МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<u>№</u> 2

Нижний Новгород 2025

УДК 621.3 ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 2 (30). – 140 с.

Выходит 1 раз в квартал

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

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

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор отв. секретарь Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Даурен Садыкович Ахметбаев	д-р техн. наук (Казахстан)
Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

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

ISSN 2658-6754 УДК 621.3 СМИ зарегистрировано Роскомнадзором ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 4

Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ	
и перспективы развития дистанционных методов определения мест	
повреждений контактной сети. Часть 2	4
Лоскутов А.А., Жаренков С.А., Симанов А.С. Краткосрочное	
прогнозирование графика электрической нагрузки	
в микроэнергосистеме	34
Савчук В.С., Плехов А.С., Чернов Е.А. Управление источником пи-	
тания электрической луги при электросварке труб высокого лавления	56
Устинов Л.А., Аблалла В., Шафхатов Е.Р. Повышение	
линамических характеристик DC/DC преобразователя за счет	
настройки ПИ-регулятора напряжения	71
Силопор Б.Н. Аль-Мохаммедари А. Лж. М. Молелипорацие в Matlah	, 1
upolecca papera arrangementa are transformed and a cette a putation	
процесса заряда аккумулятора электромобиля от сети и выдачи мощ-	02
HOUTH B CETE (patota B persume $O_2 \vee A \vee 2O$)	93
иванов А.Б., Соснина Е.П. О цифровом проектировании	110
высокоавтоматизированной подстанции 10/0,4 кВ	112
	100
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	122
Герман Л.А., Маралова В.А. Снижение потерь напряжения и потерь	
мощности конденсаторнои установкои в тяговои сети с односторон-	100
ним питанием	122
VDOUU44	104
АРОНИКА	134
Палата Валата Балата Татара (12.00.1042 - 02.04.2025)	124
памяти владимира Георгиевича Титова (12.09.1945 – 02.04.2025)	134

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925:621.332.3

EDN ABDYPP

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ. ЧАСТЬ 2

А.Л. Куликов

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

В.Л. Осокин

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru Нижегородский государственный инженерно-экономический университет Княгинино, Нижегородская область, Россия

Д.А. Леваков

ORCID: 0009-0006-5706-7515 e-mail: dmitriy.levakov@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет Княгинино, Нижегородская область, Россия

Невозможностью обеспечения резервирования линий электропередач контактной сети обусловлена большая длительность задержек движения электроподвижного состава в случае возникновения устойчивых коротких замыканий (КЗ). Одним из основных факторов, препятствующих уменьшению временных затрат на устранение неисправности и восстановление нормальной работы системы тягового электроснабжения, является невозможность быстрого и точного определения места повреждения (ОМП) с использованием существующих методов. Несмотря на то, что к настоящему времени разработано значительное количество дистанционных методов определения места короткого замыкания (ОМКЗ) контактной сети, накоплен большой опыт эксплуатации устройств, реализующих функцию ОМКЗ и выполнено большое количество исследований на тему повышения точности средств дистанционного ОМП, ни один из известных способов не обладает достаточной эффективностью с точки зрения уменьшения ущерба при устойчивых КЗ, что обусловливает актуальность разработки более точных методов ОМП контактной сети.

Во второй части статьи дана характеристика методам ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), рассмотрены известные способы ОМП контактной сети

по ПАР, отмечены наиболее существенные особенности их информационного и математического обеспечения и используемых моделей тяговой сети, проанализированы преимущества и недостатки этих методов. По результатам произведенного обзора сделан вывод о сохраняющейся актуальности задачи дальнейшего развития средств дистанционного ОМП контактной сети и выделены наиболее перспективные направления повышения их эффективности.

Ключевые слова: определение мест повреждений, определение места короткого замыкания, контактная сеть, система тягового электроснабжения, электрифицированный железнодорожный транспорт.

Для цитирования: Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 2 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 4-33. EDN ABDYPP

COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF DISTANCE METHODS FOR OVERHEAD CATENARY NETWORK FAULT LOCATION. PART 2

A.L. Kulikov

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

V.L. Osokin

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

D.A. Levakov

ORCID: 0009-0006-5706-7515 e-mail: dmitriy.levakov@mail.ru

Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. The impossibility of reservation of the overhead catenary network lines is due to the long delays in the movement of electric rolling stock during persistent short circuits. One of the main factors preventing the reduction of time spent on troubleshooting and restoring of a traction power supply system normal functioning is the impossibility of quick and accurate fault location (FL) using existing methods. Despite the fact that a significant number of the distance methods for a short circuit location (SCL) in a overhead catenary network have been developed, a great deal of experience has been accumulated in the operation of devices implementing the SCL function, and a large number of studies have been carried out on the topic of increasing the accuracy of a distance FL tools, none of the known methods is sufficiently effective in terms of damage reducing during persistent short circuits, which determines the relevance of developing more accurate methods for the overhead catenary network FL.

The second part of the article examines known distance FL tools based on emergency mode parameters, notes the most significant features of their informational and mathematical support and the traction network models used, and analyzes the advantages and disadvantages of these methods. Based on the results of the review, a conclusion was made about the continuing relevance of task of the further development of the overhead catenary network distance FL tools development and the most promising areas for increasing their effectiveness were identified.

Keywords: fault locating, short circuit location, overhead catenary network, traction electric power supply system, electrified railway transport.

For citation: A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, "Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 2", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-33, 2025. EDN ABDYPP

I. Характеристика методов определения мест повреждения контактной сети по параметрам аварийного режима

По результатам анализа преимуществ и недостатков различных подходов к определению места повреждения (ОМП) в первой части статьи [1] был сделан вывод о предпочтительности использования средств ОМП, принцип действия которых основан на анализе параметров, характеризующих режим короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети, поскольку эти методы в наибольшей степени удовлетворяют требованию быстрой и точной локализации места КЗ на линиях электропередач (ЛЭП) контактной сети. Как правило, анализируемыми параметрами аварийного режима (ПАР), по значениям которых возможно отличить аварийный режим от нормального и которые несут информацию о местоположении КЗ, являются действующие значения и фазовые углы напряжений на шинах тяговых подстанций (ТП) и постах секционирования (ПС), а также токов питающих фидеров и плеч питания ТП, на основании которых вычисляются производные параметры: модуль, активная и реактивная составляющие сопротивления петли КЗ и реактивная мощность [2, 3]. Оценка ПАР осуществляется после затухания апериодической составляющей тока КЗ и до расхождения главных контактов выключателя фидера, питающего поврежденный участок тяговой сети, что существенно отличает ОМП по ПАР от рассмотренных выше петлевых методов. Последовательность операций при ОМП по ПАР показана на рис. 1 [2, 4]. К группе ОМП по ПАР относится большое число методов, различающихся по большому числу критериев, в качестве наиболее важных из которых можно вылелить следующие:

- использование одностороннего или двухстороннего замера ПАР;

– объем (количество) анализируемых ПАР;

- применяемое математическое обеспечение ОМП;

 возможность использования для определения места короткого замыкания (ОМКЗ) на одно-, двух- и многопутных участках;

 возможность использования для ОМКЗ на участках с теми или иными системами тяги и схемами питания контактной сети;

- применяемую математическую модель тяговой сети.



Рис. 1. Простейшая структурная схема системы ОМП контактной сети: 1 – контактная сеть; 2 – ТП или ПС; 3, 4 – трансформатор тока (TT) и трансформатор напряжения (TH) соответственно; 5 – место КЗ

Fig. 1. The simplest structural diagram of the FL system of an overhead catenary network:

1 – overhead catenary network; 2 – traction substation (TS) or sectioning point (SP); 4 – current transformer (CT) and voltage transformer (VT); 5 – short circuit (SC) location

Поскольку ОМП по ПАР представляет собой задачу, для решения которой необходимо использование математической модели, воспроизводящей существенные с точки зрения поставленной задачи свойства тяговой сети (параметры системы и их связь с параметрами режима), важным условием ее правильного решения и минимизации ошибки ОМП является выбор модели. Модель должна в полной мере отвечающей требованию ее адекватности, т.е. отображения свойств системы с требуемой точностью [5]. Теоретические исследования [6-10] и опыт длительной эксплуатации различных устройств, реализующих функцию дистанционного ОМП по ПАР, свидетельствуют о значительном влиянии адекватности используемой модели сети и достоверности данных о ее параметрах на точность определения удаленности места КЗ [2, 11]. В связи с этим, одним из важнейших направлений развития средств ОМП контактной сети является совершенствование математических моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ) [8-10, 12-17].

Другой важной задачей является выбор состава получаемой и анализируемой информации о значениях ПАР, а также совокупности методов, алгоритмов и программ, используемых для вычисления расстояния до места КЗ, т.е. информационного и математического обеспечения ОМП соответственно [4]. Выбор используемого информационного и математического обеспечения существенно влияет на точность и достоверность результатов ОМП.

II. Методы ОМП, основанные на использовании однородных моделей тяговой сети

Первый отечественный и зарубежный опыт применения методов ОМП воздушных линий по параметрам режима КЗ относится к середине 1930-х гг. [4, 11]. Однако промышленный выпуск и внедрение простейших аналоговых устройств для реализации этих методов были начаты в 1950-х гг. Задача ОМП контактной сети долгое время оставалась нерешенной из-за невозможности использования стандартных средств ОМП электрических сетей в контактной сети железных дорог, в частности, в виду применения значений токов и напряжений нулевой последовательности, которые отсутствуют в однофазной тяговой сети.

Первые специализированные устройства для ОМП контактной сети были разработаны в 1960-х гг. и описаны в [18-21]. В основу принципа действия этих устройств положен «метод Z», сущность которого заключается в следующем (рис. 2): в момент КЗ в контролируемой фидерной зоне производится одностороннее измерение и фиксация модулей напряжения $U_{\rm III}$ на шинах ТП и тока I_{Φ} фидера, питающего поврежденную контактную сеть. В последующем осуществляется деление значения $U_{\rm III}$ на значение I_{Φ} с учетом известного значения полного удельного сопротивления $z_{\rm TC}$ тяговой сети на данном участке [18, 22]:

$$L_{\rm K3} = \frac{U_{\rm III}}{I_{\Phi} \cdot z_{\rm TC}} = \frac{Z_{\rm IIK3}}{z_{\rm TC}},\tag{1}$$

где L_{K3} – расстояние до места K3, км; $Z_{\Pi K3}$ – полное сопротивление петли K3, Ом.



Рис. 2 – Схема ОМП «методом Z» (а) и схема замещения тяговой сети (б), используемая для его реализации:

1 – ТП; 2 – контактная сеть; 3 – место КЗ; 4, 5 – ТТ и ТН; 6 – устройство ОМП; Z_{TП} – сопротивление ТП; Z_{TC} – сопротивление тяговой сети; Z_П – переходное сопротивление

Fig. 2. The diagram of the FL using «method Z» (a) and the equivalent circuit of the traction network (b) used for its implementation:

I - TS; 2 – overhead catenary network; 3 – SC location; 4, 5 – CT and VT; 6 – device for FL; Z_{TII} – impedance of TS; Z_{TC} – traction network impedance; Z_{II} – transition impedance

Таким образом, «метод Z» основан на вычислении расстояния до места K3, как отношения сопротивления петли K3 к удельному значению сопротивления эквивалентированной тяговой сети. На основе этого метода были разработаны устройства типов УКЗН, ОМП-68, ОМП-71 и «Лисна». Опыт эксплуатации устройств показывает, что их точность является недостаточной: при наиболее благоприятных условиях (в случае металлического K3) погрешность «метода Z» может составлять около 500 м, а при больших значениях переходного сопротивления или при K3 на конце троса группового заземления (ТГЗ) величина ошибки может превышать 5...6 км [2, 22, 23].

Низкая точность «метода Z» обусловлена следующими факторами. Как следует из (1), ОМП основано на предположениях об однородности тяговой сети, независимости значения ее удельного сопротивления от параметров режима и расстояния от ТП до места K3, а также не учитывает переходное сопротивление в месте повреждения. В случае K3 через переходное сопротивление в неоднородной сети напряжение на шинах ТП и входное сопротивление цепи K3 могут быть определены по (2) и (3) соответственно:

$$U_{\rm III} = I_{\Phi} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\mathbf{Z}_{\rm TC,i} \cdot l_i \right) + Z_{\Pi} \right), \tag{2}$$

$$Z_{\Pi K3} = \frac{U_{\Pi I}}{I_{\Phi}} = \frac{I_{\Phi} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} (z_{TC,i} \cdot l_{i}) + Z_{\Pi}\right)}{I_{\Phi}} = \sum_{i=1}^{n} (z_{TC,i} \cdot l_{i}) + Z_{\Pi},$$
(3)

где Z_{Π} – переходное сопротивление в месте K3, Ом; $z_{TC.i}$ – удельное сопротивление тяговой сети на *i*-м однородном участке, Ом/км; l_i – длина *i*-го однородного участка, км; n – количество однородных участков на интервале между ТП и местом K3.

Поскольку предположение об однородности тяговой сети не позволяет учесть влияние расстояния от ТП до места КЗ на значение удельного сопротивления, а переходное сопротивление Z_{Π} во всех случаях является неизвестной величиной, случайным образом изменяющейся в широких пределах, указанные факторы вносят погрешность в результат ОМП. При этом величина погрешности значительно увеличивается при двухстороннем питании в силу того, что в этом случае падение напряжения на переходном сопротивлении, в соответствии с первым законом Кирхгофа, определяется суммой токов со стороны смежных подстанций [2]. Кроме того, известно [2, 6, 22], что погрешность «метода Z» зависит от большого количества других факторов, наиболее важными из которых являются:

- шунтирующее влияние земли на сопротивление рельсовой цепи;

– различие схем питания контактной сети и схем соединения рельсов;

- наличие остаточной нагрузки электроподвижного состава (ЭПС);

– различие напряжений холостого хода смежных ТП и изменение их параметров при регулировании напряжения;

- погрешности TT и TH, а также измерительных приборов.

В [2] отмечено, что для устранения недостатка «метода Z», связанного с использованием усредненного значения сопротивления тяговой сети, настройку устройств ОМП целесообразно выполнять с использованием универсальных или индивидуальных нелинейных графиков зависимости сопротивления тяговой сети от удаленности места K3, учитывающих различный характер этой зависимости при разном количестве параллельных путей и при разных схемах питания контактной сети.

Известен модифицированный вариант [24] этого способа, адаптированный для применения в тяговой сети 2×25 кВ. Как известно [2, 25], на участках, электрифицированных по системе 2×25 кВ с автотрансформаторами, зависимости тока КЗ и сопротивления петли КЗ носят волновой характер, как показано на рис. 3.6. Этот фактор не позволяет однозначно определить расстояние до места КЗ с использованием рассмотренного выше способа, поскольку одному значению сопротивления петли КЗ соответствуют несколько возможных мест повреждения.



