brandl, *Resonant wireless power transfer. White Paper 05-2018*. Infineon Technologies AG, 2018.
- [8] W. Zhang and C.C. Mi, "Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, Jun. 2016. DOI: 10.1109/TVT.2015.2454292
- [9] S. Jayalath and A. Khan, "Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 6196-6218, Oct. 2021. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625
- [10] V.M. Zavylov, S.A. Abeidulin., E.A. Dubkov, A.S. Veliliaev and I.Y. Semykina, "Criteria for choosing of resonant circuit parameters of wireless power transfer charging system", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, no. 1, 2236, March 2022. DOI: 10.22068/IJEEE.18.1.2236

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Завьялов Валерий Михайлович,
доктор технических наук, доцент Севасто-
польского государственного университета,
г. Севастополь, Российская Федерация

Valery M. Zavyalov, D. Sci. (Eng.),
associate professor of the Sevastopol
State University, Sevastopol, Russian
Federation

Абейдулин Сергей Адельзанович,
старший преподаватель Севастопольского
государственного университета, г. Сева-
стополь, Российская Федерация.

Sergey A. Abeidulin, senior lecturer
of the Sevastopol State University,
Sevastopol, Russian Federation

Гайдук Светлана Владимировна,
старший преподаватель Севастопольского
государственного университета, г. Сева-
стополь, Российская Федерация

Svetlana V. Gaiduk, senior lecturer
of the Sevastopol State University,
Sevastopol, Russian Federation

Углова Марина Борисовна,
старший преподаватель Севастопольского
государственного университета, г. Сева-
стополь, Российская Федерация

Marina B. Uglova, senior lecturer of
the Sevastopol State University, Se-
vastopol, Russian Federation

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.1

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_62

РАЦИОНАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ БАЛАНСОВОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ В ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НЕТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

В.Ю. ВуколовORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: vvucolov@mail.ruфилиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ действующей нормативно-правовой базы работы ОАО «РЖД». Выявлено наличие дополнительных требований по надежности электроснабжения сторонних потребителей, характерных для нагрузок, получающих питание от распределительных электрических сетей общего назначения. В то же время существующая организационная структура подразделений ОАО «РЖД», ответственных за эксплуатацию нетяговых сетей, характеризуется распределением функций по обеспечению надежности электроснабжения подключенных нагрузок между отдельными дистанциями и участками, территориально удаленными друг от друга. Поэтому для эффективной эксплуатации наиболее ответственных железнодорожных нетяговых электроустановок, относящихся к первой и первой особой категории надежности, актуальна задача рационального определения границ балансовой принадлежности между электросетевым хозяйством ОАО «РЖД» и оборудованием сторонних нежелезнодорожных потребителей. Возможные варианты разграничения балансовой принадлежности определены в соответствии с нормами действующего законодательства в области тарифообразования. Установлено, что для обеспечения надежности нетяговых сетей необходимо минимизировать случаи нахождения на балансе ОАО «РЖД» понижающих трансформаторных подстанций, питающих сторонние нежелезнодорожные нагрузки. Такой подход не приводит к уменьшению полезного отпуска электрической энергии и позволяет избежать обслуживания разветвленных потребительских электрических сетей низкого напряжения, на которые приходится наибольшая доля коммерческих потерь электроэнергии.

Ключевые слова: граница балансовой принадлежности, надежность, нетяговые потребители, нетяговая сеть, электроснабжение железных дорог, электроэнергетика.

Для цитирования: 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

RATIONAL DEFINITION OF BALANCE AFFILIATION BOUNDARY IN TASK OF ENSURING RELIABILITY OF NON-TRAIN POWER NETWORKS

V.Y. 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. The reliability of the operation of non-traction railway networks directly affects the performance and efficiency of the train traffic system, and hence the safety in railway transport. At the same time, both railway non-traction loads (including signaling devices, blocking centralization) and third-party non-railway consumers receive power from non-traction railway networks. The presented analysis of the current regulatory and legal framework has shown the presence of additional requirements for the reliability of power supply to third-party consumers, typical for loads powered by general-purpose distribution electrical networks. At the same time, the existing organizational structure of Russian Railways divisions responsible for the operation of non-traction networks is characterized by the distribution of functions to ensure the reliability of power supply to connected loads between individual distances and areas that are geographically remote from each other. Therefore, for the efficient operation of the most critical railway non-traction electrical installations belonging to the first and first special reliability categories, the task of rationally determining the balance affiliation boundary between the electric grid facilities of Russian Railways and the equipment of third-party non-railway consumers becomes relevant. Possible options for delimitation of balance affiliation boundary are determined in accordance with the norms of the current legislation in the field of tariff formation. It has been established that in order to ensure the reliability of non-traction networks, it is necessary to minimize the cases when step-down transformer substations supplying third-party non-railway loads are on the balance sheet of Russian Railways. This approach does not lead to a decrease in the useful supply of electrical energy and avoids the maintenance of branched low-voltage consumer electrical networks, which account for the largest share of commercial electricity losses.

Keywords: balance affiliation boundary, electric power industry, non-train power consumer, non-train power network, railway power supply, reliability.

For citation: 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

I. Введение

Согласно ГОСТ Р 53685-2009 [1], нетяговый потребитель (железной дороги) – это железнодорожный потребитель электрической энергии, не использующий для эксплуатации тяговое электрооборудование. В соответствии с тем же нормативным документом, под системой тягового электроснабжения понимается совокупность электроустановок, предназначенная для преобразования, распределения и передачи электрической энергии к железнодорожному электроподвижному составу. С учетом приведенного определения более детально под нетяговыми железнодорожными потребителями следует понимать потребителей электрической энергии всех служб железных дорог, непосредственно связанных с эксплуатацией, кроме электрической тяги поездов. Отдельно стоит отметить нежелезнодорожных нетяговых потребителей (районная нагрузка), которые потребляют электроэнергию в 4-6 раз больше, чем железнодорожные нетяговые потребители. Питание такой нагрузки осуществляется, как правило, в полосе 30-40 км от железной дороги [2].

Для электроснабжения нетяговых потребителей вдоль трассы железной дороги прокладывается две линии электропередачи – воздушная линия сигнализации, централизации, блокировки (ВЛ СЦБ), предназначенная исключительно для питания наиболее ответственных железнодорожных нетяговых потребителей, а также либо линия продольного электроснабжения напряжением 6-10 кВ (ВЛ ПЭ), либо линия «два провода – рельс» (ВЛ ДПР) напряжением 25 кВ. ВЛ ПЭ и ВЛ ДПР обеспечивают резервное питание устройств СЦБ, а также основное питание остальных нетяговых потребителей, в том числе нежелезнодорожных. В ряде случаев, при большой мощности нетяговых нагрузок, могут прокладываться одновременно ВЛ СЦБ, ВЛ ПЭ и ВЛ ДПР. Совокупность указанных линий электропередачи и подключенных к ним трансформаторных подстанций (ТП) представляет собой нетяговую сеть.

II. Организационная структура подразделений ОАО «РЖД», обеспечивающих эксплуатацию нетяговых сетей

Обеспечение функционирования системы электроснабжения нетяговых потребителей согласно существующей структуре ОАО «РЖД» входит в состав задач Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД». Основными видами деятельности указанного подразделения, применительно к нетяговому электроснабжению, являются удовлетворение потребностей в электроэнергии, ее покупка, передача и распределение, а также оказание услуг по передаче электрической энергии потребителям [3].

Кроме того, ряд задач по обеспечению функционирования системы электроснабжения нетяговых потребителей находится в ведении Управле-

ния электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ). Основными видами деятельности данного подразделения в области эксплуатации нетяговых сетей являются [4]:

- организация процесса нормального и противоаварийного управления системы электроснабжения нетяговых потребителей;
- реализация программ перспективного развития, технического обслуживания и ремонтов оборудования;
- взаимодействие с территориальными сетевыми организациями (ТСО), ОАО «СО ЕЭС», энергосбытовыми компаниями для решения технических вопросов обеспечения внешнего электроснабжения существующих объектов.

Непосредственно для эксплуатации железнодорожного хозяйства в структуре Трансэнерго по территориальному принципу выделяются Дирекции по энергообеспечению, в состав которых входит предприятие хозяйства (дистанции) электроснабжения, а в составе территориальных подразделений ЦДИ выделяется предприятие хозяйства СЦБ.

Дистанции сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ) осуществляют техническое обслуживание и ремонт конечных электроустановок СЦБ, а также сбор и формирование статистики по отказам и повреждениям оборудования СЦБ. Дистанции электроснабжения (ЭЧ) занимаются эксплуатацией электросетевого хозяйства и обеспечением надежного электроснабжения всех железнодорожных потребителей. На «Горьковской железной дороге» (ГЖД) такие функции возложены на ЭЧ-2 (Горьковская дистанция электроснабжения). Основные задачи, за выполнение которых отвечает дистанция электроснабжения, можно сформулировать на основе Типового устава [5]. К числу таких задач в контексте эксплуатации системы электроснабжения нетяговых потребителей относятся:

- проведение планово-предупредительных ремонтов (ППР) и технического обслуживания оборудования;
- разработка и внедрение программ по усилению, модернизации и обновлению элементов нетяговых сетей, реализация мероприятий по повышению их надежности на основе анализа работы устройств электроснабжения;
- снижение удельного расхода электроэнергии на измеритель работы железнодорожного транспорта.

Следует отметить, что в Типовом уставе [5] среди задач ЭЧ детально прописано обеспечение требуемых показателей качества электрической энергии в контактной сети, но при этом аналогичным вопросам в сетях нетягового электроснабжения внимание не уделено.

Обязанности по техническому обслуживанию и ремонту ВЛ ПЭ и ВЛ

СЦБ, проложенных вдоль железнодорожного полотна, возлагаются на производственное подразделение дистанции электроснабжения, получившее название ЭЧК – район контактной сети [6]. На железных дорогах РФ существует более 900 таких единиц дистанции электроснабжения. Эксплуатационная длина электрифицированной линии, обслуживаемой одним ЭЧК, обычно не превышает межподстанционной зоны (расстояние между смежными тяговыми подстанциями) для железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ и составляет 25-50 км. Дополнительно в обязанности ЭЧК входит обслуживание линий 0,4 кВ, участвующих в электроснабжении промежуточных станций и перегонов железных дорог от сетей ПЭ.

Для обслуживания участков электрических сетей, предназначенных для питания железнодорожных нетяговых потребителей, а также линий 0,4 кВ крупных станций и узлов, в составе ЭЧ выделяются подразделения ЭЧС – районы электрических сетей. Задачей ЭЧС является содержание и ремонт сети наружного освещения железнодорожных станций и поселков [7]. В отдельных случаях эти функции возлагаются также на подразделения ЭЧК. Непосредственно обслуживанием трансформаторов нетяговых сетей, в том числе и питающих нагрузки СЦБ, занимается подразделение РРУ – ремонтно-ревизионные участки (группа масляного хозяйства и испытаний). Также РРУ осуществляют отдельные виды работ по обслуживанию и эксплуатации оборудования нетяговых сетей (ППР, испытания и наладка оборудования, включая устройства защиты и автоматики ТП). В составе отдельных подразделений ЭЧ службы ЭЧК и ЭЧС могут быть объединены. Круглосуточное диспетчерское управление объектами электросетевого хозяйства, в том числе с целью обеспечения надежного электроснабжения нетяговых потребителей, входит в обязанности энергодиспетчерской группы (ЭЦЦ).

Как видно из рассмотренной структуры управления, эффективная работа по эксплуатации, обслуживанию и ремонту электроустановок нетяговых сетей возможна лишь при тесном взаимодействии отдельных подразделений дистанции электроснабжения. При этом обслуживание и ремонт непосредственно конечных потребителей СЦБ находится в ведомстве другой службы (ШЧ), что, как и территориальная рассредоточенность подразделений ЭЧС, ЭЧК и РРУ, затрудняет работу по обеспечению надежности и эффективности электроснабжения нетяговых потребителей.

III. Требования по надежности и резервированию систем электроснабжения нетяговых потребителей

В настоящее время действующего нормативного документа, устанавливающего требования к системам электроснабжения нетяговых потребителей в зависимости от категории надежности, не существует. На практике

категорийность отдельных электроприемников нетяговых нагрузок согласно [8] определяется в соответствии с Инструкцией ЦЭ-4846 [9]. В Инструкции категория надежности электроприемников нетяговых потребителей железнодорожного транспорта устанавливается в зависимости от их роли в обеспечении безопасности и бесперебойности движения поездов.

К первой категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, срыв графика движения поездов, значительный ущерб транспорту и хозяйству страны в целом. Такие электроприемники должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаиморезервируемых источников, перерыв питания допустим лишь на время его восстановления под действием автоматики – не более 1,3 с [10, 11].

Из состава электроприемников первой категории выделяется особая их группа, для которой надежная работа необходима для обеспечения бесперебойного движения поездов, предотвращения угрозы жизни людей, пожаров и исключения большого ущерба народному хозяйству. В качестве дополнительного независимого третьего источника для электроснабжения особой группы нетяговых электроприемников, а также в качестве второго основного источника для электроприемников первой категории надежности, используются дизель-генераторные агрегаты (ДГА) с запасом дизельного топлива, рассчитанным на его непрерывную работу в течение двух суток, либо аккумуляторные батареи. Задержка запуска ДГА должна быть в пределах 3-10 с [11].

Ко второй категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к нарушению движения поездов или производственного цикла крупных предприятий. Рекомендуется обеспечение электроприемников второй категории электроэнергией от двух источников питания, но при этом допустим перерыв электроснабжения на время выполнения переключений дежурным персоналом или оперативной выездной бригадой. Допускается питание этой категории электроприемников по одному фидеру или от одного трансформатора, если время восстановления указанных элементов системы электроснабжения не превышает одних суток [9]. В то же время кабельные вставки на линиях, питающих электроприемники второй категории, должны выполняться двумя кабелями, пропускная способность каждого из которых должна обеспечивать передачу максимальной мощности линии.

К третьей категории относятся все остальные электроприемники. Для них питание может выполняться от одного источника при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают одних суток.

Перечень электроприемников первой и второй категорий всех предприятий железных дорог по отдельным хозяйствам приведен в разделе 2 Инструкции [9]. Не вошедшие в этот перечень электроустановки относятся к третьей категории. Отдельно выделены общие электроприемники всех хозяйств, а также рассмотрена в виде таблицы категоричность электроприемников жилых и общественных зданий всех хозяйств.

Инструкция [9] в полном объеме определяет требования по обеспечению надежности функционирования ВЛ СЦБ и их центров питания как сетей электроснабжения потребителей I категории, поскольку подключение сторонних нагрузок к таким линиям запрещено. В то же время через ВЛ ПЭ или непосредственно от шин 6-35 кВ тяговых подстанций могут получать питание не только нетяговые электроприемники железных дорог, но и сторонние нежелезнодорожные потребители, для которых требования по надежности определяются иными нормативными документами – Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [12] и Правилами недискриминационного доступа [13].

Согласно ПУЭ, так же, как и в Инструкции [11], выделяются три категории электроприемников потребителей и вводятся основные требования к обеспечению их надежности. Положения ПУЭ определяют допустимую длительность единичного перерыва электроснабжения для электроприемников третьей категории (до суток), а также число основных и резервных источников питания для обеспечения их электроэнергией. В целом, понятия категории надежности ПУЭ для электроустановок сторонних железнодорожных потребителей практически полностью тождественны введенным Инструкцией [9] определениям категории надежности для нетяговых потребителей железных дорог. При этом в ПУЭ не устанавливается, какой субъект энергетики несет ответственность за обеспечение надежности, а какой финансирует ее обеспечение.

Ответ на этот вопрос можно найти в других действующих законодательных актах РФ. Так, действующая редакция Правил недискриминационного доступа [13], определяет понятие «категория надежности электроснабжения» как «содержание обязательств сетевой организации по обеспечению надежности снабжения электрической энергией энергопринимающих устройств, в отношении которых заключен договор». При этом обязанность каждой ТСО «осуществлять передачу электрической энергии в соответствии с согласованной категорией надежности энергопринимающих устройств потребителя услуг (потребителя электрической энергии, в интересах которого заключается договор)».

Отнесение энергопринимающих устройств потребителя электрической энергии к определенной категории надежности осуществляется потре-

бителем самостоятельно по признакам, практически полностью соответствующим определениям, приведенным в ПУЭ или Инструкции. Однако для первой особой категории дополнительно вводится требование наличия автономного резервного источника питания, который потребитель обязан поддерживать в состоянии готовности к использованию при возникновении вне регламентных отключений, введении аварийных ограничений режима потребления электрической энергии или использовании противоаварийной автоматики.

Кроме вышеперечисленных особенностей, Правила недискриминационного доступа определяют наиболее важное для потребителей электроэнергии требование: допустимое число часов отключения в год и сроки восстановления энергоснабжения для каждой из категорий надежности. Такие требования устанавливаются для электрических сетей, находящихся на балансе ТСО, к которым присоединены непосредственно электроприемники или сети потребителей. Для третьей категории надежности допустимое число часов отключения в год составляет 72 часа, но не более 24 часов подряд, включая срок восстановления электроснабжения.

Для первой категории надежности срок восстановления энергоснабжения не может превышать время автоматического восстановления питания, которое указывается в договоре при технологическом присоединении электроустановок потребителей или определяется ТСО по согласованию с потребителем исходя из максимального времени действия АВР.

Для второй категории надежности максимальный интервал восстановления электроснабжения прописывается в договоре энергоснабжения и определяется временем выполнения оперативным персоналом ТСО переключений в электроустановках, которое, исходя из практики эксплуатации, в распределительных сетях составляет в среднем 30 минут. Такой же предельный перерыв электроснабжения устанавливается для ответственных потребителей второй категории объектов сельскохозяйственного назначения в соответствии с Рекомендациями [14]. Это обстоятельство крайне важно учитывать, поскольку большинство сторонних нетяговых потребителей получают питание от ВЛ ПЭ или ВЛ ДПР именно в малонаселенной сельской местности, где отсутствуют развитые электрические сети общего назначения.

Допустимое число часов отключения в год для сторонних потребителей первой и второй категории надежности устанавливается в договоре энергоснабжения и не может быть более 72 часов, предусмотренных для третьей категории.

IV. Анализ возможных вариантов установления границ балансовой принадлежности

при подключении нетяговых нежелезнодорожных потребителей

Выше было установлено, что для обеспечения надежности электроснабжения сторонних нежелезнодорожных потребителей, подключенных к нетяговым сетям, необходимо помимо Инструкции [9], руководствоваться дополнительными требованиями. Как правило, такие потребители характеризуются низкой плотностью нагрузок и получают питание от ТП 6(10)/0,4 кВ или 25/0,4 кВ. Вопрос о разграничении ответственности за обеспечение надежности электрических сетей между нежелезнодорожным потребителем и ТСО (в качестве которой выступает подразделение ОАО «РЖД») решается согласно акту об установлении границ балансовой принадлежности (ГБП) и эксплуатационной ответственности, заключаемому на этапе технологического присоединения к сети.

Анализ однолинейных схем ВЛ ПЭ и ВЛ ДПР ГЖД позволяет выделить четыре основных варианта технологического присоединения нетяговых нежелезнодорожных потребителей:

- 1) ГБП устанавливается в распределительном устройстве (РУ) высокого напряжения (ВН) ТП (рис. 1 а, ГБП 1);
- 2) ГБП устанавливается в распределительном устройстве низкого напряжения (НН) ТП (рис. 1 а, ГБП 2);
- 3) ГБП устанавливается на вводном распределительном устройстве (ВРУ) потребителя (рис. 1 а, ГБП 3);
- 4) ГБП устанавливается на опорах отходящей к потребителю линии электропередачи в местах присоединения отпаек (рис. 1 б, ГБП 1, ГБП 2 и ГБП 3).

Все перечисленные варианты разграничения ГБП полностью соответствуют действующему законодательству РФ в области тарифообразования [15] и могут использоваться на любом уровне напряжения присоединения. В зависимости от типа потребителей, места установки расчетного счетчика и точки установления ГБП возникает ряд технических и экономических рисков, приводящих к снижению надежности и эффективности электроснабжения как сторонних нетяговых потребителей, так и железнодорожных нетяговых нагрузок. Рассмотрим каждую ситуацию более подробно.

С учетом рассмотренной ранее организационной структуры эксплуатации нетяговых сетей ОАО «РЖД», для обеспечения требований по надежности электроснабжения сторонних потребителей наиболее оптимальным является первый вариант. В этом случае все сети электроснабжения нежелезнодорожных потребителей уходят с баланса ОАО «РЖД» и подразделения ЭЧ занимаются обслуживанием только ВЛ ПЭ и ТП, питающих нагрузки СЦБ.