Рис. 3. Принципиальная схема ОМП методом [24] (а) и зависимости сопротивления петли КЗ и токов на выводах средних точек автотрансформаторов (б):

1 – ТП; 2 – контактный провод; 3 – питающий провод; 4 – рельсы; 5–7 – ТТ; 8 – ТН; 9, 10 – автотрансформаторы; 11–14 – токовые реле; 15 – линия связи; 16 – устройство ОМП; 17 – место КЗ

> Fig. 3. Schematic diagram of the FL using the method [24] (a) and the dependence of the SC loop impedance and currents at the terminals of the autotransformers (AT) midpoints (b):

I – *TS*; *2* – catenary wire; *3* – feeding wire; *4* – rails; *5*–7 – *CT*; *8* – *VT*; *9*, *10* – *AT*; *11*–*14* – current relays; *15* – communication lines; *16* – *FL* device; *17* – *SC* location

Этот способ предполагает установку максимальных токовых реле на выводах средних точек автотрансформаторов. Уставки срабатывания реле выбираются таким образом, чтобы по комбинации их состояний можно было судить о нахождении места КЗ в одной из зон I-V (рис. 3), в пределах которых зависимость $Z_{\Pi K3}(L_{K3})$ является однозначной [2, 24]. После определения зоны повреждения удаленность места КЗ уточняется с использованием «метода Z».

Другой вариант [26] «метода Z», также предназначенный для ОМП тяговой сети 2×25 кВ, основан на одновременном двухстороннем измерении ПАР, значения которых используются для вычисления входных сопротивлений петли КЗ со стороны каждой из смежных ТП. Определение расстояния до места КЗ производится по зависимостям отношений каждого из этих сопротивлений к их сумме от удаленности места аварии, которые полагаются близкими к линейным. В [2] отмечено, что наибольшая точность ОМП обеспечивается при измерении токов и напряжений контактных сетей всех путей участка и питающего провода на каждой из смежных ТП. Их значения используются для реализации модифицированного вычислительного алгоритма, приведенного в [2].

Способы обладают большей точностью по сравнению с базовым вариантом «метода Z», однако при близких повреждениях, КЗ через переходное сопротивление и наличии ЭПС в межподстанционной зоне их погрешность может достигать 8 км.

Дальнейшим развитием подхода, положенного в основу принципа действия рассмотренных устройств, является способ, основанный на оценке реактивной составляющей сопротивления петли КЗ. Метод, названный «методом X», предполагает измерение в момент КЗ (рис. 4), помимо модулей тока I_{Φ} и напряжения U_{Φ} , дополнительно фазового угла φ между их векторами и вычисление расстояния до места КЗ по формуле [22]:

$$L_{\rm K3} = \frac{U_{\rm III} \cdot \sin \varphi}{I_{\Phi} \cdot x_{\rm TC}} = \frac{X_{\rm TK3}}{x_{\rm TC}},\tag{4}$$

где *X*_{ПКЗ} – индуктивное сопротивление петли КЗ, Ом; *x*_{TC} – удельное реактивное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

Использование реактивного сопротивления петли КЗ обусловливает преимущество «метода X» перед «методом Z», состоящее в исключении влияния переходного сопротивления на результат ОМП, что объясняется преимущественно резистивным характером сопротивления дуги [2, 22, 23]. На «методе X» основан принцип действия ряда отечественных и зарубежных устройств [27-39] ОМП контактной сети, включенных в систему телемеханики. Модификация «метода X», отличием которой является возможность учитывать взаимное влияние со стороны контактной сети параллельного пути, также положена в основу функции ОМП, реализуемой микропроцессорным устройством релейной защиты (МУРЗ) контактной сети БМРЗ-ФКС [30].

Известен вариант [31] «метода Х», предназначенный для ОМП тяговой сети железнодорожных станций. Как известно [25], в пределах станций контактная сеть смежных путей соединяется параллельно, при этом количество электрифицированных путей может быть значительным, что препятствует однозначному определению места аварии по значению сопротивления петли КЗ, рассчитанному по (4), поскольку каждому значению этого сопротивления соответствует несколько точек, расположенных на разных путях. Согласно описанию к патенту [31], эта проблема может быть решена путем обеспечения единственного пути протекания тока КЗ, для чего внутри секции исключается параллельное соединение контактной сети.



Рис. 4. Принципиальная схема ОМП «методом Х» (а) и схема замещения тяговой сети (б), используемая для его реализации: $1 - T\Pi; 2 - контактная сеть; 3 - место КЗ; 4, 5 - TT и TH; 6 - фазометр;$ 7 - устройство ОМП; Хтп – сопротивление ТП; Хтс – сопротивление тяговой сети

Fig. 4. Schematic diagram of the FL using «method X» (a) and the equivalent circuit of the traction network (b) used for its implementation: 1-TS; 2 – overhead catenary network; 3 – SC location; 4, 5 – CT and VT; 6 – phase meter; 7 – device for FL; $X_{T\Pi}$ – TS impedance; X_{TC} – traction network impedance

Опыт эксплуатации устройств ОМП, включенных в систему телемеханики тяговой сети, «метод X» обеспечивает большую точность при ОМП тяговой сети однопутного участка с односторонним питанием контактной сети, чем «метод Z». Вместе с тем, использование (4) не позволяет учесть искажение расчетного значения X_{IIK3} при K3 через ТГ3, при двухстороннем питании контактной сети и при узловом или параллельном соединении контактных сетей смежных путей. Кроме того, остальные недостатки «метода Z» также присущи «методу X», в связи с чем его погрешность может превышать 2,5 км [2].

Ш. Адаптивные методы ОМП,

основанные на использовании индуктивно развязанных моделей

Как было отмечено выше, применение средств дистанционного ОМП контактной сети, основанных на использовании упрощенных схем замещения тяговой сети и реализации простейших вычислительных алгоритмов, в большинстве случаев не позволяет точно определить место повреждения, что подтверждается как опытом их практического применения, так и данными теоретических исследований [2, 6, 7]. Вместе с тем, разработка более эффективных способов ОМП долгое время сдерживалась недостаточными

возможностями существующей аналоговой техники и отсутствием адекватных моделей СТЭ, позволяющих при расчетах принимать во внимание большее число факторов, оказывающих влияние на значения ПАР [22].

Развитие микропроцессорной вычислительной техники и появление МУРЗ тяговой сети сделали возможной реализацию более сложных методов ОМП [22]. Эти методы обеспечивают расчет расстояния до места КЗ со значительно меньшей погрешностью по сравнению с рассмотренными выше методами, что достигается за счет применения усовершенствованного информационного и математического обеспечения, а также использования индуктивно развязанных схем замещения, отличающихся лучшим уровнем детализации и достаточно простым способом учета взаимных индуктивных связей между всеми проводниками тяговой сети.

Способы построения индуктивно развязанных схем тяговой сети переменного тока основаны на теоретических положениях, приведенных в [25, 32, 33]. Решение этой задачи основывается на широком применении эквивалентирования параллельно соединенных проводников и принятии ряда допущений, значительно упрощающих расчет сопротивлений тяговой сети. Эти допущения, а также расчетные формулы и их подробные обоснования приведены в [12, 13, 34, 35]. Для наиболее распространенного случая – двухпутного участка с двухсторонним питанием тяговой сети – пример индуктивно развязанной схемы замещения, составленной с использованием этих решений, представлен на рис. 5 б.

К наиболее простым способам ОМП, при разработке которых была предпринята попытка учесть специфику устройства тяговой сети и, в частности, влияние проводимости рельсы-земля, относятся усовершенствованные варианты «метода X»: «метод X1» и «метод X2» [7, 22, 23]. «Метод X1» основан на одностороннем измерении токов поврежденного присоединения I'_1 и плеча ТП I_4 , а также напряжения U_4 на шинах ТП и вычислении расстояния L_{K3} по выражению:

$$L_{K3} = \frac{U_A \cdot \sin(\varphi_1 - \delta_1)}{I_1 \cdot x_{-1,n} + I_A \cdot x_{p,mv}},$$
(5)

где φ_1 – угол между векторами U_A и I'_1 , град.; $x_{-1,n}$ – удельное индуктивное сопротивление контактной сети контактной сети одного пути при *n* путях, включенных в работу, и равенстве тока контактной сети этого пути току остальных путей, Ом/км; $x'_{p,mv}$ – удельное индуктивное сопротивление эквивалентированной рельсовой цепи с учетом взаимного индуктивного влияния контактных сетей всех путей и шунтирующего влияния земли, Ом/км; δ_1 – дополнительный угол, компенсирующий погрешность при близких K3 и больших значениях R_{Π} , град.



Рис. 5. Принципиальная схема питания контактной сети двухпутного участка (а) и индуктивно развязанная схема замещения (б):

 2 – ТП; 3 – ПС; <u>U</u>_{A,xx}, <u>U</u>_{B,xx} – напряжения холостого хода ТП; U_A, U_B – напряжения на шинах ТП; <u>I</u>_A, <u>I</u>_B – токи ТП; <u>I</u>_K – ток КЗ; <u>I</u>_{1q} – ток в неповрежденной контактной сети; <u>I</u>[']1, <u>I</u>^{''1} – токи в контактной сети поврежденного пути; <u>Z</u>_{пA}, <u>Z</u>_{nB} – сопротивления ТП; <u>Z</u>₂ – сопротивление контактной сети двух путей; <u>Z</u>_{pA}, <u>Z</u>_{pB} – сопротивления рельсовой цепи на участках от места КЗ до ТП А и ТП В; <u>Z</u>_{1q} – сопротивление неповрежденной контактной сети; <u>Z</u>[']1, <u>Z</u>^{''1} – сопротивления поврежденной контактной сети; <u>Z</u>[']BC.1 – взаимные сопротивления контактных сетей; R_П – переходное сопротивление

Fig. 5. Schematic diagram of the electric power supply of the overhead catenary network of a double-track section (a) and inductively isolated equivalent circuit (b):

1, 2 - TS; 3 - SP; $\underline{U}_{A,xx}$, $\underline{U}_{B,xx} - TS$ open circuit voltages; U_A , U_B – bus voltages of TS; \underline{I}_A , $\underline{I}_B - TS$ currents; $\underline{I}_K - SC$ current; \underline{I}_{1q} – undamaged overhead catenary network current; \underline{I}'_1 , \underline{I}'_1 – undamaged track currents; \underline{Z}_{nA} , $\underline{Z}_{nB} - TS$ impedances; \underline{Z}_2 – two tracks overhead catenary network impedance; \underline{Z}_{pA} , \underline{Z}_{pB} – impedances of the rail circuit in the sections from the SC location to TS A and TS B; \underline{Z}_{1q} – undamaged overhead catenary network impedance; \underline{Z}'_1 , \underline{Z}''_1 – damaged overhead catenary network impedance; $\underline{Z}'_{BC,1}$, $\underline{Z}''_{BC,1}$ – mutual impedances; R_{II} – transition impedance

Наиболее существенным отличием «метода X^2 », также основанного на одностороннем измерении ПАР, является вычисление параметров дуги, т.е. ее сопротивления и тока КЗ. При этом в силу того, что значения $R_{\rm d}$ и $I_{\rm K}$ изначально неизвестны, а информация о значениях ПАР со стороны смежной ТП не используется, для расчета расстояния до места КЗ необходима реализация сложного вычислительного алгоритма, основанного на использовании метода последовательных приближений [7, 23].

Известно [2, 22], что большая точность ОМП обеспечивается при использовании методов, учитывающих влияние таких факторов, как наличие переходного сопротивления в месте КЗ и изменение сопротивления рельсовой цепи в зависимости от длины межподстанционной зоны и удаленности места КЗ. Этим требованиям отвечают адаптивные указатели мест повреждений [36-46]. В основу указанных методов ОМП положены применение индуктивно развязанных моделей тяговой сети и реализация сложных алгоритмов, приведенных в работах [2, 22, 23] и описаниях к патентам [36-46]. Их совокупность можно разделить на группы односторонних [36, 40, 41, 46] и двухсторонних [36-39, 42-45] методов. Использование значений ПАР, измеренных на двух смежных ТП, позволяет исключить обратные связи между функциональными блоками устройства ОМП и производить вычисления без использования метода последовательных приближений [37, 42-45], или существенно упростить расчетные выражения [38, 42, 43] за счет построения вычислительного алгоритма только на анализе значений токов [23]. Вместе с тем, существенным недостатком двухсторонних методов является необходимость оборудования канала связи для обмена информацией о ПАР между смежными ТП, что предусматривается не всеми существующими системами телемеханики [2, 23]. Кроме того, введение в устройство канала связи между смежными ТП вносит в результат ОМП дополнительную погрешность, обусловленную влиянием помех [41].

Общими недостатками, характерными для большинства как односторонних, так и двухсторонних способов, являются следующие [4]:

- значительная сложность вычислений;

 введение операций по определению значений промежуточных параметров, погрешность при расчете которых приводит к значительной ошибке ОМП;

 неопределенность подбора поправочных коэффициентов для конкретных условий функционирования тяговой сети;

 использование рассчитываемых и измеряемых величин в знаменателях расчетных формул, приводящее к увеличению погрешности;

– использование большого числа допущений (о равенстве аргументов напряжений холостого хода смежных ТП, замена части комплексных значений ПАР абсолютными и т.д.);

– использование значений тока TП, во многих случаях определяемого не только суммой токов в контактной сети, но также нагрузкой потребителей собственных нужд ТП и потребителей, питаемых от ЛЭП системы «два провода-рельс».

По указанным причинам погрешность рассмотренных методов ОМП составляет не менее 200 м и в ряде случаев может превышать 1 км [36, 38, 39]. К факторам, существенно ограничивающим эффективность этих способов, также относится невозможность применения методов [37-42], предполагающих использование значений токов фидеров контактной сети, для вычисления расстояния до места КЗ, расположенного за ближайшей узловой точкой (ПС или пункт параллельного соединения), в которой контактные сети смежных путей соединяются параллельно [45].

Простым способом повышения точности одностороннего ОМП контактной сети является перенос места измерения ПАР с шин ТП на ПС [47]. Преимущества данного решения объясняются уменьшением влияния изменения сопротивления рельсовой цепи вблизи ТП, влияния остаточного тока ЭПС, остающегося в работе ввиду малого снижения напряжения на шинах ТП, а также уменьшением полной погрешности ТТ за счет уменьшения величины измеряемых токов КЗ [47, 48]. В связи с этим, из числа односторонних методов ОМП, основанных на традиционных принципах измерения тока и напряжения, следует выделить метод [46], основанный на измерении значений ПАР на ПС и их последующем анализе. Другим преимуществом указанного способа является существенное упрощение используемого алгоритма определения расстояния до места КЗ по сравнению с методами [36– 45]. Упрощение алгоритма заключается в значительном уменьшении числа вычислительных операций и обеспечивается за счет использования способа объективной оценки переходного сопротивления в месте КЗ, описанного в [49]. Вместе с тем, метод [46] не предназначен для ОМП неоднородной тяговой сети и предполагает использование формул, содержащих в знаменателе измеренные и рассчитанные величины, что приводит к снижению точности.

IV. Современные методы ОМП контактной сети

К числу основных факторов, обусловливающих погрешности рассмотренных методов ОМП по ПАР, относится использование упрощенных расчетных моделей СТЭ, при составлении которых тяговая сеть полагается однородной на всем протяжении межподстанционной зоны, ее элементы (контактная сеть и рельсовая цепь) эквивалентируются, и не учитывается влияние ЭПС. Кроме того, модели не учитывают наличие электрической связи между смежными ТП посредством ЛЭП 110 (220) кВ системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Согласно [12], погрешность вычисления параметров системы, обусловленная представлением структуры тяговой сети, в действительности представляющей собой сложную многопроводную систему, в упрощенном виде составляет 1-2 %, а общая погрешность вычислений по упрощенным методикам при этом может достигать 10 %, что является приемлемым только для повседневной инженерной и проектной практики. Также в [15, 50, 51] отмечено, что неучет конфигурации СВЭ и использование приближенных значений ее параметров также вносят значительную методическую погрешность в задачи расчета или анализа ПАР в тяговой сети. Эти обстоятельства в совокупности с развитием эффективных средств компьютерного моделирования электрических систем и широким распространением МУРЗ тяговой сети обусловили актуальность задач совершенствования подходов к моделированию тяговой сети и разработки методов ОМП, основанных на использовании более детализированных и адекватных моделей СТЭ [10, 52, 53].