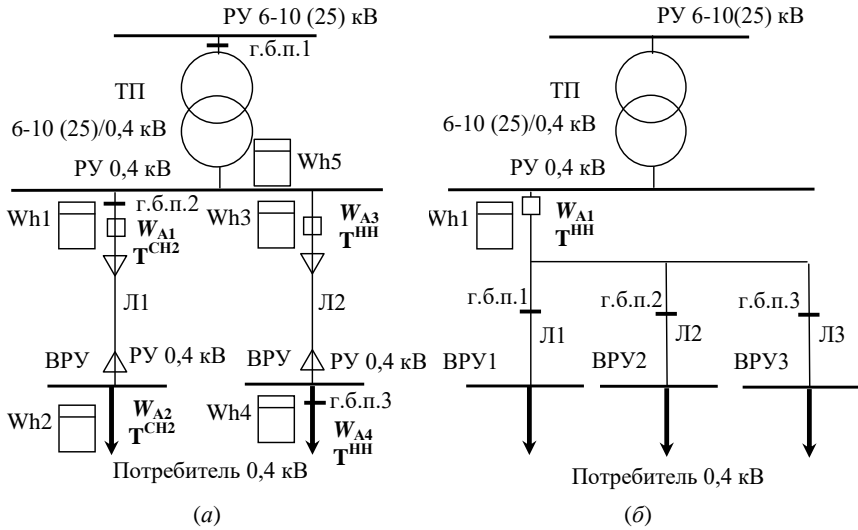


Рис. 1. Варианты разграничения границ балансовой принадлежности между нежелезнодорожным потребителем и подразделением ОАО «РЖД»

Fig. 1. Options for delimiting the boundaries of balance sheet ownership between a non-railway consumer and a division of Russian Railways

С учетом ограниченного состава оперативно выездных бригад, особенно дежурного персонала, такой вариант установления ГБП позволяет снизить время восстановления поврежденных элементов нетяговых сетей. В то же время возникает проблема с достоверным определением объема отпуска электрической энергии потребителю, поскольку счетчики на высокой стороне нетяговых трансформаторов обычно не устанавливаются. Поэтому определение отпущенной в сети сторонних нетяговых потребителей электроэнергии производится расчетным путем с учетом потерь в сети одним из следующих вариантов, рассмотренных далее.

1. Наиболее достоверный расчет на основе показаний счетчиков коммерческого учета, установленных на стороне НН трансформаторов (Wh_4 , рис. 1 а) – показания счетчиков приводятся к границе балансовой принадлежности с учетом потерь в трансформаторах, для определения которых целесообразно использовать полученную на основе Инструкции по расчету потерь [16] формулу:

$$\Delta W_{\Gamma} = \Delta W_{\text{X}} + \Delta W_{\text{H}} = \Delta P_{\text{X}} \sum_{i=1}^m T_{\text{pi}} \left(\frac{U_i}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + k_k \sum_{i=1}^m T_{\text{pi}} \frac{P_{\text{cp}}^2 + Q_{\text{cp}}^2}{U_i^2} R_{\Gamma} k_{\text{ф}}^2, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1)$$

где ΔW_{X} – потери электроэнергии холостого хода в силовом трансформаторе, определяются на основе приведенных в паспортных данных оборудования потерь мощности холостого хода ΔP_{X} , кВт·ч; T_{pi} – число часов работы трансформатора в i -м режиме, ч; U_i – напряжение на высшей стороне трансформатора в i -м режиме, кВ; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора, кВ; $k_{\text{ф}}^2$ – квадрат коэффициента формы графика суммарной нагрузки сети за расчетный интервал; k_k – коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки различных ветвей сети (принимается равным 0,99); P_{cp} , Q_{cp} – средние значения активной и реактивной мощности нагрузки за период T_i , кВт, квар; R_{Γ} – активное сопротивление трансформатора, Ом.

2 При отсутствии счетчиков на низкой стороне трансформаторов (или в случае, когда классы точности этих счетчиков не соответствуют требованиям к коммерческим системам учета) целесообразно использовать показания коммерческих приборов учета, установленных на головных участках отходящих присоединений 0,4 кВ от шин ТП ($Wh1$ и $Wh3$, рис. 1 а). Для определения отпуска в сеть необходимо произвести суммирование показаний счетчиков электроэнергии отходящих присоединений и полученную величину привести к границе балансовой принадлежности с учетом потерь в трансформаторах (1). Такой подход приводит к появлению небалансов электрической энергии и увеличению коммерческих потерь ввиду одновременности снятия показаний по отдельным приборам учета, различных классов точности и различной загрузки приборов измерительного тракта по отдельным присоединениям.

Для повышения достоверности определения объема электроэнергии, передаваемого через границу балансовой принадлежности, рекомендуется обеспечить снятие ежемесячных показаний всех приборов коммерческого учета в последний рабочий день месяца и применять в составе системы измерительного тракта трансформаторы тока (ТТ) класса S.

3. Наименее точный расчет отпуска в сеть будет при наличии приборов коммерческого учета только в ВРУ потребителей ($Wh2$ и $Wh4$, рис. 1 а). В этом случае определение отпуска в сеть на границе балансовой принадлежности потребует поэлементного расчета технических потерь электроэнергии как в трансформаторах, так и в разветвленной линии электропередачи 0,4 кВ. Такой расчет, особенно при недостатке схемно-технической информации о параметрах сети НН, является чрезвычайно трудоемкой задачей и сопровождается появлением существенных небалансов электроэнергии и коммерческих потерь ввиду отмеченных ранее причин. Поэтому

использование таких приборов учета в качестве расчетных является, по сути, чисто теоретическим подходом к определению отпуска электроэнергии в сеть и на практике нецелесообразно.

С точки зрения нежелезнодорожного потребителя, рассмотренный вариант разграничения балансовой принадлежности не является предпочтительным, поскольку именно за ним закрепляются обязанности по эксплуатации и обслуживанию как трансформатора, так и отходящих линий 0,4 кВ. В то же время этот вариант характеризуется более низкой тарифной ставкой за потребленную электроэнергию (СН2 при напряжении на стороне ВН трансформатора 6(10) кВ и СН1 при напряжении 25 кВ).

При установлении ГБП в распределительном устройстве НН трансформаторной подстанции, в обязанности подразделений ЭЧ дополнительно войдет эксплуатация ТП, обеспечивающих электроэнергией только сторонних нетяговых потребителей. При этом отпуск электрической энергии в сеть никак не изменится, какой-либо дополнительной прибыли подразделение ОАО «РЖД», выступающее в данном случае в роли ТСО, не получит. Все увеличение необходимой валовой выручки компенсируется затратами на обслуживание трансформаторов и связанного с ними оборудования, а также потерями электроэнергии в трансформаторах. Поэтому такой вариант разграничения балансовой принадлежности является менее предпочтительным и приводит к дополнительному объему работ для оперативного персонала, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на обслуживании других участков нетяговых сетей, предназначенных для питания железнодорожных нагрузок. В то же время для нежелезнодорожных потребителей такой вариант имеет ряд преимуществ:

- ставка тарифа на электроэнергию соответствует напряжению на стороне ВН ТП;
- оплата за электроэнергию производится непосредственно согласно показаниям счетчика, поскольку он расположен на ГБП;
- на балансе потребителя не находится высоковольтного электрооборудования, требующего более жестких требований к квалификации обслуживающего персонала.

Разграничение балансовой принадлежности на шинах НН питающей ТП наиболее эффективно для промышленных предприятий, имеющих в своем штате персонал для обслуживания сетей 0,4 кВ, а также крупных организаций жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Для потребителей категории «население» или приравненных к нему категорий (садовые товарищества, гаражные кооперативы) такой вариант разграничения балансовой принадлежности нецелесообразен.

Установление ГБП на ВРУ потребителя или в местах присоединения

отпаек при заключении договора на оказание услуг по передаче электрической энергии подразделениям ОАО «РЖД» следует категорически избегать. В этих случаях на баланс попадает существенная доля оборудования 0,4 кВ и, как следствие, обязательства по обеспечению надежности его функционирования. Кроме того, могут возникать сложности с приведением показаний приборов учета к ГБП и существенно возрастают риски появления коммерческих потерь электроэнергии. Разграничение балансовой принадлежности на ВРУ наиболее предпочтительно для потребителей категории «население». Установление ГБП на опорах отходящей к потребителю линии электропередачи в местах присоединения отпаек стоит рассматривать лишь как промежуточный этап развития договорных отношений ТСО – потребитель, характерный для сельской местности, и не отвечающий интересам ни ОАО «РЖД», ни потребителя.

Проведенный анализ вариантов разграничения балансовой принадлежности показывает, что для максимального обеспечения надежности функционирования железнодорожных потребителей предпочтительно, чтобы на балансе подразделений ОАО «РЖД» находились ВЛ СЦБ и ВЛ ПЭ, а также только те ТП и распределительные линии электропередачи 0,4-10 кВ, которые обеспечивают питание нетяговых железнодорожных нагрузок.

V. Заключение

Существующая структура подразделений ОАО «РЖД», обеспечивающих эксплуатацию нетяговых сетей, затрудняет работу по обеспечению надежности и эффективности электроснабжения нетяговых потребителей ввиду разделения функций между отдельными подразделениями дистанции электроснабжения и их территориальной рассредоточенности.

Требования по надежности электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей устанавливаются в зависимости от их роли в обеспечении безопасности и бесперебойности движения поездов отраслевыми документами ОАО «РЖД» и практически полностью тождественны определениям категорий надежности согласно ПУЭ. Для обеспечения надежности сторонних нежелезнодорожных потребителей, подключенных к нетяговым сетям, помимо отраслевых документов ОАО «РЖД» необходимо руководствоваться дополнительными требованиями. Для обеспечения требований по надежности электроснабжения нетяговых потребителей наиболее рациональным вариантом является определение ГБП в РУ ВН трансформаторной подстанции, подключенной к ВЛ ПЭ или ВЛ ДПР.

Установление ГБП на ВРУ 0,4 кВ потребителя или в местах присоединения ответвлений от магистрали на напряжении 0,4 кВ при заключении договора на оказание услуг по передаче электрической энергии подразделениям ОАО «РЖД» следует категорически избегать.

© Вуколов В.Ю. 2023

*Поступила в редакцию 22.01.2023**Принята к публикации 28.04.2023**Received 22.01.2023**Accepted 28.04.2023***Библиографический список**

- [1] ГОСТ Р 53685-2009. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. Введ. 2009-12-15. М.: Стандартинформ, 2009. – 28 с.
- [2] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [3] ОАО «РЖД». Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». Основная информация. [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=18#enttab-main/> (дата обращения 15.01.2023).
- [4] Управление электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры. Основная информация. ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=18#enttab-main/> (дата обращения 15.01.2023).
- [5] ЦЭ-53. Типовой устав дистанции электроснабжения отделения железной дороги. Введ. 1992-07-21. Отм. 2019-08-26. М.: ТРАНСИЗДАТ, 1992. – 6 с.
- [6] Конарев Н.С. Железнодорожный транспорт / Энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – 559 с.
- [7] Методика нормирования расхода электроэнергии для стационарных объектов хозяйства электрификации и электроснабжения железных дорог. Введ. 2000-12-08. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2000. – 20 с.
- [8] СП 226.1326000.2014. Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. Введ. 2014-12-01.
- [9] ЦЭ-4846. Инструкция по категорийности электроприемников нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Введ. 1991-03-11. Отм. 2019-05-22. М.: Транспорт, 1992.
- [10] Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утв. приказом Минтранса России № 250. Введ. 2022-06-23.
- [11] ЦЭ-881. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств электроснабжения сигнализации, централизации, блокировки и связи на федеральном железнодорожном транспорте. Утв. Министерством путей сообщения РФ от 14.03.2002 г.
- [12] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
- [13] Правила недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг. Утв. постановлением Правительства РФ № 861 от 27.12.2004 г.
- [14] Методические рекомендации для определения категорийности потребителей по надежности электроснабжения. Утв. решением Электроэнергетического Совета СНГ, протокол № 55 от 25.10.2019 г.

- [15] О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии. Утв. постановлением Правительства РФ № 442 от 04.05.2012 г.
- [16] Инструкция по организации в Министерстве Энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. приказом Министерства Энергетики РФ № 326 от 30.12.2008 г.

References

- [1] Electrification and power supply of railways. Terms and Definitions, GOST R 53685-2009, Dec. 2009.
- [2] К.Г. Марквардт, *Elektrosnabzhenie elektrificirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [3] Transenergo – filial ОАО «РЖД». Osnovnaya informaciya [Transenergo is a branch of Russian Railways. Basic information]. [Online]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=18#enttab-main/> [Accessed: Jan. 15, 2023] (in Russian).
- [4] Upravlenie elektrifikacii i elektrosnabzheniya Central'noj direkcii infrastruktury. Osnovnaya informaciya [Department of Electrification and Power Supply of the Central Directorate of Infrastructure. Basic information]. [Online]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=18#enttab-main/> [Accessed: Jan. 15, 2023] (in Russian).
- [5] Tipovoj ustav distancii elektrosnabzheniya otdeleniya zheleznoj dorogi [Typical charter for the distance of power supply of the railway department], TSE-53, July 1992. Moscow: TRANSIZDAT, 1992 (in Russian).
- [6] N.S. Konarev, *ZHeleznodorozhnyj transport. Enciklopediya [Railway transport. Encyclopedia]*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1995 (in Russian).
- [7] Metodika normirovaniya raskhoda elektroenergii dlya stacionarnykh ob'ektov hoz'yajstva elektrifikacii i elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Methodology for rationing electricity consumption for stationary facilities of the economy of electrification and power supply of railways]. Moscow: TRANSIZDAT, 2000 (in Russian).
- [8] Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebitelej. Pravila proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstrukcii [Power supply of non-traction consumers. Rules for design, construction and reconstruction], SR 226.1326000.2014, Dec. 2014 (in Russian).
- [9] Instrukciya po kategorijnosti elektroprivmnikov netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta [Instructions on the categorization of electrical receivers of non-traction consumers of railway transport], TSE-4846, March 1991. Moscow: Transport, 1992 (in Russian).
- [10] Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossijskoj Federacii [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation], Order of the Mintrans of Russia № 250, June 2023 (in Russian).
- [11] Instrukciya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv elektrosnabzheniya signalizacii, centralizacii, blokirovki i svyazi na federal'nom zheleznodorozhnom transporte [Instructions for the maintenance and repair of power supply devices for signaling, centralization, blocking and communication on federal railway

- transport], TSE-881. Approved by Ministry of Railways of the Russian Federation dated on March 14, 2002 (in Russian).
- [12] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. Moscow: Energoservis, 2007 (in Russian)
- [13] *Pravila nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po peredache elektricheskoy energii i okazaniya etih uslug [Rules for non-discriminatory access to electricity transmission services and provision of these services]*, Approved by Order of the Government of the Russian Federation № 861 dated on Dec. 27, 2004 (in Russian).
- [14] *Metodicheskie rekomendacii dlya opredeleniya kategorijnosti potrebitelej po nadezhnosti elektrosnabzheniya [Guidelines for determining the categorization of consumers in terms of power supply reliability]*. Approved by Decision of the CIS Electric Power Council № 55 dated on Oct. 25, 2019 (in Russian).
- [15] *O funkcionirovanii roznichnyh rynkov elektricheskoy energii, polnom i (ili) chastichnom ogranichenii rezhima potrebleniya elektricheskoy energii [On the functioning of retail electricity markets, full and (or) partial restriction of the mode of consumption of electricity]*, Approved by Order of the Government of the Russian Federation №442 dated on May 04, 2012 (in Russian).
- [16] *Instrukciya po organizacii v Ministerstve Energetiki Rossijskoj Federacii raboty po raschetu i obosnovaniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam [Instructions on the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on the calculation and justification of the standards for technological losses of electricity during its transmission through electric networks]*, Approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation № 326 dated on Dec. 30, 2008 (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 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_78

**ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА
ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

А.Н. Висящев

e-mail: visan@istu.edu

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Э.Р. Пленков

e-mail: eduard.plenkov@mail.ru

ООО «Иркутская нефтяная компания»
Иркутск, Россия

Д.С. Федосов

ORCID: [0000-0001-5989-9549](https://orcid.org/0000-0001-5989-9549) e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Представлены результаты применения математической модели линии электропередачи, учитывающей сопротивление заземляющих устройств опор линии и подстанций по ее концам, а также сопротивление грозозащитного троса и способа его заземления. Эти результаты позволили установить, что при наиболее частых однофазных коротких замыканиях переходное сопротивление имеет не только активную, но и значительную реактивную составляющую. Отмечено влияние способа заземления грозозащитного троса (напрямую или через искровые промежутки) и пробоя искрового промежутка в месте короткого замыкания на величину и характер переходного сопротивления в месте короткого замыкания. Актуальность задачи определяется тем, что неучет реактивной составляющей переходного сопротивления при однофазных коротких замыканиях приводит к появлению погрешностей до 10 % при применении наиболее простых методов определения места повреждения по замерам токов и напряжений с одной стороны воздушной линии. Подтверждено, что при междуфазных коротких замыканиях переходное сопротивление это только активное сопротивление электрической дуги. Рассмотрены результаты измерений токов и напряжений на реальной линии электропередачи 110 кВ, проведена обработка замеров для определения места повреждений с учетом и без учета реактивной составляющей переходного сопротивления. Подтверждено влияние реактивной составляющей сопротивления на точность определения места повреждения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, грозозащитный трос, короткое замыкание, определение места повреждения, переходное сопротивление, сопротивление дуги, электрическая дуга.

Для цитирования: Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Федосов Д.С. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 78-89. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_78

EVALUATION OF VALUE AND TYPE OF FAULT IMPEDANCE ON HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

A.N. Visyashchev

e-mail: visan@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

E.R. Plenkov

e-mail: eduard.plenkov@mail.ru

Irkutsk Oil Company LLC

Irkutsk, Russia

D.S. Fedosov

ORCID: [0000-0001-5989-9549](https://orcid.org/0000-0001-5989-9549) e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

Abstract. The article deals with the issue of taking into account the value and type of the transient impedance at the point of short circuit when remotely locating the fault on overhead power lines. It is traditionally believed that the transient impedance is only the resistance of the electric arc and therefore has an active type. Several methods of one-sided fault location have been implemented using this assumption. However, the mathematical model of the power line applied in this paper, taking into account the resistance of the grounding devices of the line supports and substations at its ends, as well as the resistance of the ground wire cable and the method of its grounding. This model made possible to establish the following: with the most frequent single-phase short circuits, the transient resistance has not only an active, but also a significant reactive part. The paper notes the influence of the method of grounding the ground wire cable (solidly or through spark gaps) and the breakdown of the spark gap at the place of fault on the value and type of fault impedance. Failure to take into account the reactive component of the fault impedance in single-phase faults will lead to errors of up to 10% when using the simplest methods for fault location by measuring currents and voltages on one side of the overhead line. At the same time, it has been confirmed that in case of phase-to-phase faults, the transient impedance is only the active resistance of the electric arc. The results of measurements of currents

and voltages on a real 110 kV transmission line are considered, measurements are processed to locate the fault point with and without taking into account the reactive component of the transient impedance. The influence of the reactive component of the impedance on the accuracy of fault location has been confirmed.

Keywords: arc resistance, electric arc, fault impedance, fault location, overhead ground wire, overhead transmission line, short circuit.

For citation: A.N. Visyashchev, E.R. Plenkov and D.S. Fedosov, «Evaluation of value and character of fault impedance on high voltage overhead transmission lines», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 78-89, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_78

I. Введение

Определение места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения (ВЛ) является важнейшей задачей электросетевых предприятий. Точное ОМП на ВЛ позволяет существенно сократить время ликвидации аварии. На данный момент в России и за рубежом разработано множество методов и устройств ОМП, однако их погрешность все еще достаточно велика. В связи с этим, актуально развитие ОМП, чему уделяется большое внимание. Широкое распространение получили методы ОМП по параметрам аварийного режима, которые делятся на методы одностороннего и двухстороннего измерения [1-8]. В 1990-е гг. микропроцессорные устройства, реализующие методы ОМП, начали внедряться в отечественную энергетику. На тот момент наибольшее распространение получили устройства, реализующие методы ОМП по измерениям токов и напряжений с одной стороны ВЛ (односторонние методы ОМП), что связано с простотой использования устройств одностороннего ОМП.