Первым известным способом дистанционного ОМП, основанным на использовании детализированной модели, учитывающий неоднородность тяговой сети и случайный характер изменения ряда параметров системы, и на применении современных технических средств как на этапе моделирования СТЭ, является «метод C», описанный в [54]. Важнейшей особенностью математического обеспечения метода является применение положений теории распознавания образов для установления места КЗ [52, 53, 55]. Сущность «метода C» заключается в следующем. На предварительном этапе (до возникновения КЗ) составляется схема замещения СТЭ, учитывающая неоднородность структуры тяговой сети, шунтирующее влияние земли, зависимость ряда параметров тяговой сети от параметров режима, взаимное влияние между ее проводниками, особенности схемы питания и другие факторы [8-10]. Пример такой схемы показан на рис. 6.



Рис. 6. Детализированная схема замещения однопутного участка тяговой сети: К – контактная сеть; Р – эквивалентированная рельсовая цепь; 3, ГЗ – верхний и нижний слои земли; <u>Uxx.A</u>, <u>Uxx.B</u> – напряжения холостого хода ТП; <u>Z</u>A, <u>Z</u>B – сопротивления ТП; <u>Z</u>фA, <u>Z</u>фB, <u>Z</u>офA, <u>Z</u>офB – сопротивления питающих и отсасывающих фидеров ТП, Rп – переходное сопротивление

Fig. 6. Detailed equivalent circuit diagram of traction network single-track section: K – overhead catenary network; P – equivalent rail circuit; 3, $\Gamma 3$ – upper and lower ground layers; $U_{XX,A}$, $U_{XX,B}$ – TS open circuit voltages; Z_A , Z_B – TS impedances; $Z_{\Phi A}$, $Z_{\Phi B}$, $Z_{0\Phi A}$, $Z_{0\Phi B}$ – supply and return feeders impedances, R_{Π} – transition resistance

Эта схема условно разделяется на ряд сегментов $[L_1; L_m]$ длиной ΔL , в пределах которых тяговая сеть полагается однородной (табл. 1). Путем расчета ПАР при КЗ на границах выделенных участков схемы формируется база данных, состоящая из векторов $[M_j]$, которые в свою очередь включают наборы $\{x_{i,j}\}$ значений параметров режима и петли КЗ. Каждый вектор $[M_j]$ соответствует конкретному месту повреждения, значению переходного сопротивления R_{Π} , сезону и другим условиям. Данные о ПАР, полученные по результатам расчетов или имитационных экспериментов, сохраняются в долговременной памяти и используются на этапе анализа измеренных значений ПАР.

Таблица 1. Структура базы данных расчетных значений ПАР

...

. . .

...

Table 1.

 $\{x_{2,m}\}$

...

 $\{x_{n,m}\}$

 Mj

 Mj

 Lкз, км

 R_{Π} , Ом
 ΔL_1
 ΛL_1 $\Delta L_1 + \Delta L_2$...
 $\sum_{i=1}^m \Delta L_i$
 $R_{\Pi 1}$ $\{x_{1,1}\}$ $\{x_{1,2}\}$...
 $\{x_{1,m}\}$

 $\{x_{2,2}\}$

...

 $\{x_{n,2}\}$

 $R_{\Pi 2}$

•••

 $R_{\Pi n}$

 $\{x_{2,1}\}$

•••

 $\{x_{n,1}\}$

Structure of calculated values of fault mode parameters database

При реальном K3 определяется множество значений $\{X\}$ ПАР, по своему составу аналогичное векторам $\{x_{i,j}\}$ расчетных значений, далее методом сравнения эталонов производится идентификация множеств $\{X\}$ и $\{x_{i,j}\}$ и определяется степень соответствия измеренных и рассчитанных значений ПАР. В качестве места K3 принимается интервал, характеризующийся наибольшим числом совпадений между элементами векторов $\{X\}$ и $\{x_{i,j}\}$ [52-54].

Согласно результатам экспериментальной проверки, погрешность «метода C» составляет 200-400 м и зависит прежде всего от длины шага разбиения тяговой сети и дискретности значений переходного сопротивления, используемых для формирования базы данных $[M_j]$ [53]. Это обстоятельство, в совокупности с необходимостью применения численных методов для решения системы уравнений состояния нелинейной электрической системы, какой является тяговая сеть переменного тока [17], обусловливает главный недостаток рассмотренного способа, заключающийся в сложности и громоздкости расчетов при формировании матриц $[M_j]$, совокупность которых составляет базу расчетных данных о ПАР.

К числу дистанционных методов ОМП по ПАР, основанных на использовании сегментированных неоднородных моделей тяговой сети, также относятся двухсторонние способы ОМП в системах 25 кВ и 2×25 кВ, описанные в [56-58]. Для их реализации в момент КЗ на смежных ТП производится измерение комплексных значений токов в проводах тяговой сети и напряжений на шинах ТП. Далее с применением метода интегрирования телеграфных уравнений [57, 58] или посредством реализации вычислительного алгоритма, приведенного в [56], составляются графики зависимости модулей и углов напряжений на границах выделенных участков относительно обоих концов линии от расстояния до одной из ТП. Пример такого графика показан на рис. 7.



Рис. 7. ОМП с использованием графиков зависимости модулей напряжения от удаленности места КЗ

Fig. 7. FL using graphs of the dependence of voltage modules on the distance to the SC location

Место КЗ определяется как абсцисса точки пересечения кривых $U_i^{(L)}$ и $U_i^{(C)}$, построенных в одних осях [57]. Использование указанного критерия обеспечивает возможность однозначного ОМП в системах 25 кВ, однако он является недостаточным в случае системы 2×25 кВ ввиду многократного пересечения графиков $U_i^{(L)}$ и $U_i^{(L)}$. Для решения этой проблемы предусматривается введение дополнительного критерия по аргументу комплексного значения напряжения, и в этом случае место КЗ устанавливается как абсцисса точек пересечения графиков модулей и углов напряжений относительно шин смежных ТП [58]. Согласно результатам имитационных экспериментов, погрешность этих методов составляет около 3,3 % межподстанционной зоны [57].

Из [3, 47] известно, что при чисто активном характере переходного сопротивления в качестве критерия, указывающего на место КЗ на ЛЭП, может использоваться факт выполнения равенства:

$$Q_{\rm K} = {\rm Im}\left[\underline{U}_{\rm K}, \overline{I}_{\rm K}\right] = 0, \tag{6}$$

где $Q_{\kappa}, \underline{U}_{\kappa}, \overline{I}_{\kappa}$ – реактивная мощность, напряжение и сопряженный комплекс тока в месте КЗ.

Поскольку величина потерь реактивной мощности на активном переходном сопротивлении равна нулю, на основе уравнения баланса реактивной мощности, составленного для простейшей схемы тяговой сети (рис. 8), можно записать выражение:

$$Q_{\rm K} = \sum Q_{\rm TTI} - \sum \Delta Q_{\rm TC} = 0, \qquad (7)$$

где $\Sigma Q_{\text{TП}}$ – сумма реактивной мощности ТП; $\Sigma \Delta Q_{\text{TC}}$ – сумма потерь реактивной мощности на участках тяговой сети.



Рис. 8. Схема для ОМП методом контроля реактивной мощности: $\underline{I'}, \underline{I''}$ – токи со стороны смежных $T\Pi$

Fig. 8. Scheme for FL using reactive power control method: $\underline{I}', \underline{I}'' - currents from adjacent TS$

Таким образом, контроль реактивной мощности и использование критерия (6) позволяют в полной мере решить проблему исключения влияния активного переходного сопротивления в месте КЗ на точность ОМП при существенном упрощении алгоритмов для вычисления расстояния до КЗ [47]. Контроль реактивной мощности и использование критерия (7) положены в основу ряда дистанционных способов [59-61], подробно описанных и обоснованных в [47].

Метод [60] предполагает измерение комплексных значений токов поврежденной линии на обоих ее концах, а также напряжений на шинах смежных ТП. Алгоритм определения места КЗ на основании этих значений включает два этапа [47]:

- 1) расчет расстояния до места КЗ, исходя из вычисленного значения $\Sigma Q_{T\Pi}$ и удельного сопротивления условно однородной тяговой сети;
- определение реального значения удельного сопротивления тяговой сети с использованием неоднородной модели и уточнение расстояния до места КЗ методом последовательных приближений.

Способ [61], также изложенный в [60] и основанный на одностороннем измерении токов в фидерах поврежденной и исправной контактной сети и напряжения на шинах ПС двух- или многопутного участка, отличается от предыдущего следующими особенностями в части математического обеспечения ОМП [47]:

 – измеренное значение реактивной мощности КЗ на ТП в методе [61] заменяется рассчитанным при заданном расстоянии до места КЗ;

 – вычисление расстояния до места КЗ по аналитическим выражениям в методе [61] заменяется систематической проверкой выполнения условия (7) при изменяющемся заданном значении удаленности места КЗ от шин ПС.

Таким образом, последовательность операций при ОМП рассматриваемым методом описывается следующим алгоритмом [47, 61, 62]:

- систематическая проверка выполнения условия (7) для однородной сети при изменяющемся заданном расстоянии до места КЗ с шагом 1 км;
- исследование зоны, в которой изменяется знак разности (7), с шагом 0,2 км;
- систематическая проверка выполнения условия (7) для неоднородной сети при изменяющемся заданном расстоянии до места КЗ с шагом 0,1 км, начиная с точки, найденной по п. 2.

К числу специализированных методов ОМП тяговой сети системы 2×25 кВ относится способ [59], сущность которого заключается в выделении поврежденной зоны по измеренным минимальным напряжениям на шинах ТП и АТП и последующем вычислении расстояния до места КЗ с использованием критерия (7), который применительно к случаю КЗ на контактной сети может быть записан в виде [47]:

$$Q_{\rm K} = \sum Q_{\rm T\Pi} - \sum \Delta Q_{\rm TC} = \left(Q_{\rm ATK,i} + Q_{\rm ATK,j} + Q_{\rm AT\Pi,i}\right) - \left(\Delta Q_{\rm K} + \Delta Q_{\rm \Pi} + \Delta Q_{\rm P}\right) = 0, \quad (8)$$

где $Q_{\text{ATK},i}$, $Q_{\text{ATK},j}$ – реактивная мощность контактной сети на обоих концах выделенного участка; $Q_{\text{ATII},i}$ – реактивная мощность питающего провода; ΔQ_{K} , ΔQ_{Π} , ΔQ_{P} – потери реактивной мощности в контактной сети, питающем проводе и рельсах.

При КЗ на участке между ТП и ближайшим к ней АТП расстояние до места КЗ определяется с использованием неоднородной модели тяговой сети методом последовательных приближений в результате систематического вычисления коэффициента, учитывающего стекание тока в землю, и реактивной мощности в предполагаемой точке КЗ по (8). В случае КЗ в зоне, ограниченной двумя АТП, т.е. на расстоянии 8-15 км от ближайшей ТП, и при его отсутствии на указанном участке станций, используется однородная модель, а расстояние до места КЗ вычисляется по аналитическим выражениям, приведенным в [47] и описании к патенту [57]. Как отмечено в [47], преимущества рассмотренных выше методов ОМП, основанных на контроле реактивной мощности, состоят в повышении точности за счет исключения влияния активного переходного сопротивления в месте КЗ на результат ОМП, простоте применяемых алгоритмов расчета расстояния до места КЗ, минимизации количества вычислений с использованием детализированной модели за счет ввода этапа предварительной оценки удаленности места КЗ, и возможности отказа от жесткого требования синхронного измерения ПАР.

V. Выводы

В статье определено место средств дистанционного ОМП в структуре автоматизированной системы управления электроснабжением железных дорог и системы ОМКЗ тяговой сети. Установлено, что за период с начала 1960-х гг. было разработано большое количество дистанционных методов ОМП контактной сети, наиболее многочисленной группой среди которых являются методы, основанные на измерении и анализе ПАР.

Несмотря на многочисленные исследования на тему ОМП контактной сети, в существующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по выбору методов и устройств ОМП. В настоящее время наиболее приемлемым вариантом с точки зрения точности и быстроты выявления места КЗ является ОМП по ПАР, что обусловлено невозможностью применения импульсных методов в тяговой сети и нецелесообразностью внедрения технологии распределенного акустического зондирования только для решения задачи ОМП.

Известно большое количество методов ОМП контактной сети по ПАР, различающихся по составу набора контролируемых параметров, используемым алгоритмам для анализа ПАР и вычисления места КЗ, а также по используемым моделям тяговой сети. Согласно выводам теоретических исследований и опыту применения средств ОМП контактной сети, наибольшей эффективностью обладают методы, в основу которых положены детализированные модели СТЭ, применение которых существенно упрощается благодаря возможностям современных средств компьютерного моделирования. В части информационного обеспечения ОМП установлено, что определение расстояния до места КЗ с наибольшей точностью обеспечивается при измерении ПАР на ПС.

Главными современными тенденциями развития средств ОМП контактной сети являются внедрение расчетных моделей, приближенных к реальным условиям, выбор информационного обеспечения, позволяющего отказаться от сложных аналитических алгоритмов и исключающего влияние дестабилизирующих факторов на точность ОМП, и активное использование возможностей современной вычислительной техники на всех этапах решения задачи ОМП. В настоящее время сохраняется высокая актуальность задачи совершенствования средств дистанционного ОМП контактной сети, что связано с отсутствием известных дистанционных методов ОМП, точность которых не зависит от конфигурации СТЭ и влияния случайных факторов. В связи с этим, целесообразно продолжать работы по дальнейшему повышению точности ОМП контактной сети с использованием накопленного опыта разработки и эксплуатации известных средств ОМП.

> © Куликов А.Л., 2025 © Осокин В.Л., 2025 © Леваков Д.А., 2025

Поступила в редакцию 21.02.2025 Принята к публикации 02.05.2025 Received 21.02.2025 Accepted 02.05.2025

Библиографический список

- [1] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 1 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 16-35.
- [2] Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
- [3] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [4] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- [5] Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов. С-Пб.-М.-Краснодар: Лань, 2016. – 192 с.
- [6] Попова Н.А. О достоверности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог, Жарков Ю.И. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1995. – С. 118-123.
- [7] Попова Н.А. Повышение точности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог, Жарков Ю.И. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1995. – С. 123-128.
- [8] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление контура короткого замыкания // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 5 (41). С. 5-11.
- [9] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Определение параметров петли и места короткого замыкания в тяговой сети с экранирующим и

усиливающим проводами // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2. С. 10-13.

- [10] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Гаврилов И.В., Муратова-Милехина А.С. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчета параметров петли короткого замыкания // Электроснабжение и электрооборудование транспорта. 2015. № 4. С. 4-12.
- [11] Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
- [12] Фигурнов Е.П., Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока железных дорог // Электричество. 2021. № 11. С. 35-44. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-11-35-44
- [13] Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В., Крюков А.Е., Середкин Д.А., Фесак И.А. Моделирование трехфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. – 171 с.
- [14] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 160 с.
- [15] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ // Электричество. 2020. № 8. С. 29-36. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36
- [16] Корниенко В.В., Петров И.П., Петрова Т.Е. Вычисление параметров тяговой сети с ЭУП // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2001. № 2. С. 79-82.
- [17] Куликов А.Л., Леваков Д.А. Моделирование контактной сети железнодорожного транспорта для определения мест повреждений // Электричество. 2024. № 3. С. 45-58. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-45-58
- [18] Самсонов Ю.Я., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог переменного тока, Пат. 161410 SU, заявл. 16.07.62; опубл. 19.03.64. – Бюл. № 7.
- [19] Зимаков В.А., Корсаков Г.М. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог, Пат. 266055 SU, заявл. 07.05.66; опубл. 17.03.70. – Бюл. № 11.
- [20] Аксельрод Б.А., Корсаков Г.М., Овласюк В.Я., Сухопрудский Н.Д. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог, Пат. 377706 SU, заявл. 13.05.71; опубл. 17.04.73. – Бюл. № 18.
- [21] Курганов В.В., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания и телеизмерения уровней напряжения на фидерах контактной сети переменного тока, Пат. 369519 SU, заявл. 15.06.70; опубл. 08.02.73. – Бюл. № 18.
- [22] Фигурнов Е.П., Стороженко Д.Е. Современные методы определения удаленности повреждения контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2003. № 1. С. 48-53.

- [23] Дынькин Б.Е., Завражин В.В. Сравнительный анализ существующих методов определения повреждения тяговой сети // Межд. науч. конф. «Актуальные вопросы технических наук», Июль 20-23, 2011, Пермь, Россия: Меркурий, 2011. С. 53-56.
- [24] Бочев А.С., Тупченко М.Ю., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места повреждения тяговой сети с автотрансформаторами электрифицированной железной дороги, Пат. 1395532 SU, заявл. 10.06.86; опубл. 15.05.88. – Бюл. № 18.
- [25] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [26] Бочев А.С., Кузнецов В.В., Тупченко М.Ю., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места повреждения тяговой сети электрифицированной железной дороги, Пат. 740555 SU, заявл. 13.09.78; опубл. 15.06.80. – Бюл. № 22.
- [27] Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети, Пат. 158328 SU, заявл. 08.10.62; опубл. 19.10.63. – Бюл. № 21.
- [28] Зимаков В.А., Корсаков Г.М. Устройство для определения расстояния до места повреждения на контактной сети железных дорог переменного тока, Пат. 265277 SU, заявл. 12.05.66; опубл. 09.03.70. – Бюл. № 10.
- [29] Maenicke E. Circuit arrangement for determining the distance of fault locations in line short-circuits, Pat. 3735204 US, filed. 25.06.71; publ. 22.05.73.
- [30] ДИВГ.648228.082-14.01 РЭ1-ЛУ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ФКС-01. Руководство по эксплуатации. Ч. 2. С.-Пб.: ООО «НТЦ «Механотроника». – 82 с.
- [31] Триллер А.А., Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А. Способ определения места короткого замыкания на электрифицированной железнодорожной станции, Пат. 2636154 RU, заявл. 25.03.16; опубл. 21.11.17. – Бюл. № 33.
- [32] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
- [33] Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // The Bell System Technical Journal. 1926. № 5 (4). P. 539-554. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- [34] Фигурнов Е.П. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока // Электричество. 1997. № 5. С. 23-29.
- [35] Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. 279 с.
- [36] Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Петров И.П., Фигурнов Е.П. Указатель удаленности короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, Пат. 2160193 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 10.12.00.
- [37] Фигурнов Е.П., Петров И.П., Жарков Ю.И., Быкадоров А.Л. Определитель места повреждения контактной сети, Пат. 2160673 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 20.12.00.
- [38] Фигурнов Е.П., Петров И.П., Жарков Ю.И., Быкадоров А.Л. Определитель места повреждения тяговой сети, Пат. 2177417 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 27.12.01.
- [39] Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Петров И.П., Фигурнов Е.П. Устройство для определения удаленности места короткого замыкания в тяговой сети электрифицированного транспорта (варианты), Пат. 2181672 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 27.04.02.

- [40] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Стороженко Д.Е. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети переменного тока и устройство для его выполнения, Пат. 2189606 RU, заявл. 16.04.01; опубл. 20.09.02.
- [41] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Стороженко Д.Е. Определитель удаленности повреждения контактной сети (варианты), Пат. 2189607 RU, заявл. 16.04.01; опубл. 20.09.02.
- [42] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности места повреждения контактной сети (варианты), Пат. 2609727 RU, заявл. 24.09.15; опубл. 02.02.17. – Бюл. № 4.
- [43] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети (варианты), Пат. 2610826 RU, заявл. 22.09.15; опубл. 15.02.17. – Бюл. № 5.
- [44] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети электрического транспорта (варианты), Пат. 2619625 RU, заявл. 22.09.15; опубл. 17.05.17. – Бюл. № 14.
- [45] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения расстояния до места короткого замыкания контактной сети переменного тока (варианты), Пат. 2629734 RU, заявл. 22.09.15; опубл. 31.08.17. – Бюл. № 25.
- [46] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Фигурнов Е.П., Петров И.П., Попов А.Ю., Вязов Е.В. Способ определения удаленности короткого замыкания в контактной сети переменного тока многопутного участка (варианты), Пат. 2747112 RU, заявл. 23.10.20; опубл. 27.04.21. – Бюл. № 12.
- [47] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: Сам-ГУПС, 2024. – 186 с.
- [48] Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. – 64 с.
- [49] Субханвердиев К.С., Герман Л.А., Заруцкая Т.А. Учет переходного сопротивления в месте повреждения контактной сети по параметрам аварийного режима // Электричество. 2024. № 11. С. 51-57. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-11-51-57
- [50] Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 5-10.
- [51] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 19 (11-12). С. 12-20.
- [52] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (82). С. 119-128. DOI: 10.46973/0201-727X 2021 2 119
- [53] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Повышение эффективности определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 15-19.

- [54] Муратова-Милехина А.С., Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А. Способ определения места короткого замыкания контактной сети электрифицированного транспорта, Пат. 2566458 RU, заявл. 20.02.14; опубл. 27.10.2015. – Бюл. № 30.
- [55] Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Методы вторичной обработки и распознавания изображений. СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 215 с.
- [56] Тигунцев С.Г., Есаулов А.В. Способ определения места короткого замыкания в тяговой сети системы 2*25 кВ железной дороги, Пат. 2821157 RU, заявл. 21.03.24; опубл. 17.06.24. Бюл. № 17.
- [57] Есаулов А.В., Тигунцев С.Г. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 120-127.
- [58] Есаулов А.В., Тигунцев С.Г., Анненков Е.О. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ // Известия Транссиба. 2023. № 4 (56). С. 101-112.
- [59] Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Способ определения мест повреждения (ОМП) межподстанционной зоны тягового электроснабжения 2х25 кВ, Пат. 2788303 RU, заявл. 11.05.22; опубл. 17.01.23. – Бюл. № 2.
- [60] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л., Карпов И.П., Обалин М.Д. Способ определения места короткого замыкания неоднородной контактной сети однопутного участка электрифицированного транспорта с двухсторонним питанием, Пат. 2789434 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 02.02.23. – Бюл. № 4.
- [61] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л., Карпов И.П., Обалин М.Д. Способ определения места короткого замыкания контактной сети переменного тока 25 кВ, Пат. 2790576 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 27.02.23. – Бюл. № 6.
- [62] Куликов А.Л., Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Определение места короткого замыкания в контактной сети переменного тока по измерению реактивной мощности // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 31-34.

References

- A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, "Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 1", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 16-35, 2025.
- [2] E.P. Figurnov, *Releinaya zashchita [Relay protection]*. Moscow: State Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2009 (in Russian).
- [3] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, Opredelenie mesta korotkogo zamykaniya na vysokovoltnyh liniyah elektroperedachi [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [4] G.M. Shalyt, *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskih setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [5] N.V. Golubeva, Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov [Mathematical modeling of systems and processes]. St. Petersbur-Moscow-Krasnodar: Lan', 2016 (in Russian).
- [6] N.A. Popova, "O dostovernosti opredeleniya rasstoyaniya do korotkogo zamykaniya v tyagovoi seti peremennogo toka [On the reliability of determining the distance to a

short circuit in an alternating current traction network]", in Avtomatizirovannye sistemy elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Automated power supply systems for railways], Yu.I. Zharkov, Rostov-on-Don: RGUPS, 1995, pp. 118-123 (in Russian).

- [7] N.A. Popova, "Povyshenie tochnosti opredeleniya rasstoyaniya do korotkogo zamykaniya v tyagovoi seti peremennogo toka [Improving the accuracy of determining the distance to a short circuit in an AC traction network]", in Avtomatizirovannye sistemy elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Automated power supply systems for railways], Yu.I. Zharkov, Rostov-on-Don: RGUPS, 1995, pp. 123-128, (in Russian).
- [8] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Interaction between a.c. traction network parameters and short circuit loop impedance", *Vestnik transporta Povolzhya*, vol. 5, no. 41, pp. 5-11, 2013.
- [9] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Determination loop parameters and fault location in traction network with the screening and enhances wires", *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya Scientific Journal*, no. 2, pp.10-13, 2015.
- [10] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, I.V. Gavrilov and A.S. Muratova-Milekhina, "Detail structures traction AC networks for modeling and dimensioning of short-circuit loop", *Electronics and electrical equipment of transport*, no. 4, pp. 4-12, 2015.
- [11] G.M. Shalyt, A.I. Aisenfel'd and A.S. Malyi, Opredelenie mest povrezhdenii linii elektroperedachi po parametram avariinogo rezhima [Determination of locations of power transmission line damages based on emergency mode parameters]. Moscow: Energoatomizdat, 1983 (in Russian).
- [12] E.P. Figurnov, A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, L.A. German and K.S. Subkhanverdiev, "Impedances of a single-phase AC railroad electric traction network", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 35-44, 2021. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-11-35-44
- [13] A.V. Kryukov, V.P. Zakaryukin, A.V. Cherepanov, A.E. Kryukov, D.A. Seredkin and I.A. Fesak, *Modeling of three-phase traction power supply systems of AC railways*. Ekaterinburg: UrGUPS, 2023.
- [14] V.P. Zakaryukin and V.P. Kryukov, Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznyh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems of AC railways]. Irkutsk: IrGUPS, 2010 (in Russian).
- [15] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and N.A. Popova, "Equivalent circuits of the 27.5 kV electric railway external power supply system", *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 29-36, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36
- [16] V.V. Kornienko, I.P. Petrov and T.E. Petrova, "Vychislenie parametrov tyagovoi seti s EUP [Calculation of traction network parameters with SFW]", *Vestnik Rostovskogo* gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya, no. 2, pp. 79-82, 2001 (in Russian).
- [17] A.L. Kulikov and D.A. Levakov, "Modeling the railway contact line system for fault location purposes", *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 45-58, 2024. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-45-58
- [18] E.P. Figurnov and Yu.Ya. Samsonov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya v kontaktnoi seti zheleznyh dorog peremennogo toka [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of alternating current railways]", Patent SU 161410, Mar. 19, 1964 (in Russian).

- [19] V.A. Zimakov and G.M. Korsakov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania v kontaktnoi seti zheleznyh dorog [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of railways]", Patent SU 266055, Mar. 17, 1970 (in Russian).
- [20] B.A. Aksel'rod, G.M. Korsakov, V.Ya. Ovlayuk and N.D. Sukhoprudskiy, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania v kontaktnoi seti zheleznyh dorog [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of railways]", Patent SU 377706, Apr. 17, 1973 (in Russian).
- [21] V.V. Kurganov and E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania i teleizmereniya urovnei napryazheniya na fiderah kontaktnoi seti peremennogo toka [Device for determining the location of a short circuit and telemetry of voltage levels on feeders of an AC contact network]", Patent SU 369519, Feb. 8, 1973 (in Russian).
- [22] E.P. Figurnov and D.E. Storozhenko, "Sovremennie metody opredeleniya udalyonnosti povrezhdeniya kontaktnoi seti [Modern methods for determining the distance of damage to the contact network]", Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya, no. 1, pp. 48-53, 2003 (in Russian).
- [23] B.E. Dyn'kin and V.V. Zavrazhin, "Sravnitel'nii analiz sushchestvuyushchih metodov opredeleniya povrezhdeniya tyagovoi seti [Comparative analysis of existing methods for determining fault to the traction network]", in proc. *Int. scientific conf. Aktual'nie voprosy tehnicheskih nauk [Current issues in technical sciences]*, July 20-23, 2011, Perm, Russia, pp. 53-56 (in Russian).
- [24] A.S. Bochev, M.Yu. Tupchenko and E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya tyagovoi seti s avtotransformatorami elektrifitsirovannoi zheleznoi dorogi [Device for determining the location of damage to the traction network with autotransformers of an electrified railway]", Patent SU 1395532, May 15, 1988 (in Russian).
- [25] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog [Power supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [26] A.S. Bochev, V.V. Kuznetsov, M.Yu. Tupchenko and E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya tyagovoi seti elektrifitsirovannoi zheleznoi dorogi [Device for determining the location of damage to the traction network of an electrified railway]", Patent SU 740555, Jun. 15, 1980 (in Russian).
- [27] E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya v kontaktnoi seti [Device for determining the location of a short circuit in a contact network]", Patent SU 158328, Oct. 19, 1963 (in Russian).
- [28] V.A. Zimakov and G.M. Korsakov, "Ustroistvo dlya opredeleniya rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya na kontaktnoi seti zheleznyh dorog peremennogo toka [Device for determining the distance to the fault location on the contact network of AC railways]", Patent SU 265277, Mar. 09, 1970 (in Russian).
- [29] E. Maenicke, "Circuit arrangement for determining the distance of fault locations in line short-circuits", Patent US 3735204, May 22, 1973.
- [30] Microprocessor relay protection unit BMRZ-FKS-01. User manual. Pt. 2, ДИВГ.648228.082-14.01 РЭ1-ЛУ.
- [31] A.A. Triller, A.L. Bykadorov and T.A. Zarutskaya, "*Method of determination of short circuit place at electrified railway station*", Patent RU 2636154, Nov. 21, 2017.