Одним из важных факторов, влияющих на точность односторонних методов ОМП, является переходное сопротивление в месте короткого замыкания (КЗ) [1-10], поэтому внимание к этому параметру является приоритетным при разработке методов ОМП. При междуфазных КЗ на ВЛ переходное сопротивление в месте КЗ определяется только сопротивлением электрической дуги $Z_{\Gamma} = R_{\Gamma}$. При КЗ на землю переходное сопротивление определяется сопротивлением электрической дуги R_{Γ} и сопротивлением грозозащитного троса (ГТ) $Z_{\Gamma T}$, сопротивлениями контуров заземления опор $Z_{3y,оп}$, сопротивлениями контуров заземления подстанций $Z_{\Gamma C}$ по концам ВЛ. Определение параметров дуги R_{Γ} в месте КЗ рассмотрено в ряде работ [1-9], однако до сих пор отсутствует достоверная оценка величины и характера переходного сопротивления Z_{Γ} в месте КЗ. Исследования величины и характера переходного сопротивления Z_{Γ} в месте КЗ проведены на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ.

II. Переходное сопротивление

в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи

Исследования [9, 11], показывают, что сопротивление электрической дуги R_d имеет практически чисто активный характер, его величина в основном зависит от длины электрической дуги и величины тока КЗ. Сопротивления контуров заземления опор $Z_{3у.оп}$ и подстанций $Z_{ПС}$ зависят от конструкции заземляющего устройства и удельного сопротивления грунта [12-14]. Сопротивление грозозащитного троса $Z_{ГТ}$ зависит от параметров грозозащитного троса, высоты подвески и способа его заземления.

Согласно [12-16], на ВЛ 150 кВ и ниже изолированное крепление ГТ выполняется на металлических и железобетонных анкерных опорах. Для снижения потерь электроэнергии от индуктированных в ГТ токов крепление ГТ на опорах ВЛ 220-750 кВ выполняют при помощи изоляторов, снабженных шунтирующими искровыми промежутками (ИП). ГТ заземляется наглухо на каждой опоре на подходах ВЛ 110-330 кВ к подстанциям, а также на каждом анкерном участке длиной до 10 км.

При КЗ вследствие перекрытия по поверхности гирлянды изоляторов на опоре, где ГТ изолирован, ток КЗ $I_{КЗ}$ протекает через тело опоры и ее заземляющее устройство, т. е. $I_{КЗ} = I_{3у}$ (рис. 1, а).

Если ГТ на опоре заземлен наглухо, то часть тока КЗ $I_{КЗ}$ протекает через ГТ: $I_{ГТ} = I_{КЗ} - I_{3у}$ (рис. 1, б). Если ГТ на опоре заземлен через ИП, то при КЗ возможно два случая:

- 1) ИП не пробит, тогда $I_{КЗ} = I_{3у}$, что эквивалентно показанному на рис. 1, а для изолированного троса;
- 2) ИП пробит, тогда $I_{ГТ} = I_{КЗ} - I_{3у}$, что эквивалентно показанному на рис. 1, б для глухозаземленного троса.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема замещения ВЛ с двухсторонним питанием при КЗ для случая, когда ГТ заземлен наглухо на конечных и анкерных опорах, и пробит ИП в точке КЗ. Данная схема справедлива для случая КЗ, когда ГТ по всей длине ВЛ на опорах заземлен наглухо.

На схеме (рис. 2) показаны: E'_C, E''_C и Z'_C, Z''_C – соответственно ЭДС и сопротивления систем (С1 и С2) по концам ВЛ; $I'_{КЗ}, I''_{КЗ}$ и $Z'_{КЗ}, Z''_{КЗ}$ – токи и сопротивления заземляющих устройств С1 и С2; I', I'' и $Z'_Л, Z''_Л$ – соответственно токи и сопротивления участков поврежденной ВЛ; $I'_{ГТ}, I''_{ГТ}$ и $Z'_{ГТ}, Z''_{ГТ}$ – соответственно токи и сопротивления ГТ; $I'_{3у}, I''_{3у}$ и $Z'_{3у}, Z''_{3у}$ – соответственно токи и сопротивления заземляющих устройств опор; $Z_{3у}$ – сопротивление заземляющего устройства опоры, в месте КЗ; $I_{КЗ}$ и R_d – соответственно ток КЗ и сопротивление электрической дуги в месте КЗ.

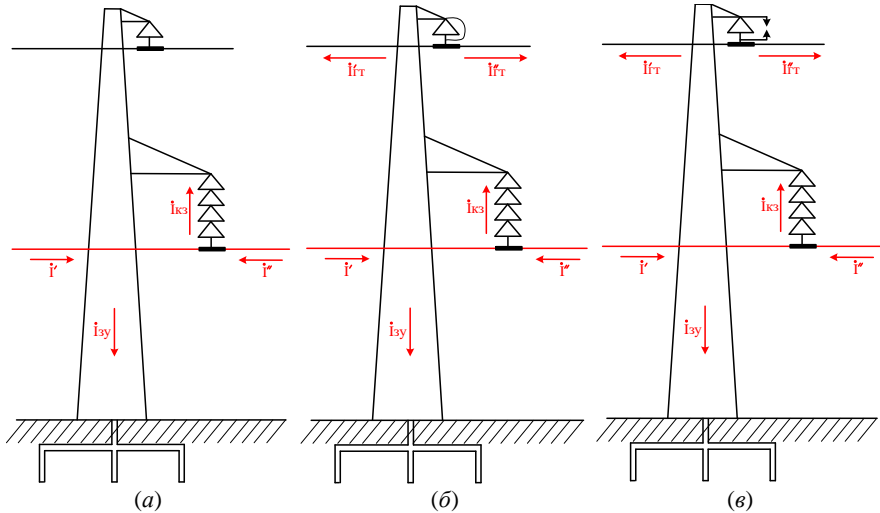


Рис. 1. Составляющие тока короткого замыкания на опоре ВЛ:
 ГТ на опоре изолирован (а); ГТ на опоре заземлен наглухо (б);
 ГТ на опоре заземлен через ИП (в)

Fig. 1. The components of the short-circuit current on the pole of the overhead line:
 ground wire on the pole is isolated (а); ground wire on the pole is solidly grounded (б);
 ground wire on the pole is grounded through a spark gap (в)

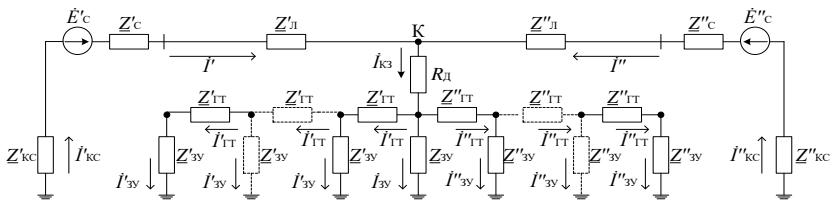


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения ВЛ с заземленным наглухо ГТ на конечных и анкерных опорах и с пробитым ИП в месте КЗ

Fig. 2. Equivalent circuit of an overhead line with a solidly grounded ground wire on the terminal and anchor poles and with a broken-down spark gap at the place of fault

Согласно рис. 2, путь протекания тока от точки КЗ до точек нулевого потенциала проходит через сопротивление электрической дуги, сопротивление контуров заземления опор и сопротивления ГТ. При этом переходное сопротивление в месте КЗ определено по выражению:

$$\underline{Z}_{\Pi} = R_{\text{д}} + \frac{\underline{Z}_{\text{ЗУ}} \cdot \underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}{\underline{Z}_{\text{ЗУ}} + \underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление ГТ, заземляющих устройств опор и заземляющих устройств подстанций относительно точки КЗ.

III. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушной линии электропередачи

Для оценки величины и характера переходного сопротивления в месте КЗ проведены исследования на модели одноцепной ВЛ 110 кВ. Модель ВЛ 110 кВ имеет данные: протяженность 100 км; марка провода АС-150/24; тип промежуточных опор ПБ-108; ГТ марки АЖС-70/39, который по всей длине на опорах заземлен через ИП, а на конечных опорах заземлен наглухо.

Модель ВЛ 110 кВ с ГТ показана на рис. 3. ВЛ 110 кВ разделена на 10 участков, соответствующих анкерным пролетам. Сопротивление системы в начале ВЛ принято чисто индуктивным $\underline{Z}'_{\text{С}} = 0 + j30$ Ом, в конце ВЛ – чисто активным $\underline{Z}''_{\text{С}} = 30 + j0$ Ом. Сопротивление электрической дуги в месте КЗ и контур заземлений опор приняты чисто активными: $R_{\text{д}} = 5$ Ом и $\underline{Z}_{\text{ЗУ}} = 10 + j0$ Ом. Емкостные проводимости ВЛ не учитывались.

В соответствии с методикой расчета, описанной в [1, 2], получена матрица погонных продольных сопротивлений ВЛ в фазных координатах:

$$\underline{Z}_{\text{пог}} = \begin{array}{cccc} 0,254 + j0,738 & 0,05 + j0,377 & 0,05 + j0,334 & \dots \\ 0,05 + j0,377 & 0,254 + j0,738 & 0,05 + j0,359 & \dots \\ 0,05 + j0,334 & 0,05 + j0,359 & 0,254 + j0,738 & \dots \\ 0,05 + j0,392 & 0,05 + j0,365 & 0,05 + j0,369 & \dots \\ \dots & 0,05 + j0,392 & & \\ \dots & 0,05 + j0,365 & & \\ \dots & 0,05 + j0,369 & & \\ \dots & 0,559 + j0,754 & & \end{array}, \text{ Ом/км.} \quad (2)$$

Поскольку на ВЛ около 90 % КЗ являются однофазными, то на составленной модели проведена серия однофазных КЗ в разных точках ВЛ: на расстоянии 20 км, 50 км, 80 км от начала ВЛ. В каждой точке КЗ по соотношению напряжения и тока [9] определено значение переходного сопротивления для следующих вариантов заземления ГТ на ВЛ:

вариант 1 – ГТ на конечных опорах заземлен наглухо, на остальных опорах заземлен через ИП, при этом в месте КЗ не пробит ИП (что соответствует изолированному ГТ по всей длине ВЛ);

вариант 2 – ГТ на конечных опорах заземлен наглухо, на остальных опорах заземлен через ИП, при этом в месте КЗ пробит ИП;

вариант 3 – ГТ на конечных и анкерных опорах заземлен наглухо, при этом в месте КЗ пробит ИП (или КЗ на анкерной опоре). Данное состояние модели ВЛ также соответствует состоянию, где ГТ по всей длине ВЛ заземлен наглухо.

В табл. 1 представлены результаты расчетов переходного сопротивления в трех точках КЗ на ВЛ при различных исполнениях заземления ГТ, также представлены результаты расчетного расстояния до точки КЗ методом одностороннего ОМП (L -метр) [1, 2].

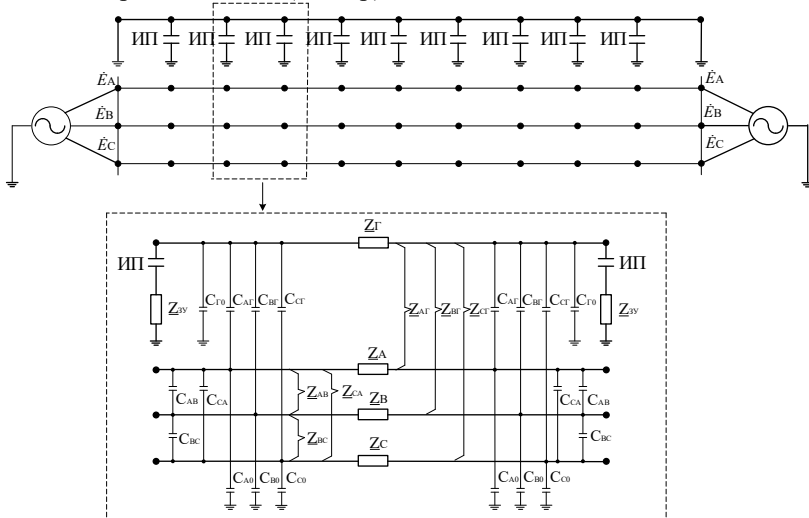


Рис. 3. Модель ВЛ 110 кВ с ГТ, заземленным наглухо на конечных опорах и через ИП на остальных опорах

Fig. 3. 110 kV overhead line model with a ground wire grounded solidly at the terminal supports and through spark gaps at the remaining supports

Представленные в табл. 1 расчеты показывают, что:

- 1) когда ток короткого замыкания $\dot{I}_{КЗ}$ протекает через тело опоры и ее заземляющее устройство согласно рис. 1, а, переходное сопротивление Z_{Π} в месте КЗ при заданных параметрах модели ВЛ имеет чисто активный характер, при этом величина переходного сопротивления Z_{Π} не зависит

от расстояния до места КЗ, а погрешность метода одностороннего ОМП составляет 0 %;

- 2) когда ток короткого замыкания $I_{кз}$ будет протекать через ГТ согласно рис. 1, б и 1, в, переходное сопротивление $Z_{п}$ в месте КЗ при заданных параметрах модели ВЛ имеет активно-индуктивный характер, при этом величина переходного сопротивления $Z_{п}$ практически не зависит от расстояния до места КЗ, а погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП варьируется от 4 до 10 %.

Таблица 1.

Переходное сопротивление в точке КЗ при различных вариантах заземления ГТ и расчетное расстояние до точки КЗ, полученное дистанционным методом одностороннего ОМП на модели ВЛ 110 кВ

Table 1.

Fault impedance with different options for grounding the ground wire and the calculated distance to the fault point obtained by the remote one-sided fault location method on the 110 kV overhead line model

Фактическое расстояние до точки КЗ $L_{кз.факт.}$, км	Расчетные значения Переходного сопротивления $Z_{п}$, Ом	Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{кз.расч.}$, км
<i>Вариант 1</i>		
20	$15 + j0$	20
50	$15 + j0$	50
80	$15 + j0$	80
<i>Вариант 2</i>		
20	$11,804 + j1,502$	18,96
50	$12,561 + j1,519$	47,33
80	$11,814 + j1,514$	75,52
<i>Вариант 3</i>		
20	$9,174 + j1,616$	18,66
50	$9,18 + j1,67$	47,18
80	$9,176 + j1,621$	75,12

В табл. 2 приведены результаты расчетов переходного $Z_{п}$ сопротивления в месте КЗ на реальной ВЛ 110 кВ, которая со следующими данными: длина 67,38 км; марка провода АС-150/24; тип промежуточных опор ПБ-108; ГТ марки ТК-50, который по всей длине заземлен наглухо на опорах.

Представленные в табл. 2 расчеты показывают, что:

- 1) при двухфазном КЗ (№ 1), когда в месте КЗ есть только сопротивление электрической дуги $R_{д}$, переходное сопротивление $Z_{п}$ имеет малую индуктивную составляющую. Это связано с погрешностью измерения регистрирующих приборов и принятыми допущениями в расчетах, при

этом погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП составляет около 0,5 %;

- 2) при однофазном КЗ (№ 2-7) переходное сопротивление Z_{Π} в месте КЗ имеет активно-индуктивный характер, величина которого практически не зависит от расстояния до места КЗ, при этом погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП варьируется от 4 до 8 %.

Таблица 2.

Переходное сопротивление в месте КЗ и расчетное расстояние до точки КЗ, полученное дистанционным методом одностороннего ОМП на ВЛ 110 кВ

Table 2.

Fault impedance and the calculated distance to the fault point, obtained by the remote one-sided fault location method on a 110 kV overhead line

№	Поврежденная фаза	Фактическое расстояние до точки КЗ $L_{КЗ.факт.}$, км	Z_{Π} , Ом	Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{КЗ.расч.}$, км
1	AB	29,85	$3,452 + j0,167$	29,94
2	A	48,65	$6,468 + j3,569$	44,11
3	A	64,12	$5,68 + j2,534$	58,76
4	A	51,4	$6,371 + j3,525$	47,80
5	A	42,92	$6,278 + j3,942$	36,59
6	A	42,6	$8,48 + j4,031$	36,31
7	A	28,101	$6,09 + j4,02$	24,27

IV. Выводы

Применение математической модели и данных реальной линии электропередачи показало, что переходное сопротивление в месте короткого замыкания на линии электропередачи в зависимости от исполнения крепления грозозащитного троса может иметь как активный, так и активно-индуктивный характер. Неучет активно-индуктивного характера переходного сопротивления при одностороннем определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи может привести к большим погрешностям, так как односторонние методы используются в предположении, что переходное сопротивление в месте короткого замыкания имеет чисто активный характер. Именно поэтому применение методов определения места повреждения по замерам параметров аварийного режима с одной стороны линии электропередачи обосновано только в случае невозможности использования двухсторонних методов, точность которых не зависит от величины и характера переходного сопротивления и которые следует считать основными.

© Висящев А.Н., 2023
© Пленков Э.Р., 2023
© Федосов Д.С., 2023

Поступила в редакцию 21.03.2023

Принята к публикации 14.04.2023

Received 21.03.2023

Accepted 14.04.2023

Библиографический список

- [1] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Часть 1. Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 188 с.
- [2] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Часть 2. Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 146 с.
- [3] Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Анализ дистанционных методов определения мест повреждений линий электропередачи // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 3 (15). С. 14-18.
- [4] Куликов А.Л., Обалин М.Д. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи // Известия вузов. Электромеханика. 2015. № 2. С. 70-75. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [5] Personal E., García A., Parejo A., Larios D.F., Biscarri F., León C. A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems // Energies. 2016. Vol. 9. No. 12. 1022. DOI: 10.3390/en9121022
- [6] Chisholm W.A., Petrache E., Bologna F. Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection // proc. IEEE PES T&D 2010, Apr. 19-22, 2010, New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010. P. 1-6. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484321
- [7] Zhou Y., Xu G., Chen Y. Fault location in power electrical traction line system // Energies. 2012. Vol. 5. No. 12. P. 5002-5018. DOI: 10.3390/en5125002
- [8] Машенков В.М. Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110-750 кВ. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2005. – 47 с.
- [9] Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи // IV Международ. науч.-тех. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Июнь 3-7, 2013, Екатеринбург, Россия. С. 12-14.
- [10] Хузяшев Р.Г., Писковацкий Ю.В., Якимов О.В. Источники методической погрешности одностороннего алгоритма определения места повреждения на воздушной линии электропередачи по параметрам аварийного режима // Известия Высших Учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2008. № 11-12. С. 96-104.
- [11] Terzija V.V., Koglin H.-J. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19. No. 3. P. 1012-1017. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829912
- [12] СТО 56947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. Введ. 2011-10-14. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 75 с.

- [13] Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: ЭНАС, 2006. – 552 с.
- [14] РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. Введ. 1999-07-12. С.-Пб.: ПЭИПК, 1999. – 353 с.
- [15] Шевченко М.А., Большанин Г.А. Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142
- [16] Дмитриев М.В., Родчихин С.В. Грозозащитные тросы ВЛ 35-750 кВ. Выбор мест заземления // Новости электротехники. 2017. № 2 (104). С. 2-5.

References

- [1] A.N. Visyashchev, *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyah elektropredachi. Chast' 1 [Devices and methods for fault location on power lines. Part 1]*. Irkutsk: ISTU, 2001 (in Russian).
- [2] A.N. Visyashchev, *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyah elektropredachi. Chast' 2 [Devices and methods for fault location on power lines. Part 2]*. Irkutsk: ISTU, 2001 (in Russian).
- [3] A.A. Shilin and N.S. Artyushenko, “Analysis of remote methods of fault location of power lines”, *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*, vol. 3, no. 15, pp. 14-18, 2016.
- [4] A.L. Kulikov and M.D. Obalin, “Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines”, *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, no. 2, pp. 70-75, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [5] E. Personal, A. García, A. Parejo, D.F. Larios, F. Biscarri and C. León, “A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems”, *Energies*, vol. 9, no. 12, 1022, 2016. DOI: 10.3390/en9121022
- [6] W.A. Chisholm, E. Petrache and F. Bologna, “Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection”, in proc. *IEEE PES T&D 2010*, Apr. 19-22, 2010, New Orleans, LA, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484321
- [7] Y. Zhou, G. Xu and Y. Chen, “Fault location in power electrical traction line system”, *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 5002-5018, 2012. DOI: 10.3390/en5125002
- [8] V.M. Mashenkov, *Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL napryazheniem 110-750 kV [Features of determining the location of damage on overhead lines with a voltage of 110-750 kV]*. St. Petersburg: Energy Training Center, 2005 (in Russian).
- [9] A.N. Podshivalin and G.N. Ismukov, “Adaptaciya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii linij elektropredachi [Adaptation of methods for determining the location of damage to modern requirements for the operation of power transmission lines]”, in proc. *IV Int. sci.-tech. conf. “Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem [Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems]”*, Jun. 3-7, 2013, Yekaterinburg, Russia, pp. 12-14 (in Russian).
- [10] R.G. Huzyashev, Yu.V. Piskovatskiy and O.V. Yakimov, “The sources of truncation error of fault-location inferencing one-sided algorithm on the overhead transmission

- line regarding emergency conditions characteristics”, *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 11-12, pp. 96-104, 2008.
- [11] V.V. Terzija and H.-J. Koglin, “On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1012-1017, Jul. 2004. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829912
- [12] Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu sostoyaniya zazemlyayushchih ustrojstv elektroustanovok [Guidelines for monitoring the condition of grounding devices of electrical installations], STO 56947007-29.130.15.105-2011, Oct. 2011 (in Russian).
- [13] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. 7th ed. Moscow: ENAS, 2006 (in Russian).
- [14] Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenapryazhenij [Guidelines for the protection of 6-1150 kV electrical networks from lightning and internal overvoltages], RD 153-34.3-35.125-99, July 1999 (in Russian).
- [15] M.A. Shevchenko and G.A. Bolshanin, “Overhead ground-wire cable taken into account while modeling the transmission of lower quality electrical power”, *Systems. Methods. Technologies*, vol. 3, no. 31, pp. 135-142, 2016. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142
- [16] M.V. Dmitriev and S.V. Rodchikhin, “Grozozashhitny`e trosy` VL 35-750 kV. Vy`bor mest zazemleniya [Ground-wire cables of 35-750 kV overhead lines. Choice of grounding points]”, *Novosti e`lektrotekhniki [News of electrical engineering]*, vol. 2, no. 104, pp. 2-5, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Висящев Александр Никандрович, кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Aleksandr N. Visyashchev, Cand. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Пленков Эдуард Русланович, начальник центра управления сетями ООО «Иркутская нефтяная компания», соискатель Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Eduard R. Plenkov, head of the electrical network control center of Irkutsk Oil Company LLC, external PhD student of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Федосов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Denis S. Fedosov, Cand. Sci. (Eng.), head of a department of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВРЕДНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПЕРЕДАЧИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОНИЖЕННОГО КАЧЕСТВА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ*

А.В. Кузнецов

e-mail: kav2@ulstu.ru

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Россия

В.В. Чикин

ORCID: 0000-0002-3295-2650 e-mail: chikin_vladislav@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Россия

Представлен новый способ оценки стоимости вредных последствий с использованием затрат на осуществление деятельности по улучшению качества электроэнергии за счет установки технических устройств подавления электромагнитных помех. В существующей модели управления качеством электроэнергии эффективным управляющим фактором являются правовые методы воздействия на участников технологического процесса передачи и потребления электроэнергии. Они связаны с обязательством возмещения стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества. Узаконенной формой возмещения стоимости вредных последствий является возмещение причиненного реального ущерба. Вопрос по расчету величины ущерба, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор остается открытым. Утвержденные методики расчета реального ущерба отсутствуют, что порождает трудности управления качеством электроэнергии. Правовые органы не имеют оснований для вынесения решений по возмещению причиненного реального ущерба при отсутствии значения его величины. Использование затрат, связанных с доходностью проекта установки технических устройств подавления электромагнитных помех, более эффективно воздействует на потребителя. Управляющий фактор модели управления при этом реализуется в форме неустойки, которая является договорной величиной, не требующей привязки к конкретным ценам на вышедшие из строя электрооборудование и технические средства. Новый способ меняет цель управления качеством электроэнергии. Вместо обеспечения справедливости за счет возмещения реального ущерба, новая цель предполагает уменьшение уровня электромагнитных помех, искажающих качество электроэнергии, в системах электроснабжения за счет установки технических устройств их подавления. Изложенные рекомендации могут быть учтены при совершенствовании энергетического законодательства.

* Статья публикуется в дискуссионном порядке

Ключевые слова: вредные последствия, искажающий потребитель, качество электроэнергии, неустойка, реальный ущерб, управление, электроэнергия пониженного качества.

Для цитирования: Кузнецов А.В., Чикин В.В. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 90-100. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_90

ASSESSMENT OF COST OF HARMFUL EFFECTS OF TRANSMISSION AND CONSUMPTION OF ELECTRICITY OF REDUCED QUALITY IN POWER SUPPLY SYSTEMS

A.V. Kuznetsov

e-mail: kav2@ulstu.ru

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

V.V. Chikin

ORCID: 0000-0002-3295-2650 e-mail: chikin_vladislav@mail.ru

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

Abstract. The most effective controlling factor in the existing power quality management model is the legal means of influence on the participants of the technological process of power transmission and consumption, connected with the obligation to compensate for the cost of harmful consequences of power transmission and consumption of low quality. A legitimate form of compensation for the cost of harmful consequences is compensation for the real damage caused. The problem of defining the amount of real damage is being solved by many scientists, but the question of its calculation remains open to date. The approved methods of calculation of the real damage are absent, that generates difficulties of power quality management. The legal system has no basis for making decisions on compensation for real damage in the absence of the value of the damage. A new way of assessing the cost of harmful consequences using the cost of activities to improve the power quality by installing technical devices for suppressing electromagnetic disturbances is proposed. A more effective impact on the consumer provides a usage of costs associated with the profitability of the project of installing technical devices for the suppression of electromagnetic disturbances. The controlling factor for this control model is in the form of a penalty, which is a contractual value and does not require a specific price for the failed electrical and technical equipment. The new way changes the purpose of power quality management. Instead of ensuring fairness by compensating for real damages, the new objective involves reducing the level of electromagnetic disturbances that distort the power quality in electricity supply systems by installing technical devices for their suppression. The proposed recommendations can be taken into account when improving energy legislation.

Keywords: distorting consumer, electricity of low quality, harmful consequences, management, penalty, power quality, real damage.

For citation: A.V. Kuznetsov and V.V. Chikin, «Assessment of cost of harmful effects of transmission and consumption of electricity of reduced quality in power supply systems», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 90-100, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_90

I. Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к системам электро-снабжения, наряду с бесперебойностью поставки электроэнергии (требование надежности), является обеспечение электромагнитной совместимости технических средств потребителей электроэнергии (требование качества электроэнергии (КЭ)). Поэтому актуальными являются исследования, направленные на совершенствование оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества.

В существующей модели управления КЭ используются технические параметры, измеряемые микропроцессорными приборами учета или системой мониторинга КЭ [1]. Управляющим фактором, обладающим наибольшей эффективностью, являются правовые методы воздействия на участников технологического процесса передачи и потребления электроэнергии, связанные с обязательством возмещения стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества. Под электроэнергией пониженного качества понимается электроэнергия, требования к качеству которой не удовлетворяют нормам ГОСТ 32144-2013 [2].

Специальным правилом, изложенным в ст. 547 ГК РФ [3], обязательство возмещения стоимости вредных последствий узаконено и реализовано в форме возмещения причиненного реального ущерба, а стоимость вредных последствий оценена в виде суммы реального ущерба, причиненного электрооборудованию сетевой организации и техническим средствам потребителей при передаче и потреблении электроэнергии пониженного качества. К сожалению, расчет суммы реального ущерба связан со значительными трудностями. Точно определить значение суммы практически невозможно. В настоящее время отсутствуют утвержденные методики [4-6]. Использование реального ущерба при рассмотрении дел в арбитражных судах затруднительно. Существующая модель управления работает неэффективно. В статье изложены результаты анализа способов оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества, включая узаконенный и действующий способ. Авторы ставили задачу выбора и обоснования способа оценки, который обеспечит повышение эффективности модели управления КЭ.

II. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества

Наиболее эффективным управляющим фактором в модели управления КЭ является возмещение стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества. Эту сумму участник технологического процесса, искажающий КЭ (далее – искажающий участник), возмещает другому участнику, вынужденному передавать или потреблять электроэнергию пониженного качества.

На сегодняшний день для оценки стоимости вредных последствий используют способ, предполагающий расчет причиненного реального ущерба, величину которого определить достаточно проблематично. Невозможно определить, в какой степени на преждевременный выход из строя электрооборудования или технических средств оказал какой-либо показатель качества электроэнергии (ПКЭ). Преждевременный выход из строя возможен по целому ряду причин: дефекты при их изготовлении, результаты нарушения технологии эксплуатации, погодные условия и т.п. Среди этих причин, возможно, присутствует отклонение ПКЭ от нормированных значений. Доля воздействия ПКЭ на преждевременный выход из строя практически неопределима. Дело усложняется тем, что ПКЭ достаточно много. Реальный ущерб должен определяться по каждому показателю отдельно. Искажающих участников технологического процесса в электрической сети сетевой организации тоже может быть достаточно много. Технологические процессы потребителей электроэнергии не находятся в статическом состоянии, они динамичны. Необходимо также учитывать тот факт, что воздействие ПКЭ на преждевременный выход из строя имеет кумулятивный характер и зависит от величины и длительности отклонения ПКЭ от нормы. До сих пор не решен вопрос, кому из участников технологического процесса и в какой пропорции адресовать ущерб, причиненный при передаче и потреблении электроэнергии пониженного качества. В итоге реально существующий ущерб является скрытым и неопределенным [7, 8].

Возможно, что предъявляемая участникам технологического процесса величина реального ущерба, подлежащая возмещению, может достигать значительных величин. Реальный ущерб может быть не соизмерим со стоимостью электроэнергии, искаженной в электрической сети сетевой организации, и платежеспособностью участников технологического процесса. Модель управления не должна допускать такую ситуацию, а сумма реального ущерба должна быть разумной.

Несмотря на то, что вопрос определения ущерба был предметом ряда исследований [8-10], утвержденных методик расчета ущерба не существует [4-6]. Это порождает трудности управления КЭ. Правовая система не имеет

оснований для вынесения решений по возмещению причиненного реального ущерба при отсутствии значения его величины [11, 12]. Вопрос о величине ущерба все еще остается на стадии исследований и разработки. Необходимо рассмотреть возможность применения в модели управления КЭ другого способа оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества.

III. Новый способ оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества

Существующий способ предполагает ряд действий для оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества. По известным методикам определяется сумма реального ущерба, причиненного электрооборудованию сетевой организации и техническим средствам потребителей при передаче и потреблении электроэнергии пониженного качества. Эту сумму предъявляют искажающим участникам технологического процесса для возмещения. В этом случае целью управления является обеспечение справедливости за счет возмещения реального ущерба. Потенциальная сложность определения реального ущерба препятствует принятию управленческих решений, при этом не учитываются возможности участников технологического процесса уменьшить уровень генерируемых ими электромагнитных помех, искажающих КЭ.

Предлагаемый способ оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества предусматривает отказ от определения суммы реального ущерба. Стоимость вредных последствий оценивать так, чтобы она могла обеспечить доходность проекта установки технических устройств подавления электромагнитных помех с учетом их цены и приемлемого срока окупаемости. При этом несколько меняется цель управления. Вместо обеспечения справедливости за счет возмещения реального ущерба, новая цель предполагает уменьшение уровня электромагнитных помех, искажающих КЭ, в системах электроснабжения за счет установки технических устройств их подавления.

Новый подход к решению задачи оценки стоимости вредных последствий позволит игнорировать определение размера размытых затрат сетевой организации и подключенных к ее электрической сети потребителей, связанных с причиняемым реальным ущербом. Использование затрат, связанных с доходностью проекта установки технических устройств подавления электромагнитных помех, обеспечивает более эффективное воздействие на потребителя. Таким образом, достигается главная цель управления – ликвидация вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения. Предлагаемый способ предусматривает, что сумма реального ущерба, причиненного элек-

трооборудованию сетевой организации и техническим средствам потребителей, заменяется затратами на осуществление деятельности по улучшению КЭ за счет установки технических устройств подавления электромагнитных помех и реализовать в форме взыскания неустойки. В отличие от реального ущерба, неустойка является договорной величиной, не требующей привязки к конкретным ценам на вышедшие из строя электрооборудование и технические средства. К сожалению, использование неустойки исключается статьей 547 ГК РФ [3]. Эта статья является специальным правилом регулирования правоотношений по договору энергоснабжения относительно участников технологического процесса передачи и потребления электроэнергии и декларирует применение возмещения причиненного реального ущерба. Тем не менее, ряд авторов публикаций не соглашаются с этим и представляют этот момент как несовершенство законодательства [11, 13, 14]. Правомочность использования взыскания неустойки подтверждается общими правилами регулирования правоотношений, определенными ст. 12 ГК РФ [15].

IV. Определение суммы неустойки

для искажающих потребителей сетевой организации

При новом способе оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества определяется сумма неустойки, которую должен возместить искажающий участник технологического процесса. Если искажающих участников несколько, то каждому из них предъявляется определенная сумма неустойки. В целом по сетевой организации сумма неустойки складывается из сумм неустоек, предъявляемых каждому искажающему участнику технологического процесса. Управляющий эффект при таком способе максимален для каждого искажающего участника. Таким образом, либо искажающий участник платит неустойку, сумма которой соизмерима с затратами на деятельность по улучшению КЭ за счет установки технических устройств подавления электромагнитных помех, либо он устанавливает такие устройства, что обеспечивает ликвидацию связанных с ним вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения. При этом остается не затронутым вопрос о том, каким участникам и в какой степени оплачиваются вредные последствия передачи и потребления электроэнергии пониженного качества. Каждый участник, вынужденный передавать или потреблять электроэнергию пониженного качества, должен получить свою долю из общей суммы неустойки в сетевой организации.

Если рассматривать ПКЭ, связанные с протеканием гармонических составляющих тока, которые являются электромагнитными помехами, то в соответствии с технологическим процессом передачи электроэнергии в электрические сети потребителей с нелинейной нагрузкой гармонические

составляющие тока генерируются нелинейными нагрузками искажающих потребителей и распространяются по электрическим сетям сетевой организации и других потребителей сетевой организации, вынужденных потреблять электроэнергию пониженного качества. Сетевая организация является посредником в процессе распространения гармонических составляющих тока и возмещает стоимость вредных последствий посредством действующей системы тарифообразования. В связи с этим участниками, задействованными в процессе взыскания и распределения суммы неустойки, являются искажающие потребители и потребители, вынужденные потреблять электроэнергию пониженного качества. Сетевая организация в процессе взыскания неустойки при оценке стоимости вредных последствий не задействована.

В вопросе определения суммы неустойки, предъявляемой каждому искажающему потребителю, есть один непрозрачный аспект. Каждый искажающий потребитель получает счет на оплату неустойки, размер которой определяется ценой технических устройств подавления гармонических составляющих тока. При этом потребитель может эпизодически и кратковременно генерировать в электрическую сеть гармонические составляющие тока при их незначительной величине. Как более интенсивный в отношении генерации гармонических составляющих тока потребитель, так и менее интенсивный могут иметь соразмерные суммы неустойки, определяемые ценой устройств подавления соответствующей мощности. Это накладывает более тяжелые условия оплаты неустойки на потребителей с меньшей интенсивностью генерации гармонических составляющих тока.

Очевидно, что наибольшие вредные последствия связаны с потребителем, у которого наблюдаются наибольшие по величине и длительности генерируемые гармонические составляющие тока в электрическую сеть. Остальные потребители связаны с меньшими вредными последствиями. Однако более жесткие условия оплаты неустойки для части искажающих потребителей с меньшей интенсивностью генерации гармонических составляющих тока порождают мысли о правовом неравенстве. Это может препятствовать использованию способа на практике. Необходимо приравнять условия оплаты неустойки для всех искажающих потребителей в зависимости от интенсивности генерации гармонических составляющих тока в электрическую сеть сетевой организации.

Предложение авторов сводится к следующему.

1. По результатам проводимых для всех потребителей сетевой организации измерений сравниваются энергии гармонических составляющих, генерируемых в электрическую сеть сетевой организации [5, 16], и определяется наиболее интенсивный потребитель. Для него рассчитывается сумма не-

устойки в соответствии с ценой технических устройств подавления гармонических составляющих тока.

2. Остальным искажающим потребителям сумма неустойки рассчитывается не по цене устройств подавления требуемой мощности, а относительно суммы неустойки наиболее интенсивного потребителя пропорционально относительной интенсивности искажения.

3. Относительная интенсивность искажения для каждого искажающего потребителя определяется отношением энергии гармонических составляющих, генерируемых потребителем в электрическую сеть сетевой организации, к энергии гармонических составляющих наиболее интенсивного потребителя.

4. Потребители, вынужденные потреблять электроэнергию пониженного качества, получают компенсацию в виде части неустойки, предъявленной для оплаты всем искажающим потребителям. Эти части определяются по долевному принципу. Доля может определяться пропорционально получаемой электроэнергии пониженного качества или более упрощенно – пропорционально потребляемой электроэнергии.

Применение нового способа требует разработки методики расчета суммы неустойки для искажающих потребителей в зависимости от степени искажения. Методики долевого распределения суммы неустойки между потребителями, вынужденными потреблять электроэнергию пониженного качества. Эти рекомендации могут быть учтены при совершенствовании энергетического законодательства.

V. Выводы

1. Предложен новый способ оценки стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества, который учитывает использование затрат на осуществление деятельности по улучшению КЭ за счет установки технических устройств подавления электромагнитных помех.

2. Предложенный способ меняет цель управления КЭ. Вместо обеспечения справедливости за счет возмещения реального ущерба, целью становится снижение уровня электромагнитных помех, искажающих КЭ в системах электроснабжения за счет установки технических устройств их подавления.

3. При совершенствовании энергетического законодательства предлагается учитывать новый способ оценки стоимости вредных последствий от передачи и потребления электроэнергии пониженного качества, реализованный в форме взыскания неустойки.

Поступила в редакцию 06.04.2023

Принята к публикации 10.05.2023

Received 06.04.2023

Accepted 10.05.2023

Библиографический список

- [1] Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Мониторинг качества электроэнергии в электрических сетях. Для кого, зачем и как? // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 5 (38). С. 28-37.
- [2] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [3] Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26.01.1996 № 14-ФЗ (ред. от 01.07.2021). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/ (дата обращения 28.03.2023).
- [4] Коверникова Л.И., Серков А.В., Шамонов Р.Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 75-85.
- [5] Коверникова Л.И., Суднова В.В., Шамонов Р.Г. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
- [6] Кононенко В.Ю., Мурачев А.С., Смоленцев Д.О. Задачи научно-технической политики в области качества электроэнергии на современном этапе формирования цифровой экономики РФ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2 (47). С. 28-31.
- [7] Добрусин Л.Н. Инвестиции в электроэнергетику России и программа повышения их эффективности // VI Всерос. энергетический форум «ТЭК России в XXI веке», Апрель 1-4, 2008, Москва, Россия.
- [8] Воронин В.А., Лебедев Г.М. Об экономическом ущербе от снижения качества электроэнергии и источниках его возникновения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 3 (115). С. 79-85.
- [9] Лищенко Д.Н., Шалев А.С. Обзор экономического ущерба от некачественной электроэнергии // XVIII Всерос. науч.-практ. конф. «Общество. Наука. Инновации (НПК-2018)». Апрель 02-28, 2018, Киров, Россия: ВятГУ, 2018. Т. 2. С. 524-529.
- [10] Вагин Г.Я., Севостьянов А.А. Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 188 с.
- [11] Машкин А., Якимов А., Машкин В. Ответственность за снижение качества электроэнергии. Обзор арбитражной практики // Новости электротехники. 2008. № 6 (54). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/54/12.php> (дата обращения: 29.03.2023).
- [12] Серков А.В. Проблемы юридической ответственности за нарушение требований к качеству поставляемой энергии // Промышленная энергетика. 2017. № 1. С. 48-54.

- [13] Грищенко Д.О. Распределение мер ответственности участников электроэнергетического рынка за качество электроэнергии // Вестник Саратовского Государственного Социально-Экономического Университета. 2013. № 1 (45). С. 40-43.
- [14] Серков А. Правовая ответственность за нарушение требований к качеству энергии // Коммунальный комплекс России. 2016. № 10 (148). [Электронный ресурс]. URL: <http://gkhprofi.ru/a-serkov-pravovaya-otvetstvennost-za-narusheniya-trebovanij-k-kachestvu-energii/> (дата обращения 30.03.2023).
- [15] Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 № 51-ФЗ (ред. от 16.04.2022). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/ (дата обращения 29.03.2023).
- [16] Соколов В.С. Способ выявления источников несанкционированного искажения качества электроэнергии, Пат. 2216747 RU, заявл. 13.03.02; опубл. 20.11.03. – Бюл. № 32.