- [32] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Power supply for railways]*. Ekaterinburg: Publishing house UrGUPS, 2014 (in Russian).
- [33] J.R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return", *The Bell System Technical Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 539-554, Oct. 1926. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- [34] E.P. Figurnov, "Soprotivleniya elektrotyagovoi seti odnofaznogo peremennogo toka [Resistances of single-phase alternating current electric traction network]", *Elektrich-estvo*, no. 5, pp. 23-29, 1997 (in Russian).
- [35] R.N. Karyakin, *Tyagovie seti peremennogo toka [AC current traction networks]*. Moscow: Transport, 1987 (in Russian).
- [36] A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, I.P. Petrov and E.P. Figurnov, "AC traction power system short-circuit fault distance indicator", Patent RU 2160193, Dec. 10, 2000.
- [37] E.P. Figurnov, I.P. Petrov, Yu.I. Zharkov and A.L. Bykadorov, "Contact system fault detector", Patent RU 2160673, Dec. 20, 2000.
- [38] E.P. Figurnov, I.P. Petrov, Yu.I. Zharkov and A.L. Bykadorov, "Traction system fault detector", Patent RU 2177417, Dec. 27, 2001.
- [39] A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, I.P. Petrov and E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya udalyonnosti mesta korotkogo zamykaniya v tyagovoi seti elektrifitsirovannogo transporta (varianty) [Ground fault detector in traction network of electrified transport (alternatives)]", Patent RU 2181672, Apr. 27, 2002 (in Russian).
- [40] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and D.E. Storozhenko, "Procedure determining distance to short-circuit point in AC contact network and device for its realization", Patent RU 2189606, Sep. 20, 2002.
- [41] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and D.E. Storozhenko, "Device determining distance to faulty point in traction network (versions)", Patent RU 2189607, Sep. 20, 2002.
- [42] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalyonnosti mesta povrezhdeniya kontaktnoi seti (varianty) [Method of determining distance to catenary system failure point (versions)]", Patent RU 2609727, Feb. 2, 2017 (in Russian).
- [43] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalyonnosti korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti (varianty) [Method of determining remote of short electrical circuit (versions)]", Patent RU 2610826, Feb. 15, 2017 (in Russian).
- [44] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalyonnosti korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti elektricheskogo transporta (varianty) [Method of determining remoteness of short circuit in contact network of electric transport (versions)]", Patent RU 2619625, May 17, 2017 (in Russian).
- [45] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Method for determining distance to short circuit point of AC contact network (versions)", Patent RU 2629734, Aug. 31, 2017.
- [46] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, E.P. Figurnod, I.P. Petrov, A.Yu. Popov and E.V. Vyazov, "Method for determining the distance of a short circuit in the AC contact network of a multipath section (options)", Patent RU 2747112, Apr. 27, 2021.
- [47] L.A. German, Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoi sposobnosti zheleznyh dorog [Improving AC traction

power supply to increase railway capacity]. N. Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).

- [48] M.A. Shabad, *Transformatory toka v shemah releinoi zashchity [Current transformers in relay protection schemes]*. Moscow: Energoprogress, 1998 (in Russian).
- [49] K.S. Subkhanverdiev, L.A. German and T.A. Zarutskaya, "Uchyot perehodnogo soprotivleniya v meste povrezhdeniya kontaktnoi seti po parametram avariynogo rezhyma [Consideration of the transient resistance at the contact system fault location based of the emergency mode parameters]", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 51-57, 2024 (in Russian).
- [50] L.A. German, K.V. Kishkurno and K.S. Subkhanverdiev, "Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in ac tractive circuit", *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and electrical equipment of transport]*, no. 1, pp. 5-10, 2017 (in Russian).
- [51] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and E.A. Alekseenko, "Analysis of applicability of external network simplified models for definition of short circuit currents in systems of railroad traction power supply", *Izvestiya vyshih uchebnyh zavedenii [News of higher educational institutions]*, vol. 19, no. 11-12, pp. 12-20, 2017 (in Russian).
- [52] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Application of pattern recognition theory in determining the location of a short circuits in AC traction networks", *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*, vol 2, no. 82, pp. 119-128, 2021. DOI: 10.46973/0201-727X 2021 2 119
- [53] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Povyshenie effectivnosty opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya v tyagovyh setyah peremennogo toka na osnove informatsionnyh tehnologii [Improving the efficiency of short circuit location in AC traction networks based of information technologies]", Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Volga Region transport], vol. 6, no. 54, pp. 15-19, 2015 (in Russian).
- [54] A.S. Muratova-Milekhina, A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, "Method of determination of short circuit place in catenary system of electrified transport", Patent RU 2566458, Oct. 27, 2015.
- [55] A.A. Tropchenko, and A.Yu. Tropchenko, Metody vtorichnoi obrabotki i raspoznavaniya izobrazhenii [Methods of secondary image processing and recognition]. St. Petersburg: Universitet ITMO, 2015 (in Russian).
- [56] S.G. Tiguntsev and A.V. Esaulov, "Method of determining short circuit point in traction network of system 2*25 kV of railway", Patent RU 2821157, Jun. 17, 2024.
- [57] A.V. Esaulov and S.G. Tiguntsev, "Determination of the fault location in 25 kV railway power supply system", *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 2, no. 54, pp. 120-127, 2023.
- [58] A.V. Esaulov, S.G. Tiguntsev and E.O. Annenkov, "Determination of the fault location in 2×25 kV railway power supply system", *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 4, no. 56, pp. 101-112, 2023.
- [59] L.A. German and K.S. Subkhanverdiev, "Method for fault location (FL) of the intersubstation zone of traction power supply 2×25 kV", Patent RU 2788303, Jan. 17, 2023.
- [60] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, A.L. Kulikov, I.P. Karpov and M.D. Obalin, "Method for determining the location of a short circuit of an inhomogeneous contact

networkof a single-tracksection of electrified transport with two-way power supply", Patent RU 2789434, Feb. 02, 2023.

- [61] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, A.L. Kulikov, I.P. Karpov and M.D. Obalin, "Method for determining the location of a short circuit in the AC contact network of a 25 kV system", Patent RU 2790576, Feb. 27, 2023.
- [62] A.L. Kulikov, L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, "Opredelenie mesta korotkogo zamykaniya v kontaktnoi seti po izmereniyu reaktivnoi moshchnosti [Determining the location of a short circuit in an AC contact network by measuring reactive power]", *Nauka i obrazovanie transportu [Science and education for transport]*, no. 2, pp. 31-34, 2021 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация.

Леваков Дмитрий Андреевич, аспирант Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация. Alexander L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Vladimir L. Osokin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

Dmitriy A. Levakov, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation. УДК 621.316.13:621.3.016.3

EDN GVYJCK

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЕ

А.А. Лоскутов

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov_aa@nntu.ru

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

С.А. Жаренков

ORCID: 0009-0000-5166-6580 е-mail: sema.661@mail.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

А.С. Симанов

ORCID: 0009-0000-2710-7674 e-mail: simadex@yandex.ru

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

Современные автономные гибридные электроэнергетические комплексы, основанные на возобновляемых энергоресурсах (ветер, солнце), составляют основу интенсивно развивающейся распределенной генерации. Для таких микроэнергосистем характерна неравномерность выработки электроэнергии из-за влияния внешних факторов (скорость ветра, сила солнечного излучения). Для обеспечения системного баланса производства и потребления электрической энергии, эффективности управления мощностью, экономии энергии, снижения издержек производства, оптимизации тарифной политики важно прогнозирование потребления электроэнергии и моделирование графиков изменения нагрузки. Прогнозные данные способствуют повышению экономических и социальных показателей микроэнергосистемы, обеспечив более надежное и бесперебойное энергоснабжение потребителей. В статье рассмотрен один из наиболее распространенных и эффективных методов прогнозирования электрической нагрузки с учетом различных факторов (время суток, дни недели и праздники) - нейронная сеть с обратным распространением ошибки, обучающаяся на исторических данных. В ходе исследования был использован программный комплекс Matlab, включающий возможности визуализации данных, моделирования и работы с нейронными сетями. Произведена оценка эффективности различных видов прогнозов электрической нагрузки.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, микроэнергосистема, прогнозирование графика нагрузки, электропотребление, электроснабжение, *Matlab*.

Для цитирования: Лоскутов А.А., Жаренков С.А., Симанов А.С. Краткосрочное прогнозирование графика электрической нагрузки в микроэнергосистеме // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 34-55. EDN GVYJCK

SHORT-TERM FORECASTING OF ELECTRIC LOAD SCHEDULE IN MICROGRID

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

S.A. Zharenkov

ORCID: 0009-0000-5166-6580 e-mail: sema.661@mail.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Simanov

ORCID: 0009-0000-2710-7674 e-mail: simadex@yandex.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Modern autonomous hybrid power complexes based on renewable energy resources (wind, solar) form the basis of intensively developing distributed generation. Such micro-power systems are characterized by uneven power generation due to the influence of external factors (wind speed, solar radiation strength). To ensure a system balance of electricity production and consumption, efficiency of capacity management, energy saving, reduction of production costs, and optimization of tariff policy, it is important to forecast electricity consumption and model load change schedules. Forecast data contribute to improving the economic and social performance of the microgrid, providing a more reliable and uninterrupted power supply to consumers. The article considers one of the most common and effective methods of forecasting electric load taking into account various factors (weather, time of day, days of the week and holidays) – a neural network with back propagation of error trained on historical data. Matlab software package was used during the research, which includes data visualization, modeling and neural network capabilities. The efficiency of different types of electric load forecasts was evaluated.

Keywords: artificial neural network, load schedule forecasting, Matlab, microgrid, power consumption, power supply.

For citation: A.A. Loskutov, S.A. Zharenkov and A.S. Simanov, "Short-term forecasting of electric load schedule in microgrid", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 34-55, 2024. EDN GVYJCK

І. Введение

Прогнозирование потребления электроэнергии и моделирование суточного графика нагрузки играют важную роль для электроснабжения потребителей в микроэнергосистемах с объектами распределенной генерации, а повышение точности прогнозов нагрузки не только позволяет более эффективно управлять мощностью, но также способствует экономии энергии и снижению издержек производства [1-4]. Эти улучшения, в свою очередь, могут значительно повысить как экономические, так и социальные показатели энергосистемы, обеспечив более надежное и бесперебойное энергоснабжение потребителей.

Искусственные нейронные сети являются мощным инструментом для моделирования нелинейных зависимостей с высокой точностью [5-8]. Они способны адаптироваться к большому объему неструктурированных данных и извлекать полезную информацию методом самообучения. Это делает их эффективным инструментом для прогнозирования электрической нагрузки с учетом различных влияющих факторов. В частности, нейронные сети могут учитывать погодные условия, время суток, дни недели, праздники и другие переменные, влияющие на потребление электроэнергии. Такой подход позволяет получать более точные прогнозы нагрузки по сравнению с традиционными статистическими методами. Это, в свою очередь, имеет важное значение для оптимизации процессов в энергосистемах.

С ускоренным развитием возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые электростанции, актуальность точных прогнозов электрической нагрузки возрастает, особенно в контексте микроэнергосистем. Это связано с нестабильностью генерации электроэнергии из-за переменчивости первичных источников энергии – солнца и ветра. Надежные прогнозы нагрузки играют ключевую роль в оптимизации процессов в таких энергосистемах [9-12].

Для исследования прогнозирования электропотребления в микроэнергосистеме использован инструментарий программного комплекса *Matlab* с встроенной функцией *Neural Network Training (nntraintool)*, включающий возможности визуализации данных, моделирования и работы с нейронными сетями, что позволило оценить ее эффективность для различных видов прогнозов электрической нагрузки [1].

II. Сравнение различных методов прогнозирования

Методы прогнозирования нагрузки делятся на три категории: традиционные, модифицированные и основанные на мягких вычислениях [13].

Традиционные методы прогнозирования.

1. Подход «похожий день» [14] идентифицирует исторические дни с аналогичными характеристиками (погода, день недели) для прогнозируемого дня. Прогноз нагрузки осуществляется путем линейной комбинации
или регрессионного анализа этих похожих дней. Анализ тенденций предыдущих лет также используется для прогнозирования.

2. Методы регрессии устанавливают математические зависимости между электрической нагрузкой и влияющими параметрами (погода, праздничные дни, температура, влажность, тип потребителя). Различные регрессионные модели описаны в литературе [15].

3. Экспоненциальное сглаживание, широко применяемое благодаря своей надежности и точности, использует предыдущие данные для прогнозирования будущей нагрузки. В [16] разработана модель экспоненциального сглаживания для почасового прогноза нагрузки на интервале в одну неделю вместо отдельной модели для будних и выходных дней.

Модифицированные методы прогнозирования.

1. Адаптивное прогнозирование нагрузки. Параметры модели прогнозирования нагрузки автоматически корректируются в зависимости от меняющихся погодных условий, что делает ее адаптивной. Литература содержит множество моделей, основанных на адаптивном прогнозировании спроса [17].

2. Машины опорных векторов (SVM) – это самый мощный и новейший метод решения задач классификации и регрессии. Этот подход был представлен статистической теорией обучения Вапника. SVM преобразует входное пространство в многомерное пространство признаков посредством нелинейного отображения, а затем решает задачу линейной разделимой классификации в этом пространственном признаке. Предлагается ряд моделей на основе SVM [18].

Методы прогнозирования на основе мягких вычислений.

Появление методов искусственного интеллекта привело к появлению концепции прогнозирования нагрузки на основе мягких вычислений. Для прогнозирования электрической нагрузки предложены нечеткая логика, экспертные системы и нейронные сети.

1. Нечеткая логика не требует математического выражения входных и выходных данных. В прогнозе нечеткой логики данные прошлой нагрузки используются для обучения входных данных, а выходной шаблон генерируется после дефаззификации. Применения нечеткой логики для прогнозирования электрической нагрузки описаны в [19].

2. Искусственные нейронные сети (ИНС) применяются для прогнозирования электрических нагрузок с 1992 г. [20]. ИНС имеют линейную или нелинейную математическую функцию между входной и выходной переменной. Они обычно состоят из взаимосвязанных слоев, а временная обратная связь используется для повышения точности модели.

3. Экспертные системы, основанные на знаниях, заменяют правила и процедуры, используемые людьми-экспертами, программным обеспече-

нием в конкретной области для прогнозирования нагрузки. Экспертная система была введена в 1960-х гг. Это методы, основанные на правилах, в которых правила разрабатываются экспертами людьми. Этот подход был впервые разработан Рахманом и Бхатнагаром.

Модели на основе ИНС является наиболее популярным и перспективным для прогнозирования нагрузки из-за его адаптируемого характера и контролируемого метода обучения по набору данных. Недостаток состоит в том, что он не может определить математическое выражение между зависимыми и независимыми переменными. Модель ИНС имеет лучшую точность по сравнению с традиционными методами прогнозирования.

III. Прогнозирование потребления электрической энергии методом ИНС

Обучение искусственной нейронной сети

Обратная передача ошибки относится к методам обучения с учителем, что на практике означает необходимость наличия целевых значений в обучающих наборах данных. Данный подход является одним из самых популярных. Суть метода заключается в реализации двух этапов:

1) прямой этап – выходные сигналы движутся вперед, в результате получаем выходной сигнал, на основе которого затем считается величина ошибки;

2) обратный этап – обратная передача ошибки: величина ошибки движется назад, в результате происходит корректировка весовых коэффициентов связей сети [2].

Многослойный перцептрон (МП) является примером ИНС, которая активно применяется при решении различных задач, включая обнаружение и классификацию образов. Он представляет собой развитие идеи однослойного перцептрона и успешно преодолевает его ограничения (рис. 1).

Скрытые нейроны играют значительную роль в работе многослойного перцептрона, осуществляя нелинейное преобразование входных данных в новое пространство.