References

- [1] L.I. Kovernikova, V.N. Tulsy and R.G. Shamonov, “Monitoring kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyah. Dlya kogo, zachem i kak? [Monitoring of electric power quality in electric networks. For whom, why and how?]”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 5, no. 38, pp. 28-37, Sept.-Oct. 2016 (in Russian).
- [2] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [3] Grazhdanskiy kodeks Rossijskoj Federacii (chast' vtoraya) [Civil Code of the Russian Federation (Part Two)] no. 14-FZ dated on 26.01.1996 (ed. 01.07.2021). [Online]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/ [Accessed: Mar. 28, 2023] (in Russian).
- [4] L.I. Kovernikova, A.V. Serkov and R.G. Shamonov, “On electric power quality management in Russia in the past, present and future”, *Energy Policy*, no. 1, pp. 75-85, Jan. 2018.
- [5] L.I. Kovernikova, V.V. Sudnova and R.G. Shamonov, *Kachestvo elektricheskoy energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ih resheniyu [Power energy quality: current state, problems and proposals for their solution]*. Novosibirsk: Nauka, 2017 (in Russian).
- [6] V.Y. Kononenko, A.S. Murachev and D.O. Smolentsev, “The tasks of scientific and technical policy in the field of power quality at the present stage of digital economy development in the Russian Federation”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 47, pp. 28-31, Feb. 2018.
- [7] L.N. Dobrusin, “Investicii v elektroenergetiku Rossii i programma povysheniya ih effektivnosti [Investments in electric power industry of Russia and their efficiency improvement programme]”, in proc. *VI All-Russian energy forum “TEK Rossii v XXI veke [Fuel and Energy Complex of Russia in the XXI century]”*, April 1-4, 2008, Moscow, Russia (in Russian).
- [8] V.A. Voronin and G.M. Lebedev, “On the economic damage from reduction of power quality and the sources of its origin”, *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, vol. 3, no. 115, pp. 79-85, Mar. 2016.

- [9] D.N. Lishchenko and A.S. Shalev, “Obzor ekonomicheskogo ushcherba ot nekachestvennoj elektroenergii [Review of economic damage from low-quality electricity]”, in proc. XVIII All-Russian scient.-practl. conf. “Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2018) [Society. The science. Innovations (NPK-2018)]”, Apr. 02-28, 2018, Kirov, Russia, vol. 2, pp. 524-529 (in Russian).
- [10] G.Ya. Vagin and A.A. Sevostyanov, *Pokazateli kachestva elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya [Power quality indicators in power supply systems]*. N. Novgorod: NNSTU, 2017 (in Russian).
- [11] A Mashkin, A. Yakimov and V. Mashkin, “Otvetstvennost' za snizhenie kachestva elektroenergii. Obzor arbitrazhnoj praktiki [Liability for power quality reduction. Review of arbitration practice]”, *The News of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 54, 2008. [Online]. Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/54/12.php> (in Russian).
- [12] A.V. Serkov, “Issues of legal liability for violation of the requirements to the quality of the supplied energy”, *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 48-54, 2017.
- [13] D.O. Grishchenko, “Distribution of responsibility for the electric power quality among the participants of the electric power market”, *Vestnik of Saratov State Socio-Economic University*, vol. 1, no. 45, pp. 40-43, Jan. 2013.
- [14] A. Serkov, “Pravovaya otvetstvennost' za narushenie trebovanij k kachestvu energii [Legal responsibility for violation of power quality requirements]”, *Communal Complex of Russia*, vol. 10, no. 148, 2016. [Online]. Available at: <http://gkhprofi.ru/a-serkov-pravovaya-otvetstvennost-za-narushenie-trebovanij-k-kachestvu-energii> (in Russian).
- [15] Grazhdanskij kodeks Rossijskoj Federacii (chast' pervaya) [Civil Code of the Russian Federation (Part One)] no. 51-FZ dated on 30.11.1994 (ed. 16.04.2022). [Online]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/ [Accessed: Mar. 29, 2023] (in Russian).
- [16] V.S. Sokolov, “Sposob vyuyavleniya istochnikov nesankcionirovannogo iskazheniya kachestva elektroenergii [Method of detecting the sources of unauthorized distortion of power quality]”, Patent RU 2216747, Nov. 20, 2003 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецов Анатолий Викторович,
доктор технических наук, профессор
Ульяновского государственного техни-
ческого университета, г. Ульяновск, Рос-
сийская Федерация

Anatoly V. Kuznetsov, D. Sci. (Eng.),
professor of the Ulyanovsk State Tech-
nical University, Ulyanovsk, Russian
Federation

Чикин Владислав Владимирович,
ассистент, аспирант Ульяновского госу-
дарственного технического универси-
тета, г. Ульяновск, Российская Федера-
ция

Vladislav V. Chikin, assistant, post-
graduate student of the Ulyanovsk State
Technical University, Ulyanovsk, Rus-
sian Federation

УДК 621.316.925

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_101

КОМПЕНСАЦИЯ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

А.В. СлузоваORCID: 0000-0002-9838-2996 e-mail: simaginaanastasia30@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Лоскутов**ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены негативные последствия, возникающие в сетях среднего напряжения при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), а также технические средства, предназначенные для предотвращения таких последствий. Исследовано применение для этих целей фазоповоротного устройства (ФПУ) на базе многообмоточных трансформаторов и тиристорных коммутаторов. Обсуждается функциональная схема и алгоритм управления ФПУ, а также результаты экспериментов, подтверждающих эффективность его применения для компенсации емкостного тока при возникновении различных видов ОЗЗ.

Ключевые слова: емкостный ток, дугогасящий реактор, компенсация емкостного тока, однофазное замыкание на землю, перенапряжения, фазоповоротное устройство.

Для цитирования: Слузова А.В., Лоскутов А.А. Компенсация токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с применением фазоповоротного устройства // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 101-120. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_101

COMPENSATION OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT CURRENTS IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL USING PHASE-REVERSAL DEVICE

A.V. Sluzova

ORCID: 0000-0002-9838-2996 e-mail: simaginaanastasia30@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Loskutov

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: The negative consequences arising in medium-voltage networks with single-phase earth faults, as well as technical means designed to prevent such consequences, are considered. The use of a phase-reversal device based on multi-winding transformers and thyristor switches for these purposes is being investigated. The functional scheme and control algorithm of the phase-reversal device are discussed, as well as the results of experiments confirming the effectiveness of its use for compensation of capacitive current in the occurrence of various types of single-phase earth faults.

Keywords: capacitive current, arcing reactor, capacitive current compensation, single-phase earth fault, overvoltages, phase shifter.

For citation: A.V. Sluzova and A.A. Loskutov, «Compensation of single-phase earth fault currents in networks with isolated neutral using phase-reversal device», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 101-120, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_101

I. Введение

К наиболее частым видам повреждений на линиях электропередачи относится однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). На ОЗЗ приходится более 75 % всех повреждений в электроэнергетических системах. Это вид повреждения, при котором одна из фаз трехфазной системы замыкается на землю или на элемент, электрически связанный с землей [1]. Причинами возникновения ОЗЗ являются старение изоляции, развитие скрытых заводских дефектов или дефектов, образовавшихся при строительстве и монтаже, механические разрушения кабелей при земляных работах и др.

Такое повреждение не требует немедленного отключения, однако, его длительное воздействие может привести к развитию аварийной ситуации. В настоящее время в России приблизительно 20 % кабельных сетей 6-10 кВ работают в режиме компенсированной нейтрали и около 80 % – с

изолированной нейтралью. Основным недостатком работы сети с изолированной нейтралью является высокая вероятность возникновения дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), сопровождающихся опасными перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения. По данным [2], до 80 % ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции, имеют дуговой перемежающийся характер, обуславливающий высокую вероятность перехода замыкания на землю в более тяжелые виды повреждений: двойные и многоместные замыкания на землю или междуфазные короткие замыкания (КЗ) в месте ОЗЗ.

Дуговые прерывистые ОЗЗ являются наиболее опасным видом электрических повреждений в сетях 6-10 кВ, поскольку сопровождаются значительными перенапряжениями на нейтрали и неповрежденных фазах. Перенапряжения на неповрежденных фазах, распространяющиеся по всей электрически связанной сети, могут обусловить возникновение вторичных пробоев в точках ослабленной изоляции и переходы относительно безопасных ОЗЗ двойные и многоместные замыкания на землю, отключаемые релейной защитой. Особенно опасны двойные и многоместные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ собственных нужд электростанций и систем электроснабжения различных отраслей промышленности, приводящие к внезапным отключениям двух и более электродвигателей и серьезным нарушениям технологических процессов, связанных с производством или потреблением электроэнергии.

II. Требования к компенсации емкостного тока замыкания на землю

В соответствии с типовой инструкцией по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ (ТИ 34-70-070-87) РД 34.20.179 [3] к основным требованиям относятся следующие четыре.

1. Компенсация емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ должна применяться для уменьшения тока замыкания на землю, снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги, уменьшения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и создания условий для ее самопогасания.

2. Компенсация должна применяться при следующих значениях емкостного тока замыкания на землю сети в нормальных режимах ее работы:

- в воздушных сетях 6-20 кВ на железобетонных или металлических опорах и во всех сетях 35 кВ – при токе более 10 А;
- в воздушных сетях, не имеющих железобетонных или металлических опор: при напряжении 6 кВ – при токе более 30 А, при напряжении 10 кВ – более 20 А, при напряжении 15-20 кВ – более 15 А. Компенсацию допускается применять также в воздушных сетях 6-10 кВ при емкостном токе менее 10 А.

3. Автоматическая настройка компенсации рекомендуется в сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю более 10 А и в сетях 6-10 кВ при емкостном токе более 50 А.

4. В сетях с компенсацией емкостного тока степень несимметрии фазных напряжений не должна превышать 0,75 % фазного напряжения, а напряжение смещения нейтрали 15 % фазного напряжения. Допускается напряжение смещения нейтрали в течение 1 ч до 30 % и в течение времени поиска места замыкания на землю – 100 % фазного напряжения.

III. Оценка эффективности устройств компенсации емкостного тока ОЗЗ

На рис. 1 представлены основные технические решения, предназначенные для компенсации негативных последствий воздействия токов ОЗЗ в сетях среднего напряжения.

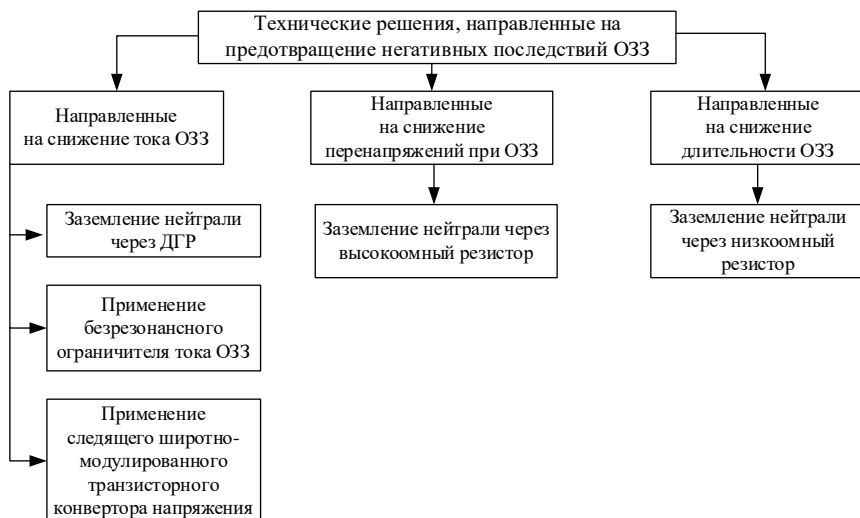


Рис. 1. Классификация устройств, предотвращающих негативные последствия ОЗЗ

Fig. 1. Classification of devices that prevent the negative effects of single-phase earth fault

Традиционно как в России, так и за рубежом для ограничения емкостных токов используются дугогасящие реакторы (ДГР) [5]. Устраняя ряд негативных факторов, создаваемых ОЗЗ, ДГР имеют определенные недо-

статки: высокую стоимость и необходимость перестройки ТП (трансформаторной подстанции); сложность настройки под емкость разветвленной сети с распределенными параметрами и организацию селективной защиты от ОЗЗ, так как ток замыкания компенсируется практически до нуля.

При феррорезонансной настройке сопротивление ДГР равняется полному емкостному сопротивлению сети ($X_L = X_{C\Sigma}$). Осциллограммы токов и напряжений при однократном и двукратном пробое приведены на рис. 2 и 3.

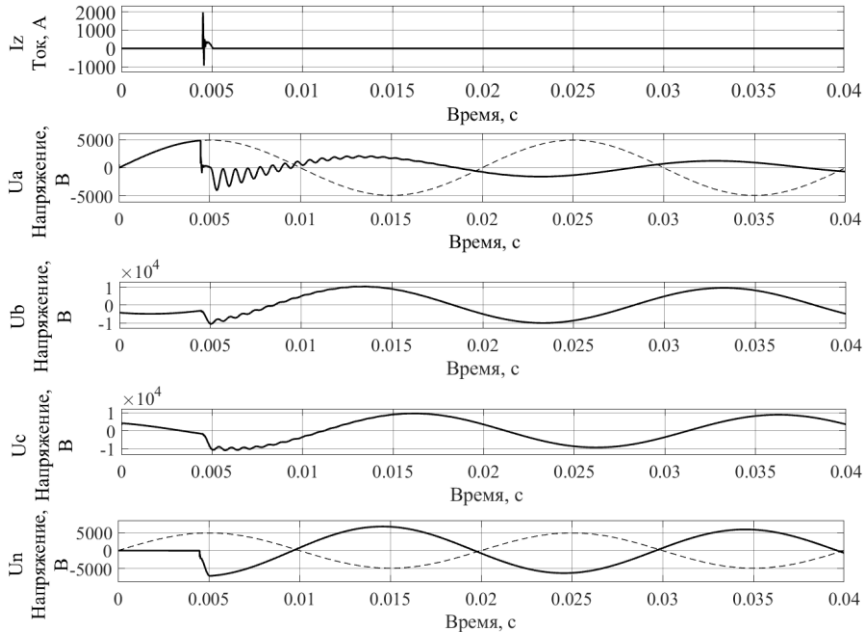


Рис. 2. Процессы в сети с резонансно-заземленной нейтралью при однократном пробое изоляции:

I_z – ток ОЗЗ; U_a – напряжение поврежденной фазы А; U_b – напряжение неповрежденной фазы В; U_c – напряжение неповрежденной фазы С; U_n – напряжение в нейтральной точке

Fig. 2. Processes in a network with a resonantly grounded neutral with a single insulation breakdown:

I_z – single-phase earth fault current; U_a – voltage of the damaged phase А; U_b – undamaged phase voltage В; U_c – the undamaged phase voltage С; U_n – voltage at the neutral point

Как видно из представленных выше осциллограмм, при полной компенсации емкостного тока кратность перенапряжений не изменяется при повторном пробое. После восстановления изоляции напряжение на нейтрали медленно снижается до нуля, при этом процесс является колебательным. Это обусловлено влиянием индуктивности ДГР и повышением порядка электрической цепи, описывающего ее дифференциальные уравнения.

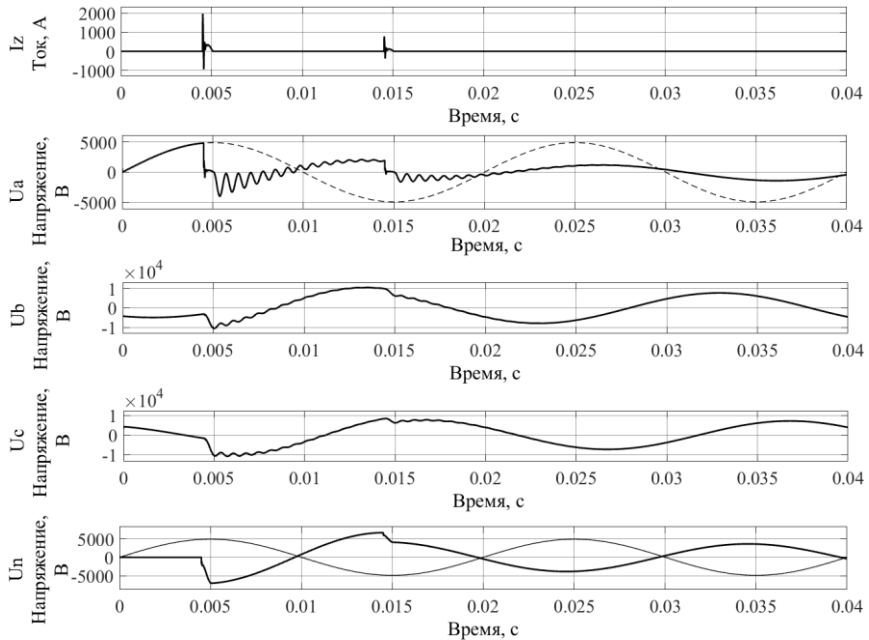


Рис. 3. Процессы в сети с резонансно-заземленной нейтралью при двукратном пробое изоляции:

I_z – ток ОЗЗ; U_a – напряжение поврежденной фазы А; U_b – напряжение неповрежденной фазы В; U_c – напряжение неповрежденной фазы С; U_n – напряжение в нейтральной точке

Fig. 3. Processes in a network with a resonantly grounded neutral with a double breakdown of insulation:
 I_z – single-phase earth fault current; U_a – voltage of the damaged phase А; U_b – the voltage of the undamaged phase В; U_c – the voltage of the undamaged phase С; U_n – the voltage at the neutral point

При перекомпенсации емкостного тока напряжения на поврежденной и неповрежденных фазах изменяются по закону биений. Биения обусловлены тем, что частота тока промышленной частоты приблизительно равна частоте собственных колебаний напряжения на нейтрали сети; полуразность этих частот и определяет частоту огибающей кривой биения. Осциллограммы токов и напряжений в сети при 25 %-ной расстройке компенсации приведены на рис. 4 и 5.

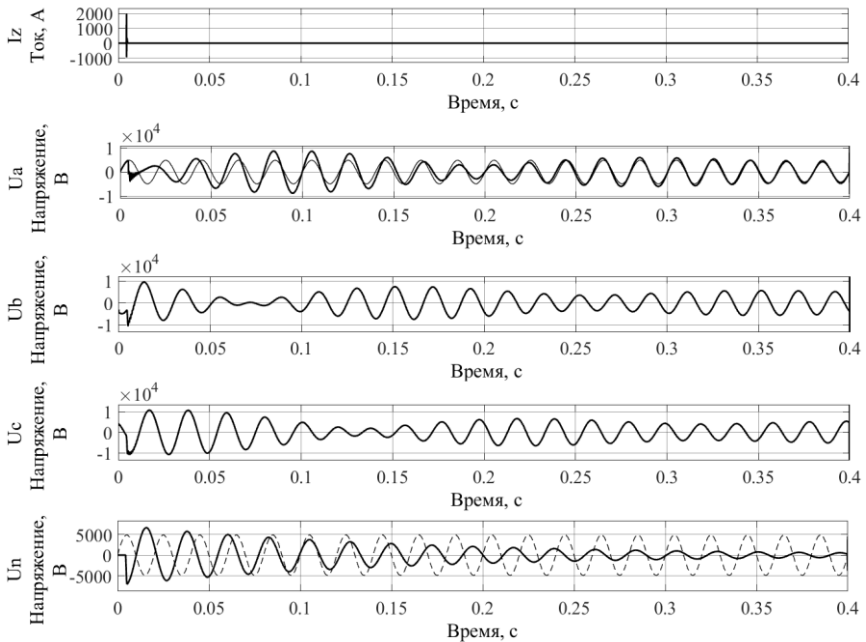


Рис. 4. Процессы в сети с 25 %-ной перекомпенсацией емкостного тока при однократном пробое

Fig. 4. Processes in the network with 25 % overcompensation of the capacitive current at a single breakdown

Как видно из представленных ниже осциллограмм, при полной компенсации емкостного тока кратность перенапряжений не изменяется при повторном пробое. При частичной компенсации кратность перенапряжений увеличивается при повторном пробое.

Приведенные ниже опыты подтверждают необходимость постоянной автоматической настройки индуктивности ДГР в резонанс с емкостью сети.

Это требует сложного алгоритма управления, а также дополнительного оборудования.

IV. Применение ФПУ для компенсации токов ОЗЗ

В силу недостатков существующих технических средств компенсации емкостного тока ОЗЗ было предложено применить в качестве такого средства устройство на базе многообмоточных трансформаторов и тиристорных коммутаторов.

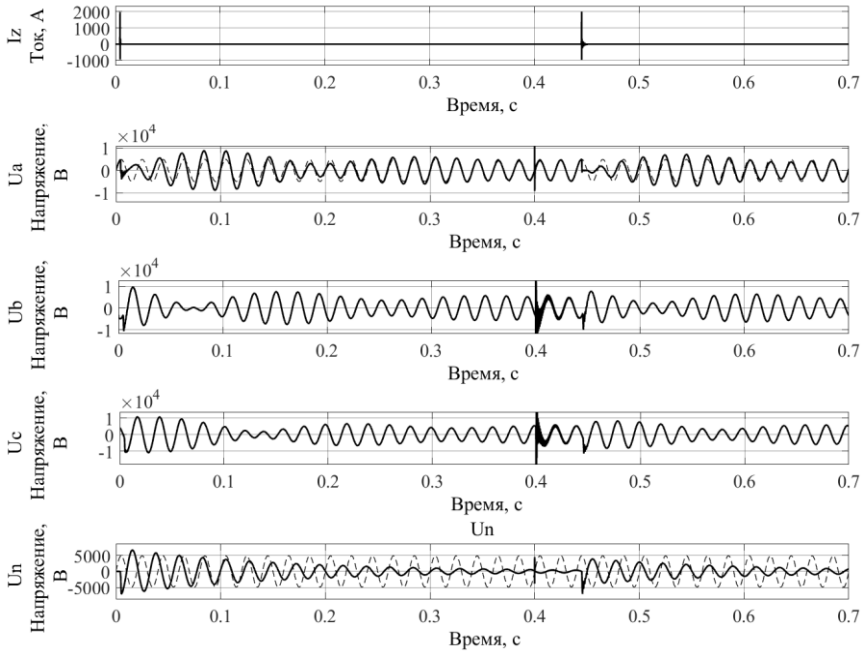


Рис. 5. Процессы в сети с 25 %-ной перекомпенсацией емкостного тока при двукратном пробое

Fig. 5. Processes in the network with 25 % overcompensation of the capacitive current at a double breakdown

Такой класс устройств известен как фазоворотные устройства (ФПУ) и является автоматическим средством поддержания требуемого режима работы сети. Эти устройства обычно используются в сетях напряжением 110 кВ и выше, поэтому была поставлена задача адаптации устройства и алгоритма управления для работы в составе распределительных сетей.

Принцип действия ФПУ заключается в создании дополнительной

комплексной вольтодобавки в месте его установки в составе энергосистемы [4, 6]. Интеграция ФПУ в состав электрической сети подразумевает автоматическое и своевременное регулирование параметров вольтодобавочного напряжения ФПУ в целях установления, либо поддержания требуемого режима работы. Реализация подобных функций подразумевает формирование соответствующих управляющих воздействий на ФПУ посредством интеллектуальных систем управления (СУ) при изменении параметров режима линии электропередачи. Таким образом, применение СУ, способных адаптировать свое управляющее воздействие к изменению параметров режима линии электропередачи, является необходимым условием для использования ФПУ в составе сети.

Как правило, ФПУ имеют в своем составе два трансформатора: шунтовой (ШТ) и серийный (СТ). За счет различной конфигурации соединения вторичных обмоток ШТ и первичных обмоток СТ (внутренней топологией построения ФПУ) обеспечивается необходимый угол сдвига фаз между входными и выходными цепями ФПУ.

Существует несколько вариантов топологии устройства. Для исследования выбрана схема с зависимым возбуждением и симметричным регулированием (рис. 6). Выбранная для исследования схема имеет преимущества по сравнению с другими схмотехническими вариантами построения ФПУ: во-первых, реализует симметричный способ регулирования, при котором величина выходного напряжения не зависит от угла формируемого фазового сдвига [7]; во-вторых, число тиристоров в составе коммутатора существенно меньше по сравнению с другими вариантами топологий ФПУ.

Вносимые в линию электропередач от ФПУ вольтодобавочные напряжения характеризуются изменением угла регулирования между входным и выходным напряжением ФПУ. Дискретное регулирование угла определяется заданием номера ступени регулирования. Номер ступени регулирования $N_{ст}$ связан с углом регулирования следующим соотношением:

$$N_{ст} = \alpha \cdot \frac{N_{\max}}{\alpha_{\max}}, \quad (1)$$

где α – текущий угол регулирования, N_{\max} – максимальное количество ступеней регулирования и α_{\max} – максимальный угол регулирования.

Коэффициент трансформации СТ K_2 определяется отношением напряжений вентильной обмотки к сетевой. Минимальный коэффициент трансформации ШТ $K_{1\min}$ равен отношению напряжения вентильной обмотки с наименьшим напряжением к сетевой:

$$K_{\text{лмин}} = \frac{U_{\text{a11x11}}}{U_{\text{лНОМ}}}, \quad (2)$$

где U_{a11x11} – напряжение самой низковольтной вентильной обмотки ШТ, $U_{\text{лНОМ}}$ – номинальное фазное напряжение ВЛ.

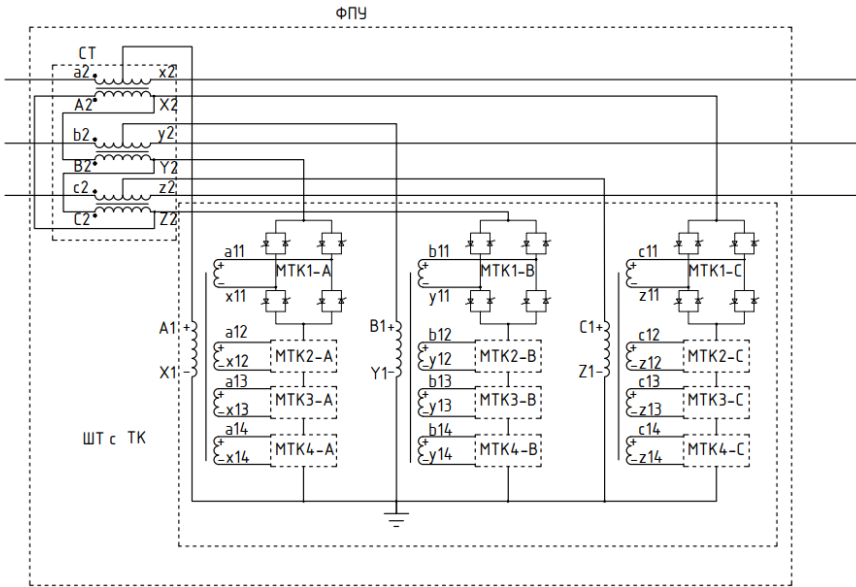


Рис. 6. Функциональная схема исследуемого устройства:

ШТ – шунтовой трансформатор, СТ – серийный трансформатор, ТК – тиристорный коммутатор, ФПУ – фазоворотное устройство

Fig. 6. Functional diagram of the device under study:

ШТ – shunt transformer, СТ – serial transformer, ТК – thyristor switch, ФПУ – phase-reversal device

Тиристорный коммутатор в процессе регулирования фазового угла подключает определенным способом вентильные обмотки ШТ к вентильным обмоткам СТ. Можно ввести эквивалентный коэффициент K_1 , который по сути является суммарным эквивалентным коэффициентом трансформации вентильных обмоток ШТ, и вычисляется следующим образом:

$$K_1 = K_{\text{лмин}} \cdot N_{\text{ст}}. \quad (3)$$

Каждый мост в составе ТК может находиться в следующих состояниях:

- 1) режим 0 – шунтирование вторичной (вентильной) обмотки ШТ;
- 2) режим 1 – подключение вторичной (вентильной) обмотки ШТ в прямом направлении;
- 3) режим –1 – подключение вторичной (вентильной) обмотки ШТ в обратном направлении.

Управление осуществляется по ключевым способом, при котором импульсы управления постоянно поступают на два встречно включенных тиристора одновременно. При заданной ступени регулирования импульсы управления, поступающие на тиристорные ключи, не меняются, что говорит о простоте управления в статическом режиме.

V. Имитационное моделирование устройства

В ходе исследования была создана имитационная модель сети и внедренного в ее состав ФПУ с мостовым соединением ключей (упрощенная модель тиристорного коммутатора) (рис. 8) в соответствии с принципиальной схемой (рис. 7).

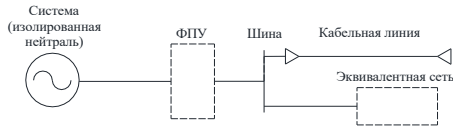


Рис. 7. Принципиальная схема сети с изолированной нейтралью

Fig. 7. Principal diagram of a network with an isolated neutral

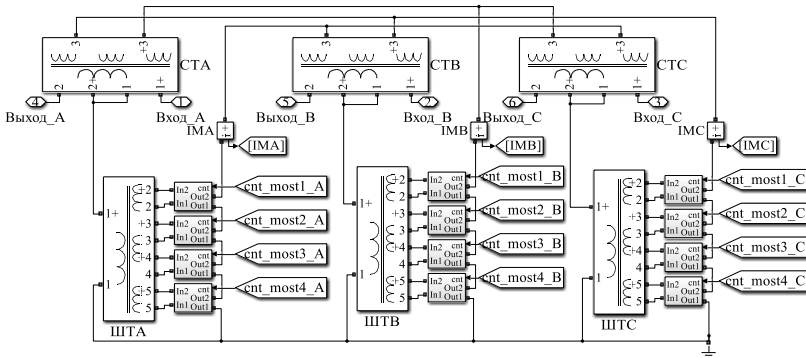


Рис. 8. Имитационная модель ФПУ в MatLab

Fig. 8. Simulation model of phase-reversal device in MatLab

На рис. 9 изображена полная модель сети с включенным в ее состав разработанным устройством.

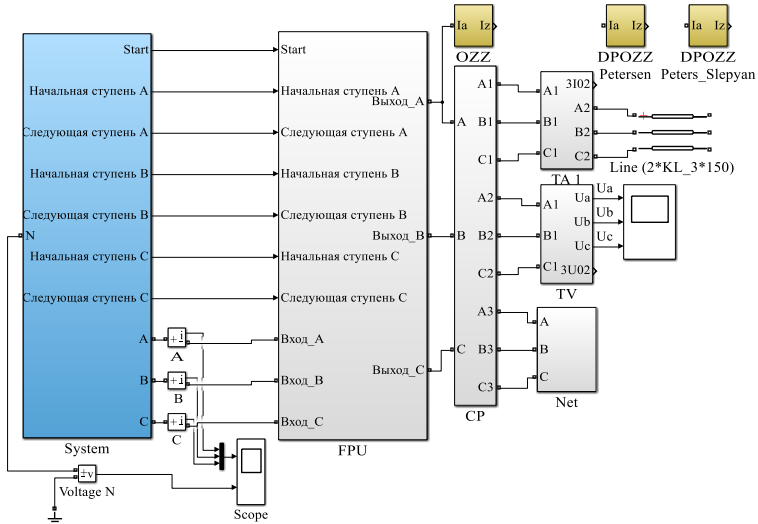


Рис. 9. Имитационная модель сети с разработанным устройством

Fig. 9. Simulation model of the network with the developed device

VI. Результаты экспериментов

Для первого опыта принято время замыкания ключа ОЗЗ равным 0,3 с и время размыкания 0,5 с. ОЗЗ моделируется на фазе А. Результаты моделирования представлены на рис. 10.

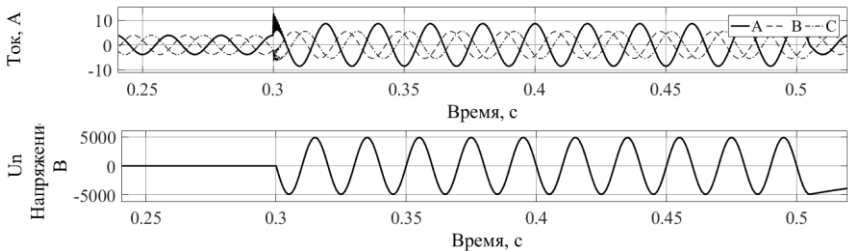


Рис. 10. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при устойчивом ОЗЗ фазы А

Fig. 10. Phase current and neutral offset voltage at stable phase A single-phase earth fault

Из полученных осциллограмм видно, что действующее значение тока поврежденной фазы составило 7 А, что неприемлемо для условия самопогасания электрической дуги.

Можно сделать вывод о необходимости включения в сеть устройства компенсации. Результаты моделирования представлены на рис. 11-12.

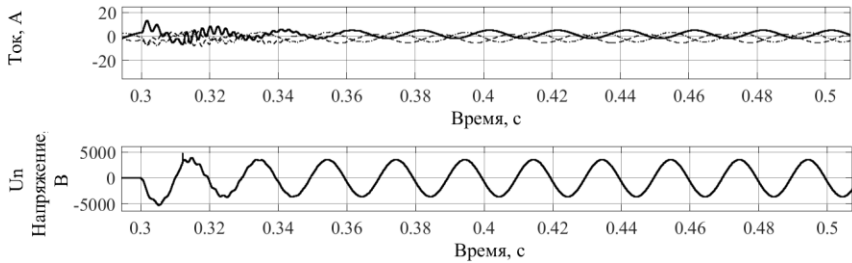


Рис. 11. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при устойчивом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)

Fig. 11. Phase current and neutral offset voltage at stable phase A single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)

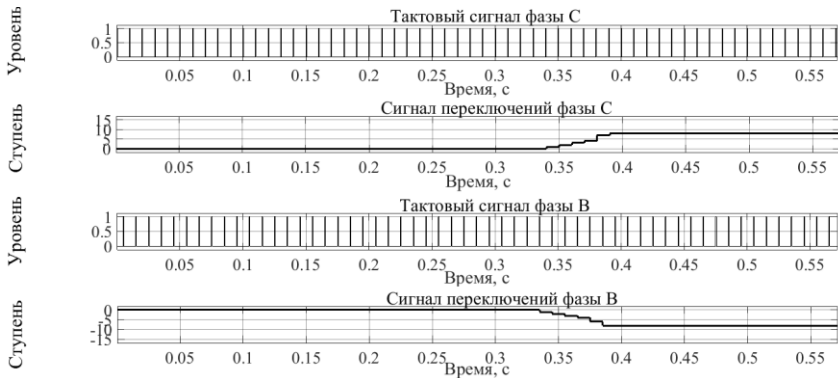


Рис. 12. Сигналы переключений ступеней фаз

Fig. 12. Phase stage switching signals

Подключение разработанного устройства помогает снизить действующее значение тока ОЗЗ до значения чуть более 3 А. Также установлено положительное воздействие ФПУ на смещение нейтрали, возникающее при ОЗЗ из-за просадки напряжения поврежденной фазы. Подключение устройства компенсации снижает смещение нейтрали с отметки 4 до 3 кВ.

При данной конфигурации и параметрах сети алгоритм «верхнего уровня» переключает обмотки ШТ до уровня 8 ступень (фаза В) и -8 ступень (фаза С). При данном управляющем воздействии обеспечивается достаточный уровень компенсации для условия самопогасания электрической дуги.

Для следующего опыта принята следующая последовательность моментов замыкания и размыкания ключа ОЗЗ: от 0,005 с до 0,505 с, шаг равен 0,0098 с. ОЗЗ моделируется на фазе А. Результаты моделирования представлены на рис. 13-14.

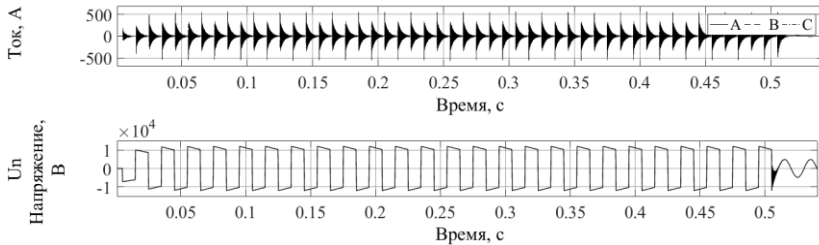


Рис. 13. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А

Fig. 13. Phase current and neutral offset voltage at phase A arc intermittent single-phase earth fault

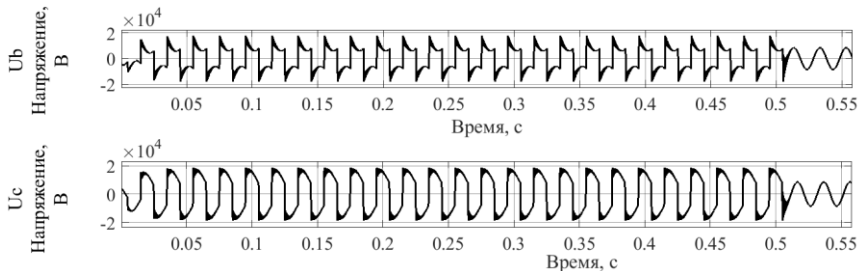


Рис. 14. Напряжение неповрежденных фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А

Fig. 14. Voltage of undamaged phases with phase A arc intermittent single-phase earth fault

При повторных пробоях броски тока увеличивают свое значение. Действующее значение тока на промежутке от начала до конца дугового прерывистого ОЗЗ доходит до 109 А, после снятия ОЗЗ ток фазы А снижается до 6 А, но это все еще не ток нормального режима. Так же отмечено возникновение значительных перенапряжений на неповрежденных фазах.

Действующее значение напряжения достигает 8,5 кВ. Действующее значение напряжения смещения нейтрали составляет 10,65 кВ.

Влияние разработанного устройства на данный режим сети представлено на рис. 15-17.

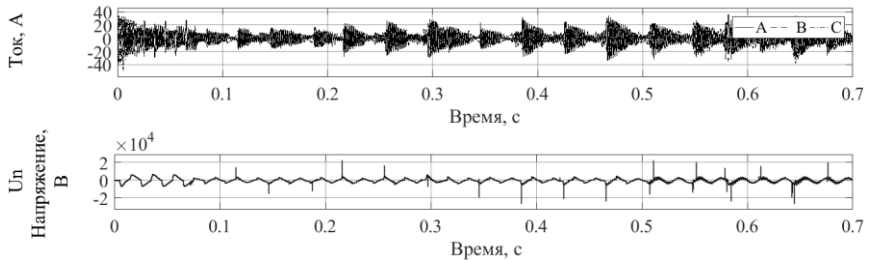


Рис. 15. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)

Fig. 15. Phase current and neutral offset voltage with phase A arc intermittent single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)

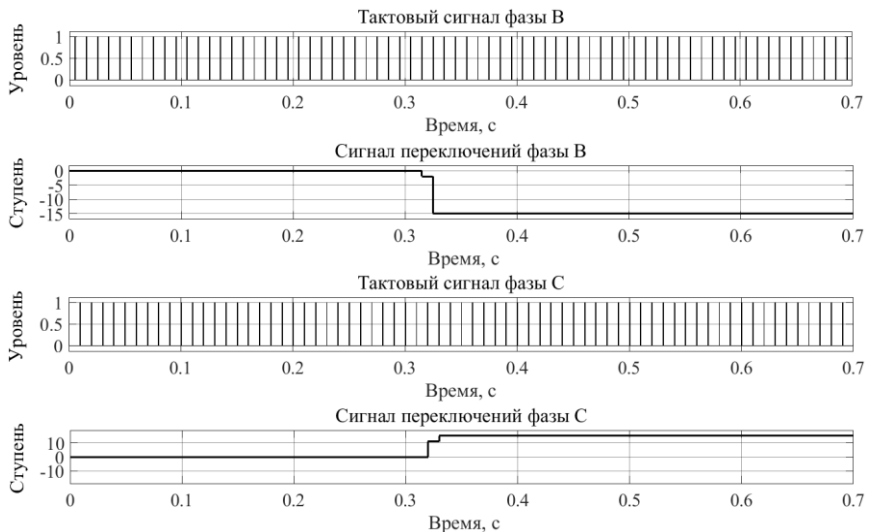


Рис. 16. Сигналы переключений ступеней фаз

Fig. 16. Phase stage switching signals

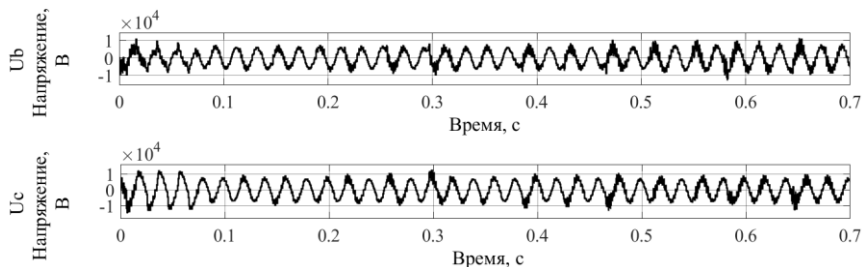


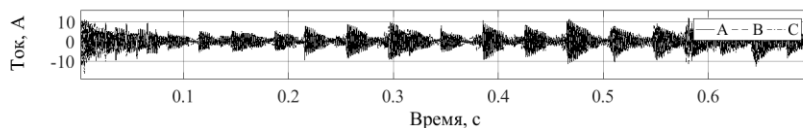
Рис. 17. Напряжение неповрежденных фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)

Fig. 17. Voltage of undamaged phases with phase A arc intermittent single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)

Как можно видеть из полученных осциллограмм, алгоритм переключает ступени устройства в крайние точки диапазона регулирования: 15 ступень фазы С, -15 ступень фазы В. При данном управляющем воздействии действующее значение тока поврежденной фазы снижается до 9 А. Напряжение нейтрали снижается до 2,617 кВ. Перенапряжения на неповрежденных фазах также снижаются. Действующее значение напряжения на неповрежденных фазах составляет 4,269 кВ. Видно, что устройство не выдает команду «Сброс» по окончании ОЗЗ в сети. Данное явление можно объяснить тем, что ток фазы А после снятия ОЗЗ остается на уровне 6 А без включения устройства. Алгоритм принимает данное значение тока за аварийный режим и не сбрасывает ступени в нулевое значение.