Особенностью МП является отсутствие доступа к ошибке на выходе скрытых нейронов, что представляет основную трудность. Разработка эффективного алгоритма обучения, способного настраивать веса синапсов со скрытыми нейронами, является важным аспектом. Эта проблема эффективно решается с использованием алгоритма обратного распространения ошибки, который обеспечивает эффективный метод обучения для многослойного перцептрона.



Рис. 1. Иллюстрация многослойного перцептрона

Fig. 1. Illust	ration of a	multilayer	perceptron
----------------	-------------	------------	------------

Алгоритм обратного распространения ошибки

Алгоритм можно обобщить в виде следующих шагов (напомним, что необходимо предварительно определить топологию сети):

- начальная установка, когда синаптические веса выбираются случайным образом;
- использование обучающей выборки данных, прямое распространение обучающего набора и вычисление ошибки на выходе сети;
- обратное распространение ошибки от выходного слоя к первому, с получением локального градиента для каждого нейрона;
- обновление всех весов с использованием формулы коррекции ошибки:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ij}(n)} = \eta \delta_j^J(n) \times V_i^J(n), \qquad (1)$$

где η – скорость обучения; $\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ij}(n)}$ – градиент функции стоимости E(n) с

учетом синаптического веса $w_{ij}(n)$.

5) повторение процесса с шага 2 до достижения требуемого качества.

Представленный выше алгоритм описывает обновление весов от выборки к выборке, но нейронная сеть может использовать алгоритм пакетного обучения. При пакетном обучении все обучающие выборки распространяются вперед, а затем вычисляется средняя квадратичная ошибка по всем обучающим выборкам. Затем эта ошибка распространяется назад и используется для обновления весов для определенного периода обучения. Таким образом, с помощью алгоритма пакетного обучения веса обновляются от периода к периоду. Прямое и обратное распространение через сеть во время работы алгоритма показано на рис. 2.



Рис. 2. Модель нейронной сети с обратным распространением Fig. 2. Neural network model with back propagation

Алгоритм обратного распространения является управляемым методом обучения, который передает ошибки выхода обратно на скрытые нейроны, позволяя регулировать веса во всей многослойной нейронной сети с фиксированной архитектурой, с целью минимизации соответствующей функции стоимости. Для передачи ошибок на скрытые нейроны применяется градиентный метод, что требует дифференцируемости функций активации нейронов.

Чтобы обеспечить дифференцируемость, часто используют семейство непрерывных функций, приближающих ступенчатую функцию. Одним из популярных представителей таких функций является семейство сигмоидных функций. Примером сигмоидной функции является логистическая функция (рис. 3).

Логистическая функция имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{\alpha x}},\tag{2}$$



Рис. 3. Функция гиперболического тангенса Fig. 3. Hyperbolic tangent function

Она хорошо подходит для роли функции активации благодаря своим свойствам:

1) принимает значения от 0 до 1, что удобно для интерпретации как вероятности;

2) дифференцируема, что важно для алгоритма обратной передачи ошибки;
 3) монотонно возрастает, обеспечивая желательную нелинейность между слоями.

Использование логистической функции позволяет эффективно настраивать веса сети с помощью алгоритма обратной передачи ошибки и достигать хороших результатов при решении различных задач классификации и прогнозирования [6].

Настраиваемые параметры ИНС

1. Количество нейронов в каждом сетевом слое.

Количество узлов на входе и выходе тесно связано с набором данных.

Экспериментальным путем было выявлено оптимальное число элементов на входе, равное 24 и соответствующее количеству часов в сутках, а на выходе – 1, дающее прогноз на каждый час.

На практике можно определить количество нейронов в скрытом слое с помощью следующей эмпирической формулы:

$$i = \sqrt{(n+m) + a},\tag{3}$$

где i – это количество нейронов в скрытом слое, n – количество нейронов входного слоя, m – количество нейронов в выходном слое, a – постоянная величина и она находится в пределах $1 \le a \le 10$.

Подобный подход позволяет получить приблизительное, но достаточное для большинства задач количество нейронов в промежуточном скрытом слое нейронной сети.

2. Настройка весов между скрытым слоем Ј и выходным слоем Р.

В алгоритме обратного распространения регулирования и выход весов относятся к частному дифференциалу, который выражается следующей формулой [2]:

$$\frac{fE(n)}{fw_{ii}(n)} = e_{kp}(n) \times f(u_p^p(n)) \times v_j^J(n),$$
(4)

Локальный градиент определяется как:

$$\delta_{p}^{p}(n) = -\frac{fE(n)}{fu_{p}^{p}(n)} = e_{kp}(n) \times f(u_{p}^{pi}(n)),$$
(5)

Значение итерации $w_{jp}(n)$ между скрытым слоем *J* и выходным слоем *P* рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{ip}(n+1) = w_{ip}(n) + \Delta w_{ip}(n), \tag{6}$$

3. Настройка весов между скрытым слоем І и скрытым слоем Ј.

Подобно вышеизложенному, регулирования весов между скрытым слоем *I* и скрытым слоем *J* также осуществляется с помощью движения вдоль градиента (градиентный спуск). Значение этого регулирования равно следующей формуле:

$$\Delta w_{jp}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j^J(n) \times V_i^J(n), \tag{7}$$

Локальный градиент определяется как:

$$\delta_{j}^{J}(n) = -\frac{fE(n)}{fu_{j}^{J}(n)} = -\frac{fE(n)}{fV_{j}^{J}(n)} \times \frac{fV_{j}^{J}(n)}{fu_{j}^{J}(n)} = \frac{fE(n)}{fV_{j}^{J}(n)} \times f(u_{j}^{J}(n)),$$
(8)

Значение итерации между скрытым слоем *I* и скрытым слоем *P* рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n),$$
(9)

$$\Delta w_{mi}(n) = \eta \delta_i^I(n) \times x_{km}(n), \qquad (10)$$

Локальный градиент определяется [1]:

$$\delta_{i}^{I}(n) = f(u_{i}^{Ii}(n)) \times a_{j=1}^{\circ J} \delta_{j}^{J}(n) w_{in}(n).$$
(11)

Использование инструментария Matlab для обучения ИНС с алгоритмом обратного распространения ошибки

На рис. 4 изображено интерфейсное меню *Neural Network Training*, а также диаграмма нейронной сети с внутренними слоями. Значение отображаемых параметров обучения представлено в табл. 1.

Конфигурация ИНС содержит два скрытых слоя, в первом из которых 48 нейронов, а во втором 24 нейрона, что было определено методом эмпирической оптимизации путем тестирования различных вариантов архитектуры ИНС с целью достижения наилучших результатов обучения и для обеспечения баланса между вычислительной сложностью модели и качеством регрессии.



Рис. 4. Интерфейсное меню Neural Network Training

Fig. 4. Neural Network Training interface menu

Таблица 1. Значения отображаемых параметров в Neural Network Training *Table 1.*

Values of displayed parameters in Neural Network Training

N⁰	Параметр	Значение		
1	Epoch	количество итераций		
2	Elapsed time	пройденное время обучения		
3	Perfomance	величина ошибки обучения		
4	Gradient	отвечает за корректировку весов связей между нейронами		
5	Ми	отвечает за скорость обучения ИНС		
6	Validation	отвечают за контроль переобучения и оценку генерализа-		
	Cheks	ции модели		
7	Data Division	метод тренировки ИНС		
8	Calculations	отвечает за обратное распространение ошибки		

Подготовка и обработка экспериментальных данных для обучения

Количество узлов на входе, выходе и в скрытом слое нейронной сети зависит от сложности объекта, который необходимо описать моделью. В рамках данной исследовательской задачи для тестовой выборки данных можно использовать модель потребления электроэнергии, построенную в среде *Matlab*, либо воспользоваться уже существующей базой статистических данных о потреблении в микроэнергосистеме. Это позволит обеспечить необходимый объем информации для обучения и тестирования нейронной сети, а также оценки качества построенной модели прогнозирования электрической нагрузки.

Исходные данные потребления активной мощности (*P*, кВт) в микроэнергосистеме за выбранные дни недели (например, понедельники одного месяца) с характерным и схожим режимом потребления представлены в табл. 2. В *Matlab*, исходные данные представляются в виде *Excel*-таблицы, содержащей данные за предыдущие 7 дней (H1-H7), чтобы обеспечить удобство для дальнейшей обработки и анализа. Объем полученной таким образом обучающей выборки равен 168 значений.

Задачей исследования является прогнозирование потребления на восьмой характерный день (H0), (на следующий понедельник) и валидация полученных результатов с данными реального потребления за этот день, отраженными в табл. 2.

Исходные данные были взяты с модели микроэнергосистемы с объектом распределенной генерации одного из промышленных предприятий.

Таблица 2.

Исходные данные, почасовая нагрузка за пять характерных дней

Table 2.

Initial data, hourly load for four typical days

	H7	H6	H5	H4	H3	H2	H1	H0
							Данные	
	Ланные для обучения и тестирования						реальной	
		, ,			•			нагрузки
Время, ч				F	, кВт			• •
0:00	206,2	213,4	191,6	178,1	182,3	186,0	176,9	206,2
1:00	203,3	208,8	186,9	174,3	179,3	180,3	171,7	203,3
2:00	197,4	208,1	185,3	169,8	177,0	181,3	170,7	197,4
3:00	197,7	206,1	185,5	175,7	176,6	179,2	171,8	197,7
4:00	201,6	207,5	189,1	178,8	178,5	177,4	173,5	201,6
5:00	209,3	216,6	193,9	188,2	185,5	188,6	178,1	209,3
6:00	223,2	232,7	208,1	200,3	200,7	203,5	194,0	223,2
7:00	236,0	248,8	224,3	214,8	217,6	222,0	207,9	236,0
8:00	251,8	263,8	238,6	231,6	231,9	239,6	223,4	251,8
9:00	257,3	272,1	243,1	237,7	229,1	246,1	229,5	257,3
10:00	256,2	272,5	240,9	239,3	233,9	244,5	229,0	256,2
11:00	251,4	261,3	235,1	234,3	232,9	241,2	227,3	251,4
12:00	255,3	248,2	234,4	234,7	229,9	238,7	228,0	255,3
13:00	256,5	247,0	235,1	234,5	231,8	234,7	228,7	256,5
14:00	258,3	241,7	233,7	231,4	231,7	236,9	226,7	258,3
15:00	255,1	233,7	229,7	227,1	225,4	231,7	223,3	255,1
16:00	251,2	235,7	222,8	222,1	219,5	223,1	215,0	251,2
17:00	253,0	244,0	222,1	219,0	220,5	219,4	212,3	253,0
18:00	248,9	242,3	225,1	227,9	223,4	222,1	208,5	248,9
19:00	244,6	237,9	230,1	221,6	226,3	228,1	215,5	244,6
20:00	240,8	233,5	227,4	220,2	223,3	226,0	214,0	240,8
21:00	236,5	230,1	221,6	216,2	217,0	222,8	208,4	236,5
22:00	227,6	220,0	211,7	206,1	205,4	210,6	197,9	227,6
23:00	218,5	213,9	199,1	192,7	196,9	201,4	187,5	218,5

В программном виде *Matlab*-модель запуска процесса обучения имеет вид фрагмента *m*-файла. Исходный код на модель обучения и прогнозирования содержится в репозитории [21]. Диаграмма обучения нейронной сети представлена на рис. 6. Здесь *Train* – тренировочный процесс; *Best* – наименьшая ошибка; *Goal* – искомое значение ошибки.

Процесс обучения ИНС

Процесс обучения ИНС представлен в виде блок схемы, изображенной на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема процесса обучения ИНС Fig. 5. Flowchart of the ANN training process



Рис. 6. Обучающая диаграмма нейронной сети Fig. 6. Neural network training diagram

На диаграмме видно, что среднеквадратичная ошибка снижается после 100 итераций, производительность нейронной сети стремится к искомой величине ошибки обучения, но останавливается по причине достижения значения других параметров.

IV. Методы прогнозирования на основе регрессии и средних нагрузок

Регрессионные методы часто применяются для решения задач прогнозирования, так как они позволяют учитывать многочисленные внешние факторы, влияющие на целевую переменную. Предсказание в модели множественной линейной регрессии формализуется математической формулой, основанной на линейной зависимости между целевой переменной и объясняющими переменными.

$$y_{t} = \beta_{0} + \beta_{1} x_{1,t} + \dots + \beta_{m} x_{m,t}, \qquad (12)$$

где y_t – спрогнозированное значение зависимой переменной в момент времени t, $x_{1,t}$, $x_{2,t}$, ..., $x_{m,t}$ – m независимых переменных, а $\beta = \{\beta_0, \beta_1, ..., \beta_m\}$ вектор из m+1 параметров, получаемых на этапе обучения с помощью метода наименьших квадратов.

Метод средних нагрузок считается по формуле:

$$y_t = \frac{\sum_{n=1}^{n} x_n}{n},$$
(13)

где x_n – энергопотребление в течение аналогичных временных интервалов в предшествующем периоде нагрузки.

VI. Анализ результатов исследования

Первые 24 значения из табл. 2 за H1 использовались как исходные данные для последовательного вычисления остальных, рекуррентным алгоритмом, основанным на 24 предыдущих значениях.

Степень схожести прогнозного и реального графиков, можно оценить коэффициентом корреляции:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - x_{\text{средн}})(y_i - y_{\text{средн}})}{\sqrt{\sum (x_i - x_{\text{средн}})^2 \cdot \sum (y_i - y_{\text{средн}})^2}}.$$
(14)

Спрогнозированное электропотребление в микроэнергосистеме методом ИНС, методом регрессии и средних нагрузок на 24 часа представлено в табл. 3. Визуальное представление спрогнозированного графика представлено на рис. 7.



и реальное потребление электроэнергии на НО

Fig. 7. Predicted consumption by ANN method and real electricity consumption at H0

Таблица 3. Спрогнозированные данные по потреблению на Н0

Table 3. Predicted consumption data at H0

	Спроги	нозированные данн	D		
Время,	Метод	Метод средних	Метод	Реальные	Ошиока
- ч	регрессии	нагрузок	ИНС	данные	метода
	H0	H0	H0	по	ИПС, 70
0:00	181,5	190,6	204,0	206,2	-0,01072
1:00	181,0	186,4	202,7	203,3	-0,00300
2:00	178,8	184,2	193,6	197,4	-0,01925
3:00	178,2	184,7	194,8	197,7	-0,01454
4:00	176,6	186,6	195,4	201,6	-0,03086
5:00	176,6	194,3	204,8	209,3	-0,02157
6:00	190,4	208,9	208,9	223,2	-0,06387
7:00	206,5	224,5	225,6	236,0	-0,04399
8:00	221,5	240,1	236,9	251,8	-0,05912
9:00	225,9	245,0	256,0	257,3	-0,00503
10:00	224,1	245,2	253,2	256,2	-0,01182
11:00	220,3	240,5	248,2	251,4	-0,01280
12:00	219,3	238,4	248,1	255,3	-0,02805
13:00	220,6	238,3	252,1	256,5	-0,01716
14:00	217,9	237,2	254,8	258,3	-0,01372
15:00	219,3	232,3	253,5	255,1	-0,00643
16:00	215,1	227,1	247,9	251,2	-0,01332
17:00	214,2	227,2	250,0	253,0	-0,01181
18:00	212,8	228,3	247,0	248,9	-0,00752
19:00	219,8	229,2	242,6	244,6	-0,00806
20:00	218,8	226,5	236,9	240,8	-0,01600
21:00	213,5	221,8	234,6	236,5	-0,00799
22:00	204,5	211,4	222,2	227,6	-0,02377
23:00	194,5	201,4	215,4	218,5	-0,01429

Значение коэффициента корреляции между фактическими и прогнозными данными активной мощности за H0 составило 0,995774, что близко к 1. Это указывает на высокую степень линейной корреляции и соответствия прогнозных значений реальным наблюдениям потребляемой активной мощности. Небольшие отклонения прогноза от фактических данных могут быть обусловлены ограниченным объемом исходной выборки, использованной для обучения ИНС. Увеличение тренировочного набора данных может повысить точность прогноза за счет более точного отражения тенденций в модели. В табл. 4 представлено сравнение коэффициентов корреляции, полученные для разных методов прогнозирования потребления на день *H*0.