Отмечено положительное влияние разработанного устройства на режим сети, однако при данном диапазоне регулирования устройства в случае дугового прерывистого ОЗЗ не выполняется условие самопогасания электрической дуги. Возникшую проблему можно решить при помощи расширения диапазона регулирования. Для этого требуется добавить дополнительную обмотку ко вторичным обмоткам ШТ. Также следует расширить модель дешифратора, добавив дополнительные ступени в таблицу истинности. Результат моделирования представлен на рис. 18.

Увеличение диапазона регулирования позволяет снизить ток в месте замыкания до 3,491 А, что удовлетворяет условию самопогасания электрической дуги.



**Рис. 18. Ток фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А
(в сеть подключено ФПУ)**

**Fig. 18. Phase current at phase A arc intermittent single-phase earth fault
(phase-reversal device is connected to the network)**

Заключение

Исходя из данных, полученных в процессе моделирования, можно говорить о достаточной эффективности разработанного устройства. Полученного диапазона регулирования (от -15 до 15 ступени) достаточно для обеспечения снижения тока в месте замыкания до значения, удовлетворяющего условию самопогасания электрической дуги в случае устойчивого замыкания на землю.

В случае дугового прерывистого замыкания на землю диапазона от -15 до 15 ступени недостаточно для снижения тока в месте замыкания ниже 5 А, поэтому необходимо расширение диапазона до ± 24 ступеней.

© Слузова А.В., 2023

© Лоскутов А.А., 2023

Поступила в редакцию 09.08.2022

Принято к публикации 06.12.2023

Received 09.08.2022

Accepted 06.12.2023

Библиографический список

- [1] Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов, Пат. 2688210 RU, заявл. 16.07.18; опубли. 21.05.19. – Бюл. № 15.
- [2] Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 18-25.
- [3] РД 34.20.179. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. СПО Союзтехэнерго № 1988, 2009. – 26 с.
- [4] Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Ремизевич Т.В., Стельмаков В.Н. Фазоповоротное устройство. Пат. 107005 RU, МПК H02M 5/00, заявл. 25.03.2011; опубли. 27.07.2011. – Бюл. № 21.

- [5] Осипов Д.С., Киселев Б.Ю., Планков А.А., Янишевская А.Г. Обзор современных средств и методов компенсации емкостных токов в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 274.
- [6] Гринштейн Б.Н., Толстов Ю.Г. Регулирование фазы вектора напряжения сети вентильным фазопоротным устройством // Электричество. 1992. № 2. С. 55-60.
- [7] Рожков А.Н., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Исследование режимов работы мостового тиристорного коммутатора переменного тока при повентильном способе управления // Сборник статей Международ. научн.-практ. конф. Т. 2., Февраль 07, 2014, Уфа, Россия: Башкирский государственный университет (Уфа), 2014. С. 107-111.
- [8] Правила устройства электроустановок. Введ. 2003-01-01. М.: КНОРУС, 2014. – 488 с.
- [9] Веселов А.Е., Невретдинов Ю.М., Ярошевич В.В., Кабеев И.Е., Фастий Г.П., Токарева Е.А. Разработка технических мероприятий по компенсации емкостных токов замыкания на землю и ограничению перенапряжений в промышленных распределительных электрических сетях // Вестник МГТУ. Труды мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 10. № 4. С. 527-532.
- [10] Panfilov D.I., Rozhkov A.N., Astashev M.G. Controlled phase shifters model for power grid operating modes calculation // 2016 IEEE 16 International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Jun. 07-10, 2016, Florence, Italy: IEEE, 2016. P. 118-122. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555654
- [11] Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н., Тимошенко А.Л., Казеннова И.И. Полупроводниковое фазопоротное устройство. Пат. 2450420 RU, заявл. 13.05.2011; опубл. 10.05.2012. – Бюл. № 13.
- [12] Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // Энергетик. 2001. № 11 (35). С. 104.
- [13] Шуин В.А., Мартынов В.Л., Шагурина Е.С., Шадрикова Т.Ю. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ // Электротехника. 2018. № 1. С. 62-72.
- [14] Тютиков В.В., Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Динамическая устойчивость функционирования токовых направленных защит от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 6. С. 30-41. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041
- [15] Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. 1991. № 10. С. 58-61.

References

- [1] V.A. Shuin, T.Yu. Shadrikova, O.A. Dobrynina and E.S. Shagurina, “*Ustrojstvo zashchity ot odnofaznyh замыканий na zemlyu v setyah s izolirovannoj nejtral’yu i s kompensaciej yomkostnyh tokov* [Protection device against single-phase earth faults

- in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents*”], Patent RU 2688210, May 21, 2019 (in Russian).
- [2] S.S. Titenkov and A.A. Titenkov, “Rezhimy zazemleniya nejtrali v setyah 6-35 kV i organizatsiya relejnoj zashchity ot odnofaznyh замыканий на землю [Neutral grounding modes in 6-35 kV networks and organization of relay protection against single-phase earth faults]”, *Energoexpert*, no. 2, pp. 18-25, 2010.
 - [3] Tipovaya instrukciya po kompensacii emkostnogo toka замыкания на землю v elektricheskikh setyah 6-35 kV. RD 34.20.179. [Standard instruction for compensation of capacitive earth fault current in 6-35 kV electrical networks. RD 34.20.179.], 2009 (in Russian).
 - [4] D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, T.V. Remizevich and V.N. Stelmakov, “Fazopovorotnoe ustrojstvo [Phase shifting device]”, Patent RU 107005, Jul. 27, 2011 (in Russian).
 - [5] D.S. Osipov, B. Yu. Kiselev, A.A. Plankov and A.G. Yanishevskaya, Reciev of modern means and methods of capacitive current compensation in networks of 6-35 kv with isolated neutral, *Modern problems of science and education*, no. 6, pp. 274, 2014.
 - [6] B.N. Grinstein and Yu.G. Tolstov, “Regulirovanie fazy vektora napryazheniya seti ventil'nym fazopovorotnym ustrojstvom [Regulation of the phase of the voltage vector of the network by a valve phase-shifting device]”, *Electricity*, no. 2, pp. 55-60, 1992 (in Russian).
 - [7] A.N. Rozhkov, T.V. Remizevich and P.A. Rashitov, “Issledovanie rezhimov raboty mostovogo tiristorного коммутатора переменного тока pri poventil'nom sposobe upravleniya [Investigation of the operating modes of a bridge thyristor alternating current switch with a valve-by-valve control method]”, in proc. *Sbornik statej Mezhdunarod. nauchn.-prakt. konf. T. 2 [Collection of articles of International. scientific-practical conf. T. 2]*, Feb. 07, 2014, Ufa, Russia, pp. 107-111 (in Russian).
 - [8] Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations], 2014 (in Russian).
 - [9] A.E. Veselov, Yu.M. Nevretdinov, V.V. Yaroshevich, I.E. Kabiev, G.P. Fasti, E.A. Tokareva, “Razrabotka tekhnicheskikh meropriyatij po kompensacii emkostnyh tokov замыкания на землю i ogranicheniyu perenapryazhenij v promyshlennyh raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah [Development of technical measures to compensate for capacitive earth fault currents and limit overvoltage in industrial distribution electrical networks]”, *Vestnik MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University*, vol. 10, no. 4, pp. 527-532, 2007 (in Russian).
 - [10] D.I. Panfilov, A.N. Rozhkov, M.G. Astashev, “Controlled phase shifters model for power grid operating modes calculation”, in proc. *2016 IEEE 16 International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Jun. 07-10, 2016, Florence, Italy, pp. 118-122. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555654
 - [11] V.P. Zhmurov, V.N. Stelmakov, A.N. Tarasov, A.L. Timoshenko A.L. and I.I. Kazennova, “Poluprovodnikovoe fazopovorotnoe ustrojstvo [Semiconductor phase shifter]”, Patent RU 2450420, May 10, 2012 (in Russian).
 - [12] V.A. Shuin and A.V. Gusenkov, “Zashchity ot замыканий на землю v elektricheskikh setyah 6-10 kV [Protection against ground faults in electrical networks 6-10 kV], *Energetik*, vol. 11, no. 35, p. 104, 2001 (in Russian).

- [13] V.A. Shuin, V.L. Martynov, E.S. Shagurina and T.Yu. Shadrikova, "Overcurrent protection from earth faults based on higher harmonics for compensated 6- to 10-kv cable networks", *Electrical engineering*, no. 1, pp. 62-72, 2018.
- [14] V.V. Tyutikov, Yu.D. Kutumov, T.Yu. Shadrikova and V.A. Shuin, "Dynamic stability of the functioning of current earth fault directional protection in networks with isolated neutral", *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, vol. 6, pp. 30-41, 2019. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041
- [15] V.A. Shuin, "Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo processa pri замыкaniyah na zemlyu v kabel'nyh setyah 6-10 kV [Initial phase ratios of the electrical values of the transient process during earth faults in cable networks 6-10 kV]", *Electricity*, no. 10, pp. 58-61, 1991 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Слузова Анастасия Владимировна, ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Anastasiya V. Sluzova, assistant 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. Алексева, 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

УДК 621.311.24

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_121

ОЦЕНКА ВЕТРОПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В АЛЬ-ХАЙДЖАНА (СИРИЯ)

Д.А. Устинов

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinov_da@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет
Санкт-Петербург, Россия

А.Р. Айсар

ORCID: 0000-0003-0999-9634 e-mail: s215010@stud.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет
Санкт-Петербург, Россия

Приведена оценка потенциала энергии ветра для выработки электроэнергии для горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана – промышленной зоне Адра, расположенной к юго-западу от Дамаска. Горнодобывающая отрасль считается одной из наиболее важных в Сирии. Возобновление полноценной работы данной отрасли в ходе восстановления страны после конфликта является одной из приоритетных задач, поставленных Правительством республики. Область Аль-Хайджана имеет огромный потенциал энергии ветра для выработки электроэнергии, особенно летом, когда порывы ветра характеризуются длительными периодами с достаточной скоростью по сравнению с другими регионами страны. На основе статистических данных определен потенциал энергии ветра, который составил 288,7 кВт/м² на высоте 80 м над уровнем моря. Перспективность местности связана с ее расположением вблизи линии высокого напряжения и наличием обширных бесплодных районов, площадь которых достаточна для ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, распределение Рэ-ля, скорость ветра, электрическая мощность, энергия ветра.

Для цитирования: Устинов Д.А., Айсар А.Р. Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия) // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 121-134.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121

WIND ENERGY POTENTIAL EVALUATION FOR POWER SUPPLY TO MINING ENTERPRISES IN AL HAYJANA, SYRIA

D.A. Ustinov

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinov_da@pers.spmi.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

A.R. Aysar

ORCID: 0000-0003-0999-9634 e-mail: s215010@stud.spmi.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

An assessment of the wind power potential for generate electricity for mining operations in Al-Haijana, the industrial zone of Adra, located southwest of Damascus is made. The mining industry is considered one of the most important in Syria. The resumption of the full-fledged work of this industry in the course of the country's reconstruction after the conflict is one of the priority tasks set by the Government of the Republic. The Al Haijan region has a huge wind energy potential to generate electricity, especially in summer when wind gusts are characterized by long periods at a sufficient speed compared to other regions of the country. The wind energy potential, 288.7 kW/m² at a height of 80 m above sea level, was determined based on statistical data. The prospects of the area are associated with its location near the high voltage line and the presence of vast barren areas, the area of which is sufficient for wind turbines.

Keywords: electric capacity, Rayleigh distribution, renewable energies, wind power, wind speed.

For citation: D.A. Ustinov and A.R. Aysar, «Wind energy potential evaluation for power supply to mining enterprises in Al Hayjana, Syria», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 121-134, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121

I. Введение

С каждым годом запасы ископаемых природных ресурсов уменьшаются, а спрос на электроэнергию стремительно растет. Это повышает значение альтернативных источников энергии, использование которых становится актуальным на энергетическом рынке [1]. Одними из наиболее популярных и стабильных возобновляемых источников на данный момент являются использование энергии ветра для производства электричества. Темпы развития ветроэнергетики позволяют уже сейчас использовать ее для электроснабжения практически всех потребителей: от промышленных предприятий до городского населения [2]. На глобальном уровне растущий спрос на

электроэнергию вызвал значительный рост мощностей по ее производству. Кроме того, поскольку электростанции, как правило, расположены далеко от центров электрических нагрузок, возможны большие потери электроэнергии и сложность в обеспечении требуемого уровня напряжения. Решению этих проблем может способствовать установка объектов распределенной генерации вблизи центров нагрузок [3].

Ветер является идеальным источником энергии: он неисчерпаем и не оставляет вредных загрязнителей. В 2021 г. суммарная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире была увеличена на 94 ГВт. Данное значение ниже соответствующего показателя за 2020 г. на 1,8 % [4]. В первую очередь, снижение было вызвано замедлением роста производства объектов наземной ветроэнергетики на двух крупнейших рынках: в Китае и США. В прошлом году было введено в эксплуатацию 21,1 ГВт оффшорной ветроэнергетики, что в 3 раза больше, чем в 2020 г. Таким образом, 2021 г. стал лучшим годом в истории оффшорной ветроэнергетики, а его доля на мировом рынке составила 22,5 %. На долю Китая приходится 80 % оффшорной ветроэнергетики [5]. Общая установленная мощность ВЭУ в настоящее время достигает 837 ГВт, что обеспечивает сокращение выбросов CO₂ ежегодно на 1,2 млрд тонн.

Дефицит энергетических ресурсов является одной из главных технических проблем, связанных с развитием горнопромышленного сектора республики Сирия. Поэтому целесообразна оценка потенциала энергии ветра для выработки электроэнергии для электроснабжения горнодобывающих предприятий [6].

II. Выбор участка для реализации проекта

Сирия расположена между широтами 32,3° и 37° к северу от экватора и между меридианами 36° и 42,5° к востоку от Гринвичского меридиана. Площадь сирийского региона составляет 185 517 км [7]. На основании карты ветров Сирии собраны статистические данные о скорости ветра в нескольких географических округах страны с различным ландшафтом: вблизи побережья, высокогорья, в зоне лесов и городских округов. Рассмотрены следующие участки с относительно большой территорией и перспективой для создания ветроэлектростанций: Аль-Хайджана, Металхиджана, Тадмур, Хомс, Синдиана и Габагхаб. На сегодняшний день нет никаких сведений о ветряных электростанциях в Сирии [8].

До начала конфликта сирийское правительство планировало развитие возобновляемых источников энергии в стране [9]. Область Аль-Хайджана является одним из самых перспективных объектов для ветроэнергетики в Сирии. Средние скорости ветра составляют 5,0 м/с на высоте 10 м и 6,70 м/с на высоте 40 м. Район Аль-Хайджана, один из районов Сирии с высокой ветровой интенсивностью, расположен в пределах первого района,

подготовленного для создания ветряных электростанций и недалеко от высоковольтных линий для подключения к энергосистеме [10].



Рис. 1. Расположение объекта Аль-Хиджана в Сирии
(33°21'31''N, 36°32'39''E)

Fig. 1. Location of the Al-Hijana site in Syria
(33°21'31''N, 36°32'39''E)

III. Выбор структуры и параметров ВЭУ

Применительно к электрической мощности, необходимой для электроснабжения горнодобывающего сектора в изучаемом промышленном городе, было установлено, что потребность составляет 100 МВт [11]. После анализа существующих типов ВЭУ были выбраны установки V90 мощностью 3 МВт из Вестаса, в количестве 34 штук. Таким образом, суммарная мощность ВЭУ составит $3 \times 34 = 102$ МВт, и это число близко к требуемой [12]. Зависимость генерируемой мощности одной ВЭУ от скорости ветра показана на рис. 2.

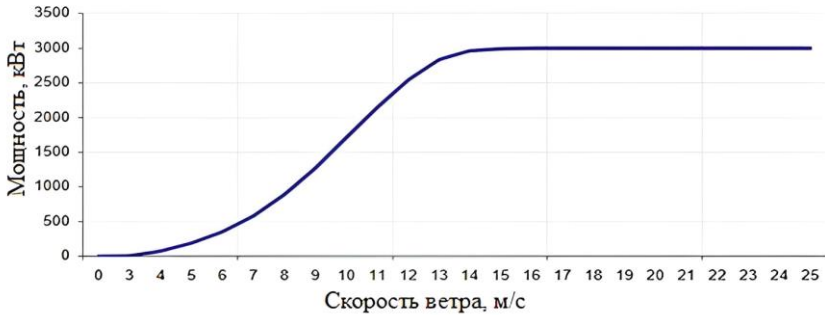


Рис. 2. Зависимость мощности турбины V90 3,0 МВт от скорости ветра

Fig. 2. V90-3.0 MW turbine power curve

При проектировании ветроустановки необходимо учитывать скорость и направление ветра в течение года. Анализ собранных статистических данных ветряного потенциала показал, что наибольшим потенциалом в течение года обладает юго-западный ветер [13].

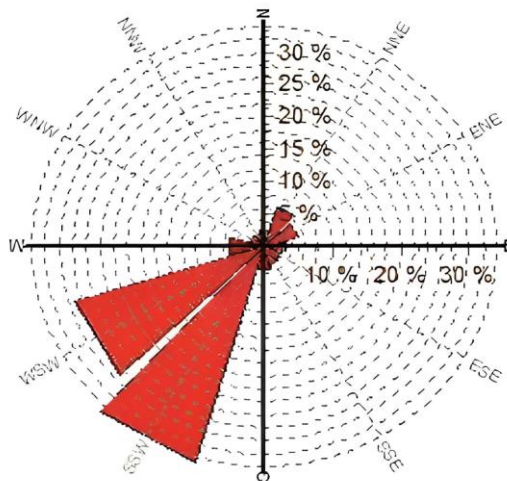


Рис. 3. Преобладающее направление ветра на высоте 40 м в районе Аль-Хиджана [14]

Fig. 3. Prevailing wind direction at a height of 40 m in the Al-Hijana area [14]

План расположения 34 ВЭУ показан на рис. 4.

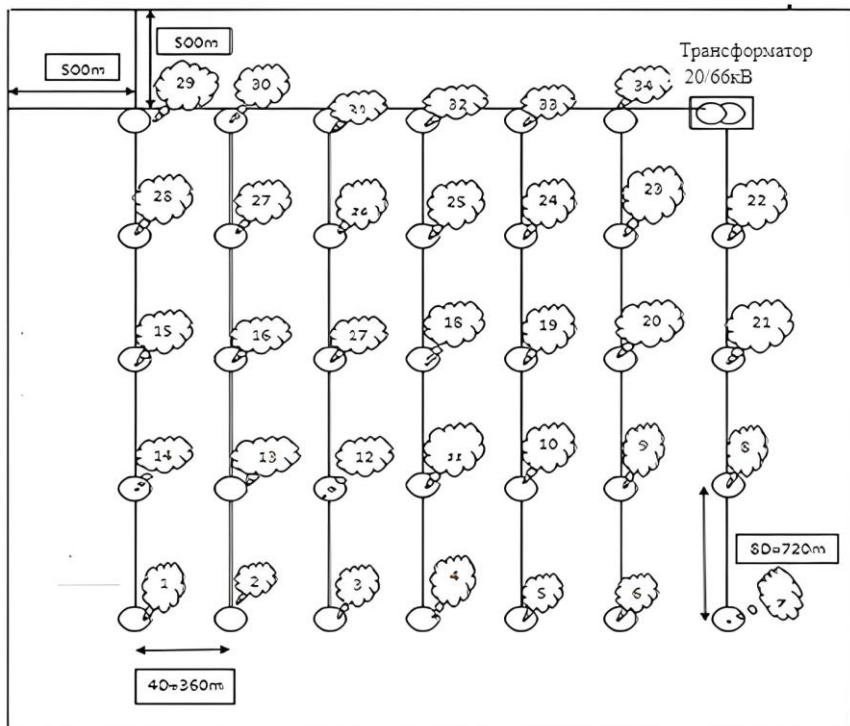


Рис. 4. Схема расположения пронумерованных турбин и соединения с электрической подстанцией

Fig. 4. Layout of numbered turbines and connection to the electrical substation

Всего предполагается 7 рядов ВЭУ: в шести рядах по пять установок, в одном ряду – четыре. В этом же ряду в качестве замыкающей установки находится трансформатор 20/66 кВ [15]. Технические параметры трансформаторной подстанции 20/66 кВ для подключения ветряной электростанции к сети будут определены Сирийской корпорацией по передаче электроэнергии в соответствии с утвержденными методиками выбора и проверки электрооборудования [16].

Расстояние между рядами составляет $4 \cdot d = 4 \cdot 90 = 360$ м, где d – это диаметр ветровой турбины [17]. Расстояние между установками в одном ряду составляет $8 \cdot d = 8 \cdot 90 = 720$ м.

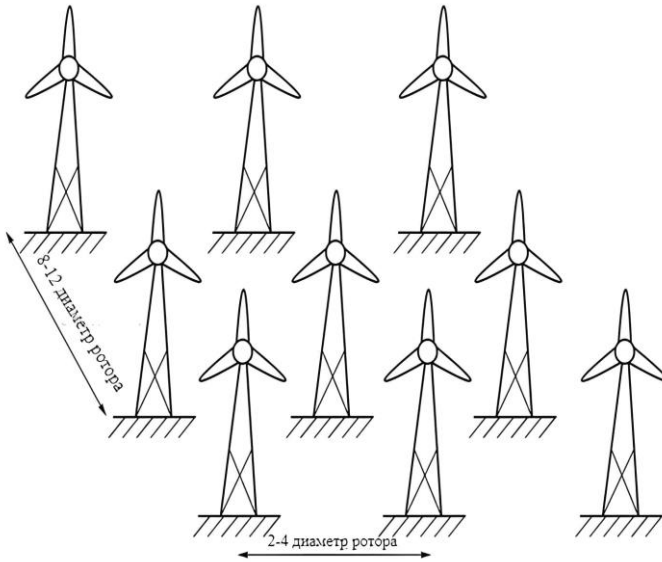


Рис. 5. Боковое и продольное расстояния между ветряными турбинами [18]

Fig. 5. Lateral and longitudinal distances between wind turbines [18]

Расстояние между первым и крайним рядами составляет $360 \cdot 6 = 2160$ м. Расстояние между первой и крайней ВЭУ в одном ряду составляет $720 \cdot 4 = 2880$ м. Следовательно, площадь земли, занимаемой всеми ВЭУ, составляет $2160 \cdot 2880 = 6,2208$ км². Для более эффективной работы нужно учесть запас площади по 500 м с каждой стороны. Тогда необходимая площадь земли для сооружения ВЭУ составит:

$$(2160 + 1000) \cdot (2880 + 1000) = 12,2608 \text{ км}^2.$$

Именно такая область доступна в районе Аль-Хайджана.

IV. Выбор кабелей

Определим выходной ток каждой турбины:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} = \frac{3000000}{\sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 0,96} = 90,211 \text{ А.} \quad (1)$$

Кабели проложим с заглублением в почву для лучшего рассеивания тепла. Согласно полученному значению тока, выберем достаточное сечение кабеля: 25 мм² [19]. Зная ток одной ВЭУ, определим токи на всех участках и произведем выбор кабелей необходимых сечений. Результаты занесем в табл. 1. Считая ток одной турбины равным 90,211 А, определяем необходимые сечения кабелей к трансформаторам с минимальными затратами [20].

Таблица 1.
Результат выбора кабелей

Table 1.
Result of cable selection

Кабель	Ток, А	Сечение, мм ²	Необходимая длина кабеля, м	Общая длина кабеля, м
От вершины турбины до земли	90,211	3x25	105	105·34=3570
От первой ко второй ВЭУ в ряду	90,211x1	3x25	720	720·7=5040
От второй к третьей ВЭУ в ряду	90,211x2	3x70	720	720·7=5040
От третьей к четвертой ВЭУ в ряду	90,211x3	3x150	720	720·7=5040
От четвертой к пятой ВЭУ в ряду	90,211x4	3x240	720	720·7=5040
От турбины 29 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x6	2160
От турбины 30 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x5	1800
От турбины 31 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x4	1440
От турбины 32 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x3	1080
От турбины 33 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x2	720
От турбины 34 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x1	360

V. Мощность, производимая ветряной электростанцией

Для ветровой электростанции с ветроустановкой номинальной мощностью 3 МВт при номинальной скорости ветра 15 м/с, минимальной скорости ветра 4 м/с, максимальной скорости ветра 25 м/с, рассчитаем среднюю скорость ветра в районе Аль-Хиджана при высоте установки турбины 105 м. По имеющимся статистическим данным о скорости ветра на высотах 10 м и 40 м определим среднюю скорость ветра на высоте установки турбины, 105 м [21]:

$$v_{105} = v_{40} \cdot \left(\frac{105}{40} \right)^{\alpha} = 7,1769 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поверхностного трения, для данной области $\alpha = 0,157985$.

Используя распределение Рэля, определим значение вероятности скорости ветра [23]:

$$n_i = 8760 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_i}{v^2} \cdot e^{-k}, \quad (3)$$

где i – количество часов, в течение которых ветер дует со скоростью v ; v – средняя скорость ветра на желаемой высоте; $k = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v_i}{v}\right)^2$. Получаем график рэлеевского распределения для остальных скоростей ветра [24].

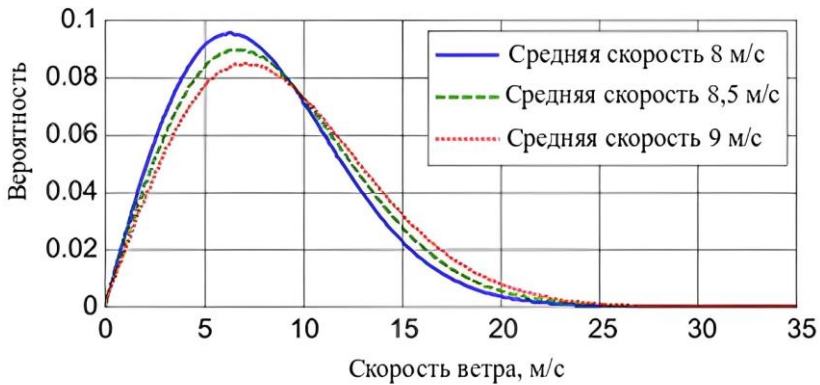


Рис. 6. Диаграмма распределения скорости ветра по Рэлю в районе Аль-Хайгана [25]

Fig. 6. Rayleigh wind speed distribution diagram in the Al-Hijana area [25]

Используя распределение Рэля, определим возможное вырабатываемое значение энергии при значениях скорости ветра от 4 до 25 м/с. Результаты расчета приведены в табл. 2 [26].

Вычислив мощность, вырабатываемую на всех скоростях, на которых работают турбины, от скорости 4 м/с до скорости 25 м/с, а затем определив мощность, вырабатываемую в течение года, мы получим годовую энергию, произведенную этой ветряной электростанцией.

Общая энергия составит 5196162,17 кВт·ч/г = 5,2 ГВт·ч/г.

Таблица 2.
Расчет количества ветрочасов в течение года и общей выработанной энергии

Table 2.
**Calculation of the number of wind hours during the year
and the total generated energy**

$v, \text{ м/с}$	k	$n_i, \text{ ч}$	$E_i \cdot 0,95, \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}$	$E_i, \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}$
4	0,244	837,2506	45249	47630
5	0,3812	912,3593	96305	101370
6	0,5489	925,7704	168860	177750
7	0,7472	885,8534	256580	270090
8	0,9759	805,4178	348230	366550
9	1,2351	699,1926	430420	453080
10	1,5248	581,4777	491030	516870
11	1,845	464,3657	521930	549400
12	2,1957	356,7293	520540	547940
13	2,5769	263,9652	489720	515490
14	2,9886	188,3357	436400	459370
15	3,4308	129,674	369570	389020
16	3,9035	86,2173	298210	313910
17	4,4067	55,3849	229780	241870
18	4,9404	34,3906	169370	178280
19	5,5046	20,649	119600	125890
20	6,0992	11,9926	81016	85280
21	6,7244	6,7389	52701	55475
22	7,3801	3,6647	32952	34686
23	8,0663	1,9291	19820	20863
24	8,7829	0,9831	11476	12080
25	9,5301	0,4851	6400	6737,5

VI. Заключение

Оценка ветропотенциала в районе Аль-Хайджана и определение электрической мощности, которая может быть получена от ветряной электростанции, позволяют заключить, что она способна обеспечить достаточный объем электроэнергии в промышленном городе Адра недалеко от Дамаска, решив проблему перебоев с подачей электроэнергии.

© Устинов Д.А., 2023

© Аисар А.Р., 2023

Поступила в редакцию 03.02.2023

Принята к публикации 06.04.2023

Received 03.02.2023

Accepted 06.04.2023

Библиографический список

- [1] Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. 2021. № 14 (16). P. 1-18. DOI: 10.3390/en14165059
- [2] Hosseinalizadeh R., Shakouri G.H., Amalnick M.S., Taghipour P. Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 139-150. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.046
- [3] Sychev Yu.A., Abramovich B.N., Zimin R.Yu., Kuznetsov R.A. Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1333. No. 3. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081
- [4] IEA. Total Installed Power Capacity by Fuel and Technology 2019-2025, main case. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-installed-power-capacity-by-fuel-and-technology-2019-2025-main-case> (дата обращения 06.06.2021).
- [5] Бельский А.А., Добуш В.С., Хайкал Ш.Ф. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 564-569. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
- [6] Dobush V.S., Belsky A.A., Skamyin A.N. Electrical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems in pipelines // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. № 1441. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012021
- [7] Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Development and design of a mobile power plant in the form of a standalone power supply // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. № 1753. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006
- [8] Lukutin B.V., Muravyev D.I., Ryzhkova A.V. The efficiency of combined electrothermal and electrochemical accumulation of electricity of a photovoltaic power plant // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. № 1019. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012053
- [9] Chauhan A., Saini R.P. Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system // *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 59-73. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.049
- [10] Sychev Y.A., Aladin M.E., Serikov V.A. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. № 13 (3). P. 1625-1634. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [11] Воронин В.А., Непша Ф.С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // *Записки Горного института*. 2020. Т. 246. С. 633-639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
- [12] Skamyin A., Belsky A., Dobush V., Gurevich I. Computation of nonlinear load harmonic currents in the presence of external distortions // *Computation*. 2022. № 10 (3). 41. DOI: 10.3390/computation10030041

- [13] R.E. Commission. Request for Qualification (RFQ). Syrian Ministry of Electricity. 2009.
- [14] Justus C., Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics // Geophysical Research Letters. 1976. № 3 (5). P. 261-264. DOI: 10.1029/GL003I005P00261
- [15] Justus C., Hargraves W., Mikhail A., Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions // Journal of Applied Meteorology. 1978. № 17 (3). P. 350-353. DOI: 10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2
- [16] Pimenta F., Kempton W., Garvine R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil // Renewable Energy. 2008. № 33 (11). P. 2375-2387. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.012
- [17] Teetz H., Harms T., Willem von Backström T. Assessment of the wind power potential at SANAE IV base, Antarctica: a technical and economic feasibility study // Renewable Energy. 2003. № 28 (13). P. 2037-2061. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00076-4
- [18] Rehman S., Al-Abbadi N.M. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia // Renewable Energy. 2007. № 32 (5). P. 738-749. DOI: 10.1016/j.renene.2006.03.014
- [19] Khogali A., Albar O., Yousif B. Wind and solar energy potential in Makkah (Saudi Arabia) comparison with Red Sea coastal sites // Renewable Energy. 1991. № 1 (3). P. 435-440. DOI: 10.1016/0960-1481(91)90054-S
- [20] Ahmed Shata A., Hanitsch R. Applications of electricity generation on the western coast of the Mediterranean Sea in Egypt // International Journal of Ambient Energy. 2008. № 29 (1). P. 35-44. DOI: 10.1080/01430750.2008.9675054
- [21] Amar F.B., Elamouri M., Dhifaoui R. Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia // Renewable Energy. 2008. № 33 (10). P. 2311-2321. DOI: 10.1016/j.renene.2007.12.019
- [22] Chang T.-J., Wu Y.-T., Hsu H., Chu C., Liao C.-M., Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan // Renewable Energy. 2003. № 28 (6). P. 851-871. DOI:10.1016/S0960-1481(02)00184-2
- [23] Habali S., Hamdan M., Jubran B., Zaid A.I. Assessment and applications of wind energy in Jordan // Solar Energy. 1988. № 40 (2). P. 99-105.
- [24] Gupta B. Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India // Solar Energy. 1986. № 37 (6). P. 469-471.
- [25] Patel M.R. Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. – 472 p. DOI: 10.1201/9781420039924
- [26] Hrayshat E.S. Wind resource assessment of the Jordanian southern region // Renewable Energy. 2007. № 32 (11). P. 1948-1960. DOI: 10.1016/j.renene.2006.11.008

References

- [1] A. Lavrik, Yu. Zhukovskiy and P. Tsvetkov, “Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting”, *Energies*, vol. 14, no. 16, pp. 1-18, 2021. DOI: 10.3390/en14165059
- [2] R. Hosseinalizadeh, G.H. Shakouri, M.S. Amalnick and P. Taghipour, “Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran”, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 139-150, Feb. 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.046
- [3] Yu.A. Sychev, B.N. Abramovich, R.Yu. Zimin and R.A. Kuznetsov, “Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1333, no. 3, Oct. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081
- [4] IEA. Total Installed Power Capacity by Fuel and Technology 2019-2025, main case. [Online]. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-installed-power-capacity-by-fuel-and-technology-2019-2025-main-case> [Accessed: Jun. 6, 2021].
- [5] A.A. Belsky, V.S. Dobush and S.F. Haikal, “Operation of a single-phase autonomous inverter as a part of a low-power wind complex”, *Journal of Mining Institute*, vol. 239, pp. 564-569, 2019. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
- [6] V.S. Dobush, A.A. Belsky and A.N. Skamyin, “Electrical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems in pipelines”, *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1441, 012021, Jan. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012021
- [7] B.N. Abramovich, D.A. Ustinov and W.J. Abdallah, “Development and design of a mobile power plant in the form of a standalone power supply”, *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, 012006, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006
- [8] B.V. Lukutin, D.I. Muravyev and A.V. Ryzhkova, “The efficiency of combined electrothermal and electrochemical accumulation of electricity of a photovoltaic power plant”, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 1019, 012053, Jan. 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012053
- [9] A. Chauhan and R.P. Saini, “Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system”, *Energy*, vol. 124, pp. 59-73, Feb. 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.049
- [10] Y.A. Sychev, M.E. Aladin and V.A. Serikov, “Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1625-1634, Sep. 2022. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [11] V.A. Voronin and F.S. Nepsha, “Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system”, *Journal of Mining Institute*, vol. 246, pp. 633-639, Dec. 2020. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
- [12] A. Skamyin, A. Belsky, V. Dobush and I. Gurevich, “Computation of nonlinear load harmonic currents in the presence of external distortions”, *Computation*, vol. 10, no. 3, 41, Mar. 2022. DOI: 10.3390/computation10030041
- [13] R.E. Commission. Request for Qualification (RFQ). Syrian Ministry of Electricity. 2009.
- [14] C. Justus and A. Mikhail, “Height variation of wind speed and wind distributions statistics”, *Geophysical Research Letters*, vol. 3, no. 5, pp. 261-264, May 1976. DOI: 10.1029/GL003I005P00261
- [15] C. Justus, W. Hargraves, A. Mikhail and D. Graber, “Methods for estimating wind speed frequency distributions”, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, no. 3, pp. 350-353, Mar. 1978.

- DOI: 10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2
- [16] F. Pimenta, W. Kempton and R. Garvine, "Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 2375-2387, Nov. 2008. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.012
- [17] H. Teetz, T. Harms, T. Willem von Backström, "Assessment of the wind power potential at SANAE IV base, Antarctica: a technical and economic feasibility study", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 13, pp 2037-2061, Oct. 2003. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00076-4
- [18] S. Rehman, N. M. Al-Abadi, "Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia", *Renewable Energy*, vol. 32, no. 5, pp 738-749, Apr. 2007. DOI: 10.1016/j.renene.2006.03.014
- [19] A. Khogali, O. Albar, B. Yousif, "Wind and solar energy potential in Makkah (Saudi Arabia) comparison with Red Sea coastal sites", *Renewable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 435-440, 1991. DOI: 10.1016/0960-1481(91)90054-S
- [20] A. Ahmed Shata and R. Hanitsch, "Applications of electricity generation on the western coast of the Mediterranean Sea in Egypt", *International Journal of Ambient Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 35-44, Jan. 2008. DOI: 10.1080/01430750.2008.9675054
- [21] F.B. Amar, M. Elamouri and R. Dhifaoui, "Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 2311-2321, Feb. 2008. DOI: 10.1016/j.renene.2007.12.019
- [22] T.-J. Chang, Y.-T. Wu, H. Hsu, C. Chu, C.-M. Liao, "Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 6, pp. 851-871, May 2003. DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00184-2
- [23] S. Habali, M. Hamdan, B. Jubran and A.I. Zaid, "Assessment and applications of wind energy in Jordan", *Solar Energy*, vol. 40, no. 2, pp. 99-105, 1988.
- [24] B. Gupta, "Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India", *Solar Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 469-471, 1986.
- [25] M.R. Patel, *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. DOI: 10.1201/9781420039924
- [26] E.S. Hrayshat, "Wind resource assessment of the Jordanian southern region", *Renewable Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1948-1960, Sep. 2007. DOI: 10.1016/j.renene.2006.11.008

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Устинов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Denis A. Ustinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Айсар Абу Рашид, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Abu Rashid Aysar, postgraduate student of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ЖИЗНЬ НГТУ 2023

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева вышло в свет учебное пособие «Возобновляемая энергетика. Издание второе, переработанное и дополненное» (авторы: докт. техн. наук Дарьенков А.Б. и Соснина Е.Н., канд. техн. наук Серебряков А.В и Шалухо А.В.).



В учебном пособии представлены основные принципы функционирования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и способы построения на их основе электротехнических комплексов и систем, а также тенденции и перспективы развития ВИЭ в мире, России и Нижегородской области. Приведено описание энергоустановок на ВИЭ: солнечных, ветроэнергетических, работающих на биотопливе, малых гидроэлектростанций, установок, использующих энергию морских волн, использующих геотермальную энергию и низкопотенциальное тепло.

Рассмотрены вопросы развития водородной энергетики, применения топливных элементов в системах электроснабжения потребителей. Предложен лабораторный практикум с подробным описанием лабораторного стенда, материалов по устройству и функционированию ветровых и солнечных электростанций.

Учебное пособие предназначено для магистрантов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

Более подробная информация: shaluho@nntu.ru

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

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 2

Nizhny Novgorod 2023

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)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, 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)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, 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)
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic)
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)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

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

ISSN 2658-6754

Periodic printed edition registered by Roskomadzor
III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2023

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
A.S. Kornev, N.V. Kuznetsov, S.I. Volskiy, I.P. Vikulov. Search algorithm for calculating transients by matrix exponential method	4
Yu.L. Gunko, A.A. Bachaev, V.A. Kozyrin, O.L. Kozina, E.N. Vasin. Influence of some additives on capacity characteristics and service life of nickel-zinc batteries.....	21
E.L. Ryzhova. Improving energy efficiency in road transport by using energy storage systems.....	36
V.M. Zavyalov, S.A. Abeidulin, S.V. Gaiduk, M.B. Uglova. Investigation of over-voltages on capacitors of series resonant circuit of wireless charging station.....	49
POWER INDUSTRY	62
V.Y. Vukolov. Rational definition of balance affiliation boundary in task of ensuring reliability of non-train power networks.....	62
A.N. Visyashchev, E.R. Plenkov, D.S. Fedosov. Evaluation of value and character of fault impedance on high voltage overhead transmission lines.....	78
A.V. Kuznetsov, V.V. Chikin. Assessment of cost of harmful effects of transmission and consumption of electricity of reduced quality in power supply systems.....	90
A.V. Sluzova, A.A. Loskutov. Compensation of single-phase earth fault currents in networks with isolated neutral using phase-reversal device.....	101
D.A. Ustinov, A.R. Aysar. Wind energy potential evaluation for power supply to mining enterprises in Al Hayjana, Syria.....	121
NNSTU 2023 publishing news	135

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

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 15.06.2023. Дата выхода в свет: 26.06.2023

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 100 экз. Заказ .

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

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