> Таблица 4. Коэффициенты корреляции

> > Table 4.Correlation coefficients

Методы прогнозирования	Коэффициент корреляции
Метод регрессии	0,968791
Средних нагрузок	0,982268
ИНС	0,995774

На рис. 8 и рис. 9 показано визуальное представление спрогнозированных графиков по методам средних нагрузок и регрессии соответственно.



Рис. 8. Спрогнозированное потребление методом средних нагрузок и реальное потребление электроэнергии на H0

Fig. 8. Predicted consumption by the method of average loads and the actual electricity consumption at H0

Полученные результаты свидетельствуют о том, что метод на основе ИНС осуществляет лучшее прогнозирование потребления электрической энергии. Результаты оценки эффективности нейронной сети с рекуррентным алгоритмом обратного распространения погрешности и сравнение ее с другими методами показали применимость данного подхода для решения задачи.



Рис. 9. Спрогнозированное потребление методом регрессии и реальное потребление электроэнергии на Н0

Fig. 9. Predicted consumption by regression method and actual electricity consumption at H0

Процесс обучения нейронной сети включает многочисленные параметры и настройки. Определяющим в результате обучения ИНС является не только величина среднеквадратичной ошибки, но и число итераций, определяющих степень адаптации модели к входным данным. Чрезмерное или недостаточное количество обучающих циклов может привести к неоптимальным результатам вследствие переобучения или недообучения. Следовательно, важно тщательно настраивать параметры обучения, для достижения оптимального баланса между минимизацией ошибки и обучением модели, влияющего на ее способность к обобщению и прогнозированию.

VII. Заключение

Исследуемая нейронная сеть с обратным распространением ошибки обучения является одной из самых популярных и практически востребованных моделей в задачах регрессии. В результате исследования получено, что разработанная модель ИНС прогнозирует график потребления активной мощности в рассматриваемой микроэнергосистеме с коэффициентом корреляции 0,995774. Для достижения более точных прогнозов часто необходимо использовать большое количество обучающих выборок, что подчеркивает важность объема и качества данных.

При этом важно отметить, что при использовании набора инструментов для нейронной сети в среде *Matlab*, значительно снижается необходимость в сложной программной работе, что способствует более эффективному и быстрому процессу обучения. В результате исследования выявлено, что количество проведенных итераций обучения оказывает намного большее воздействие на точность предсказаний, чем строгое достижение целевой ошибки обучения. Это подчеркивает необходимость в оптимальном подборе количества итераций обучения, чтобы достичь наилучших результатов в обучении нейронных сетей.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2025-0001).

> © Лоскутов А.А., 2025 © Жаренков С.А., 2025 © Симанов А.С., 2025

Поступила в редакцию 29.12.2023 Принята к публикации 26.02.2024 Received 29.12.2023 Accepted 26.02.2024

Библиографический список

- [1] Брейдо И.В., Хомченко В.Г., Булатбаева Ю.Ф., Оразгалеева Г.Д. Создание модели прогнозирования энергопотребления на основе адаптивной нейро-нечеткой системы вывода в Matlab // Вестник КазАТК. 2021. № 116 (1). С. 331–338. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-116-1-331-338
- [2] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Совина А.Н. Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах // Электричество. 2022. № 10. С. 34-44. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44
- [3] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Бездушный Д.И. Повышение распознаваемости аварийных режимов релейной защитой методами деревьев решений // Электричество. 2023. № 7. С. 20-34. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
- [4] Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Некоторые аспекты оптимизационных задач при расчете автономных систем микрогрид // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2020. № 6 (81). С. 7-16. DOI: 10.37493/2307-907X.2020.6.1
- [5] Рибейро П.Ф., Дуке К.А., да Силвейра П.М., Серкейра А.С. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем. Техносфера, 2020. – 496 с.
- [6] Ordóñez D., Dafonte C., Arcay B., Manteiga M. A framework for the definition and generation of artificial neural networks // proc. 6th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, Dec. 16-18, 2006, Tenerife, Canary Islands, Spain. Stevens Point, Wisconsin, USA: WSEAS, 2007. C. 280–284.
- [7] Khalid Z., Abbas G., Awais M., Alquthami T., Rasheed M.B. A novel load scheduling mechanism using artificial neural network based customer profiles in smart grid // Energies. 2020. T. 16. № 5. Art. no. 1062. DOI: 10.3390/en13051062

- [8] Nabiullin D.I., Balobanov R.N. Prediction of the electrical load of the power system using neural networks // E3S Web of Conferences. 2019. № 124. Art. no. 05026. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405026
- [9] Ahmad N., Ghadi Y., Adnan M, Ali M. Load forecasting techniques for power system: Research challenges and survey // IEEE Access. 2022. T. 10. C. 71054-71090. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187839
- [10] Суворов А.А., Аскаров А.Б., Рудник В.Е., Разживин И.А., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Верификация численных расчетов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ // Электрические станции. 2022. № 1. С. 25-37. DOI: 10.34831/EP.2022.1086.1.004
- [11] Разживин И.А., Суворов А.А., Андреев М.В., Рудник В.Е., Гусев А.С. Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем // Электричество. 2022. № 8. С. 16-26. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [12] Тимшина Д.В., Работа Ю.Ю. Нечеткая логика и анализ эффективности инвестиционных проектов в среде MatLab, Fuzzy Logic Toolbox // Вестник Академии знаний. 2014. № 1 (8). С. 50-60.
- [13] Hammad M.A., Jereb B., Rosi B., Dragan D. Methods and models for electric load forecasting: A comprehensive review // Logistics & Sustainable Transport. 2020. T. 11. № 1. C. 51-76. DOI: 10.2478/jlst-2020-0004
- [14] Zeng W., Li J., Sun C., Cao L., Tang X., Shu S., Zheng J. Ultra short-term power load forecasting based on similar day clustering and ensemble empirical mode decomposition // Energies. 2023. T. 16. № 4. Art. no. 1989. DOI: 10.3390/en16041989
- [15] Habbak H., Mahmoud M., Metwally K., Fouda M.M., Ibrahem M.I. Load forecasting techniques and their applications in smart grids // Energies. 2023. T. 16. № 3. Art. no. 1480. DOI: 10.3390/en16031480
- [16] Sulandaria W., Subanar S., Suhartono S., Utami H. Forecasting electricity load demand using hybrid exponential smoothing-artificial neural network model // International Journal of Advances in Intelligent Informatics. 2016. T. 2. № 3. C. 131-139. DOI: 10.26555/ijain.v2i3.69
- [17] Krstonijevic S. Adaptive load forecasting methodology based on generalized additive model with automatic variable selection // Sensors. 2022. T. 22. № 19. Art. no. 7247. DOI: 10.3390/s22197247
- [18] Zhang S., Liu J., Wang J. High-resolution load forecasting on multiple time scales using long short-term memory and support vector machine // Energies. 2023. № 16. № 4. Art. no. 1806. DOI: 10.3390/en16041806
- [19] M. Shah, R. Agrawal, S. Gade. Short-term load forecasting using fuzzy logic based model: a case study of South Malwa plateau // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2023. Т. 18. № 1. С. 111–127. DOI: 10.26456/fssc105
- [20] Lee K.Y., Cha Y.T., Park J.H. Short-term load forecasting using an artificial neural network // IEEE Transactions on Power Systems. 1992. № 7 (1). C. 124-132. DOI: 10.1109/59.141695
- [21] Жаренков С.А. Репозиторий "1" // Gitgub. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Semsan6/1 (дата обращения 23.04.2024).

References

- [1] J.V. Breido, V.G. Homchenko, J.F. Bulatbayeva and G.D. Orazgaleyeva, "Creation of an energy consumption forecast model based on adaptive neuro-fuzzy output system in matlab", *The Bulletin of KazATC*, vol. 116, no. 1, pp. 331-338, 2021. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-116-1-331-338
- [2] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and A.N. Sovina, "Using machine learning and artificial neural networks to recognize inter-turn faults in power transformers", *Electricity*, no. 10, pp. 34-44, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44
- [3] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and D.I. Bezdushny, "Improving the recognition of emergency modes by relay protection using decision tree methods", *Electricity*, no. 7, pp. 20-34, 2023. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
- [4] D.K. Kugucheva and M.S. Kharitonov, "Some aspects of optimization problems in calculation of autonomous microgrid systems", *Newsletter of North-Caucasus Federal University*, vol. 6, no. 81, pp. 7-16, 2020. DOI: 10.37493/2307-907X.2020.6.1
- [5] P.F. Ribeiro, C.A. Duque, P.M. da Silveira and A.S. Cerqueira, *Power systems signal processing for smart grids*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [6] D. Ordóñez, C. Dafonte, B. Arcay and M. Manteiga, "A framework for the definition and generation of artificial neural network", in proc. 6th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, Dec. 16-18, 2006, Tenerife, Canary Islands, Spain, pp. 280-284.
- [7] Z. Khalid, G. Abbas, M. Awais, T. Alquthami and M.B. Rasheed, "A novel load scheduling mechanism using artificial neural network based customer profiles in smart grid", *Energies*, vol. 13, no. 5, art. no. 1062, 2020. DOI: 10.3390/en13051062
- [8] D.I. Nabiullin and R.N. Balobanov, "Prediction of the electrical load of the power system using neural networks", *E3S Web of Conferences*, vol. 124, art. no. 05026, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405026
- [9] N. Ahmad, Y. Ghadi, M. Adnan and M. Ali, "Load forecasting techniques for power system: Research challenges and survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 71054-71090, July 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187839.
- [10] A. Suvorov, A. Askarov, V. Rudnik, I. Razzhivin, M. Andreev and Yu. Bai, "Validation of numerical calculations of electromechanical transients in assessing the stability of electric power systems with generating facilities using renewable sources of energy", *Electric stations*, no. 1, pp. 25-37, 2022. DOI: 10.34831/EP.2022.1086.1.004
- [11] I.A. Razzhivin, A.A. Suvorov, M.V. Andreev, V.E. Rudnik, A.S. Gusev, "Studying the influence of synthetic inertia on electric power system transient stability", *Electricity*, no. 8, pp. 16-26, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [12] D.V. Timshina and Y.Y. Rabota, "Fuzzy logic and analysis of investment projects in the environment MatLab, Fuzzy Logic]", *Bulletin of the Academy of Knowledge*, vol. 1, no. 8, pp. 50-60, Jan.-March 2014.
- [13] M.A. Hammad, B. Jereb, B. Rosi and D. Dragan, "Methods and models for electric load forecasting: A comprehensive review", *Logistics & Sustainable Transport*, vol. 11, no. 1, pp. 51-76, Feb. 2020. DOI: 10.2478/jlst-2020-0004
- [14] W. Zeng, J. Li, C. Sun, L. Cao, X. Tang, S. Shu and J. Zheng. "Ultra short-term power load forecasting based on similar day clustering and ensemble empirical mode decomposition", *Energies*, vol. 16, no. 4, art. no. 1989, 2023. DOI: 10.3390/en16041989

- [15] H. Habbak, M. Mahmoud, K. Metwally, M.M. Fouda and M.I. Ibrahem, "Load forecasting techniques and their applications in smart grids", *Energies*, vol. 16, no. 3, art. no. 1480, 2023. DOI: 10.3390/en16031480
- [16] W. Sulandaria, S. Subanar, S. Suhartono and H. Utami, "Forecasting electricity load demand using hybrid exponential smoothing-artificial neural network model", *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, vol. 2, no. 3, pp. 131-139, Nov. 2016. DOI: 10.26555/ijain.v2i3.69
- [17] S. Krstonijevic, "Adaptive load forecasting methodology based on generalized additive model with automatic variable selection", *Sensors*, vol. 22, no. 19, art. no. 7247, 2022. DOI: 10.3390/s22197247
- [18] S. Zhang, J. Liu, and J. Wang, "High-resolution load forecasting on multiple time scales using long short-term memory and support vector machine", *Energies*, vol. 16, no. 4, art. no. 1806, 2023. DOI: 10.3390/en16041806
- [19] M. Shah, R. Agrawal and S. Gade, "Short-term electrical load forecasting using a fuzzy logic model: a case study of the South Malwa plateau", *Fuzzy Systems and Soft Computing*, vol. 18, is. 1, pp. 111–127, Aug. 2023. DOI: 10.26456/fssc105
- [20] K.Y. Lee, Y.T. Cha and J.H. Park, "Short-term load forecasting using an artificial neural network", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 124-132, Feb. 1992. DOI: 10.1109/59.141695
- [21] S.A. Zharenkov, Repository "1" // Gitgub. [Online]. Available at: https://github.com/Semsan6/1 [Accessed: Apr. 23, 2024].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Жаренков Семен Андреевич,

студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Симанов Александр Сергеевич, студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация. Anton A. Loskutov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Semyon A. Zharenkov, student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Alexander S. Simanov, student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russian Federation. УДК 621.314.572:621.791.037

EDN ICGBYC

УПРАВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ ТРУБ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.С. Савчук

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru

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

А.С. Плехов

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: aplehov@mail.ru

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

Е.А. Чернов

e-mail: epa@nntu.ru

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

Представлены концепции учета и компенсации возникающих воздействий при автоматической дуговой сварке труб. Рассмотрен способ управления напряжением дуги и сварочным током для формирования непрерывного сварочного шва. Показана необходимость учета распределения тепловой энергии в металле в зависимости от глубины сварочной ванны и времени остывания, а также управления тепловложением из-за эффекта Баушингера. Приведены значения сил, действующих на каплю расплава при круговом движении сварочной головки и скорректированные значения мощности импульса дуги. Результаты предназначены для использования в алгоритме управляющей ЭВМ.

Ключевые слова: сварочный аппарат, электрическая дуга, зона термического воздействия, тепломассоперенос, источник питания.

Для цитирования: Савчук В.С., Плехов А.С., Чернов Е.А. Управление источником питания электрической дуги при электросварке труб высокого давления // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 56-70. EDN ICGBYC

CONTROL OF ELECTRIC ARC POWER SUPPLY IN HIGH-PRESSURE PIPE WELDING

V.S. Savchuk

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Plekhov

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

E.A. Chernov

e-mail: **epa@nntu.ru** Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev *Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The article presents the principles of accounting and compliance with the rules for the occurrence of impacts during automatic arc welding of pipes. A method for controlling arc voltage and welding current to form a continuous weld is considered. It is necessary to take into account the distribution of thermal energy in the metal depending on the depth of the weld pool and the cooling time, and also to control the heat input due to the Bauschinger effect. The values of the forces acting on the melt drop during the circular movement of the welding head and the corrected values of the arc pulse power are presented. The results are intended for use in the control computer algorithm.

Keywords: welding machine, electric arc, heat-affected zone, heat and mass transfer, power source.

For citation: V.S. Savchuk, A.S. Plekhov and E.A. Chernov, "Control of electric arc power supply in high-pressure pipe welding", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 56-70, 2025. EDN ICGBYC

І. Введение

Электросварка в целом и труб в частности – это один из наиболее распространенных методов соединения металлических труб, который используется при строительстве магистральных трубопроводов, газопроводов, нефтепроводов и других объектов трубопроводного транспорта. Электросварка труб высокого давления должна обеспечить высокую прочность и герметичность сварного шва при эксплуатации в агрессивных средах и высоких давлениях. Одной из ключевых операций при электросварке труб является формирование электрической дуги, которая непрерывно поддерживает тепловой режим плавления металла [1].

II. Расчет необходимой энергии для формирования дуги

Необходимое тепло *Q*, Дж для расплава капли сварочного металла определяется:

$$Q = P \cdot T = m_{\rm so} \cdot c_{\rm so} \cdot \theta_{\rm so} + (m_{\rm so} + m_{\rm so})\gamma + + m_{\rm sg} \cdot c_{\rm sg} \cdot \theta_{\rm so} + \gamma_{\rm s} (\theta_{\rm so} [Q_{\rm c}] + \gamma_{\rm g} (\theta_{\rm so} - Q_{\rm cp})),$$
(1)

где $P_{\rm HM}$ – мощность импульса, Вт; $T_{\rm HM}$ – время импульса, с; m_{κ_3} – масса капли, кг; c_{κ_3} – удельная теплоемкость металла; θ_{κ_3} – температура плавления электродного металла, С; m_{30} – масса активного пятна, кг; γ – удельная теплота плавления капли и активного пятна; m_{3q} – масса дуги (пренебрегаемая в виду незначительной величины), кг; c_{3q} – удельная теплоемкость дуги; θ_{30} – температура плавления активного пятна, С⁰; γ_3 – условная температура электрической дуги, С; Q_c – среднее значение воздействия теплоты дуги, Дж; γ_{∂} – теплоемкость активного пятна, Дж; $Q_{\rm cp}$ – теплота рассеяния в окружающую среду, Дж; $\theta_{\kappa_3} = \theta_{\kappa_3}$ ($Q_{\rm c}$).

Значительное повышение сварочного тока приводит к повышению напряжения на дуге, так как с ростом плотности тока катодное пятно более не растет, потому что занимает всю площадь торца электрода и электрическое сопротивление дуги возрастает. При сварке в среде защитных газов используется дуга на возрастающем участке вольтамперной характеристики. Сварочная дуга обладает свойством саморегулирования, заключающимся в том, что в процессе сварки плавящимся электродом с постоянной скоростью его подачи длина дуги, при случайных ее изменениях, само восстанавливается за счет изменения скорости плавления электрода. При автоматической сварке под флюсом с постоянной скоростью подачи электродной проволоки, не зависящей от напряжения на дуге, применяют источник питания с жесткой статической вольтамперной характеристикой, работающий как регулятор напряжения, обеспечивая саморегулирование длины сварочной дуги.

При дуговой сварке плавящимся электродом происходит процесс переноса электродного металла в сварочную ванну. Капли расплавленного металла, отрываясь от электрода, периодически замыкают дуговой промежуток, изменяя силу тока и напряжение на дуге. Во время горения дуги образуется и растет капля расплавленного металла, затем при контакте между каплей и ванной происходит короткое замыкание и напряжение на дуге падает до нуля, а сила тока возрастает до максимального значения, что приводит к мгновенному сжатию шейки капли и разрушению мостика между каплей и электродом. В дальнейшем напряжение мгновенно возрастает, и сварочная дуга вновь возбуждается, после чего цикл сварки повторяется [2].

Необходимое тепло для формирования и переноса капли сварочного металла формируется в цикле, состоящем из семи тактов, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Эталонные формы кривых сварочного тока и напряжения

Fig. 1. Reference shapes of welding current and voltage curves

На каждом такте должны быть определенные уровни напряжения дуги и тока, что позволяет формировать заданное значение мощности нагрева электродного металла и активного пятна [1]. При этом обеспечиваются следующие процессы: *T*7-*T*0-*T*1 – подготовка капли в периоде времени; *T*1-*T*2 – начальный период короткого замыкания; *T*2-*T*3 – период возникновение сил переноса электродного металла; *T*5-*T*6 – рост капли; *T*6-*T*7 – переход на базовый ток.

III. Управление инвертором для формирования кривых сварочного тока и напряжения

Процесс расплавления и массопереноса обеспечивается сварочным инвертором [3], принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 2. Схема содержит управляющий блок инвертора, который включает в себя программируемое устройство управления (ПУУ) с обратной связью по сигналам датчика напряжения (ДН) и датчика тока (ДТ); ДЧПКД – делитель частоты с переменным коэффициентом деления; Д1 и Д2 - драйверы для транзисторных ключей; F1 и F2 – формирователи тактовых импульсов. Силовая часть содержит входной выпрямитель;*L-C*фильтр;транзисторные ключи*VT*1 -*VT*4 двойного несимметричного мостового инвертора; высокочастотный трансформатор; выпрямитель на выходе; сглаживающий фильтр. Такая схема позволяет исключить «мертвое» времямежду импульсами тока в условиях непрерывного контроля параметровэлектрической дуги [4].



Рис. 2. Принципиальная электрическая схема сварочного инвертора Fig. 2. Schematic electrical diagram of a welding inverter

Формирователи F1 и F2 определяют временные диаграммы кривых сварочного тока и напряжения. В периоды, когда RS-триггер дает разрешение на включение инвертора, на драйверы Д1 и Д2 поступают импульсы с частотой $f_2/2$. Для регулирования напряжения дуги на входах драйверов Д1 и Д2 устанавливаются устройства широтно-импульсной модуляции, не показанные на данной схеме.

Фактические осциллограммы тока и напряжения, синхронизированные с фотографиями дуги на разных этапах формирования капли, сняты на экспериментальном оборудовании высокочастотной камерой со скоростью 3000 кадр/с. На рис. 3 поэтапно изображен процесс горения дуги в течении одного цикла с разбивкой на кадры. Характерные точки на осциллограмме тока дуги пронумерованы в соответствии с кадрами, отражающими эволюцию дуги.



Рис. 3. Осциллограммы сварочного тока и напряжения в дуговом промежутке масштаб по напряжению 7 В/дел., по току 100 А / дел., по времени 2 мс/дел



IV. Тепломассоперенос в зоне термического воздействия

Мощность импульса должна рассчитываться по температурной кривой распространения тепловой энергии, отображающей снижение температуры в металле с течением времени и с учетом глубины проникновения активного пятна в металл свариваемых деталей *у* [5]. Температурные кривые приведены на рис. 4.



Рис. 4. Температурные кривые распространения тепловой энергии Fig. 4. Temperature curve of thermal energy propagation

Из этих зависимостей следует необходимость в импульсах повышенной мощности при сварке толстых стенок, либо применение двух и более последовательно расположенных горелок, формирующих капли сварочного металла в одну ванну.

При переходе электродной капли в сварочную ванну наблюдается изменение кристаллического состояния этой частицы металла. Термические циклы сварки вызывают локальные пластические деформации в зоне шва и околошовной области.

При охлаждении возникают остаточные растягивающие напряжения, которые могут снизить сопротивление материала последующим нагрузкам противоположного знака – сжатию и изгибу. Это весьма важно, поскольку перед сваркой торцов с изначально овальными сечениями свариваемые трубы подвергаются центрированию специальными устройствами, чем одновременно достигается приближение их сечений к окружности [6]. После сварки конструкция из двух сваренных участков трубы подвергается знакопеременным нагрузкам [7]. При этом проявляется эффект Баушингера – предварительная пластическая деформация при сварке снижает предел текучести при обратном нагружении, увеличивая риск усталостного разрушения. На рис. 5 приведены зависимости напряжения σ от деформации ε . Здесь σ_0 растягивающее напряжение в твердом нагреваемом состоянии, σ_1 – мера в жидком нагреваемом состоянии.



Fig. 5. The Bauschinger effect

Изотропная модель характеризует твердое состояние сварочного пятна, а кинематической модели соответствует жидкое состояние металла. Эффект Баушингера необходимо минимизировать посредством контроля тепловложения.

На тепловложение в металл влияют сварочный ток, напряжение дуги и скорость сварки:

$$E = \frac{I \cdot U \cdot 60}{V \cdot 1000},\tag{2}$$

где E – тепловложение, кДж/мм; I – ток, A; U – напряжение дуги, B; V – скорость сварки, мм/мин.

Для высокопрочных сталей необходимое тепловложение должно быть обеспечено в диапазоне 0,8...1,2 кДж/мм. Это достигается посредством автоматического управления дугой посредством ЭВМ и подачей проволоки, то есть синхронизацией компонентов электротехнического комплекса – сварочного инвертора и привода перемещения сварочной головки.

Сварочные автоматы с номинальным значением сварочного тока 1000 и 1600 А работают с ПВ = 100 %, формируя дугу под флюсом и в среде защитного газа. При этом используется электродная проволока диаметром 5 и 6 мм соответственно со скоростью подачи 60...360 м/час, что обеспечивает скорость образования сварного шва 12...120 м/час. Эта информация должна лежать в основе расчета необходимого тепла для расплава капли сварочного металла и тепловложения в свариваемый металл.

V. Необходимость изменения мощности импульсов дуги при круговом движении сварочной головки

Сварочная головка совершает круговое движение по кромкам свариваемых участков трубы, а капля электродного металла переносится в зону активного пятна под действием разных сил, величина которых зависит от угла между осью сварочной головки и гравитационной вертикалью (рис. 6).

Таким образом, сварочная ванна меняет свое положение относительно горизонта, а необходимая мощность дуги должна непрерывно меняться сообразно своему положению [8]. На каплю расплавленного металла действуют следующие силы: нормальная составляющая силы поверхностного натяжения P_{0r} , тангенциальная составляющая силы поверхностного натяжения P_{0t} , равнодействующая сила P_0 , гс; G – вес сварочной ванны, гс.

Для обеспечения равномерного качества шва при всех положениях сварочной головки необходима коррекция мощности сварочных импульсов в соответствии с:

$$\vec{P}_{0} = \vec{P}_{0t} + \vec{P}_{0r}, \qquad (3)$$

где \vec{P}_0 – векторная составляющая равнодействующей силы; \vec{P}_{0r} – векторная тангенциальная составляющая равнодействующей силы; \vec{P}_{0r} – векторная нормальная составляющая равнодействующей силы. В табл. 1 приведены расчетные значения этих сил при повороте сварочной головки на угол, кратный 30° [8].

Из изложенного следует, что в систему управления инвертором необходимо вводить сигналы об угловом положении сварочной головки и о линейной скорости ее перемещения вдоль свариваемых кромок. Это позволяет создать базовые сценарии использования источника питания [8] для определенного угла поворота горелки, который будет выставляться в зависимости от изменения дугового промежутка, как часть программы управляющей ЭВМ.



Рис. 6. Модель сварочной ванны с направлением равнодействующих сил при различных положениях

Fig. 6. A model of a welding bath with the direction of the resultant forces at different positions

Скорректированные значения мощности импульса дуги при повороте сварочной головки рассчитаны в относительных единицах и приведены в последнем столбце табл. 1.

На рис. 7 приведены графики зависимостей равнодействующих сил.

Таблица 1.

Сводная таблица значений равнодействующих сил и значения мощности импульса дуги

Table 1.

Summary table of resultant forces and the value of the arc pulse power

Угол	Значение	Значение	Значение	Корректировка
поворота	равнодействую-	тангенциальной	нормальной	импульса
сварочной	щей силы	составляющей	составляющей	мощности дуги
головки	Р₀, гс	равнодействую-	равнодействую-	относительно
φ, °		щей силы	щей силы	0°
		$P_{\theta t}, rc$	P _{or} , гс	
0	8,73	0,7	8,7	1
30	8,22	-2	7,98	0,97
60	7,2	-3,98	6	0,93
90	5,74	-4,7	3,3	0,9
120	4,02	-3,98	0,6	0,85
150	2,43	-2	-1,38	0,82
180	2,22	0,7	-2,1	0,8
210	2,43	-2	-1,38	0,82
240	4,02	-3,98	0.6	0,85
270	5,74	-4,7	3,3	0,9
300	7,2	-3,98	6	0,92
330	8,22	-2	7,98	0,96
360	8,73	0,7	8,7	1



Fig. 7. Graph of dependencies of resultant forces

VI. Определение корректирующих параметров

При дуговой сварке ключевым фактором является балансировка сил, действующих на каплю расплавленного металла [9]. Равнодействующая сила включает в себя:

$$F_{\rm T} = m \cdot g - {\rm сила \ тяжести};$$

$$F_{\rm II} = 2\pi r \cdot \sigma - {\rm сила \ поверхностного \ натяжения};$$

$$F_{\rm SH} = \mu_0 \cdot I^2 \cdot \ln\!\left(\frac{R}{r}\right) - {\rm SHERTPOMAFHUTHAR \ силa};$$

$$F_{\rm p} - {\rm peaktubhar \ силa \ паров \ металлa}.$$

На этапе паузы импульсной сварки силы поверхностного натяжения и реактивная сила компенсируют силу тяжести. Электромагнитная сила минимальна, что обеспечивает стабильное удержание капли. При нарастании тока импульса электромагнитная сила возрастает пропорционально квадрату тока, создавая направленное давление на каплю, обеспечивая ее отрыв. В режиме стабильного горения дуги доминирует электромагнитная сила, формирующая мелкокапельный перенос.

Фактором влияния является плотность тока: при I > 250 А электромагнитная сила становится доминирующей. В верхних положениях сварочной ванны роль силы тяжести увеличивается.

Оптимальное распределение указанных сил достигается при соотношениях $F_{\exists\exists}:F_{\Pi}: F_{T} = 1,2:0,7:1,0$, что обеспечивает стабильный перенос металла и минимальные остаточные напряжения в соединении. Это обеспечивается регулированием сварочного тока и диаметром сварочной проволоки [10].

Проверка концепции авторов об учете и компенсации возникающих воздействий произведена на сварочном агрегате КЕДР с открытой информационной шиной, предоставленном для проведения эксперимента ООО «Авангард Проект».

VII. Выводы

В результате проведенных исследований получена температурная кривая распространения тепловой энергии и сводная таблица значений равнодействующих сил, действующих на каплю расплавленного металла. Эти результаты являются основой разработки базовых сценариев управления источником питания в зависимости от угла поворота горелки с учетом изменения дугового промежутка. Результаты предназначены для использования в алгоритме управляющей ЭВМ. Их учет при электросварке труб высокого давления обеспечивают равномерное качество шва при всех положениях сварочной головки, уменьшение количества брызг (до 40 %), управле

ние тепловложением и контролем стабильности дуги. За счет выбора сценария использования уменьшается время, необходимое для настройки оборудования непосредственно перед началом работ (до 80 %). Совокупный эффект от использования предложенных решений позволяет повысить производительность труда на 20...30 %, в зависимости от размера свариваемых труб.

> © Савчук В.С., 2025 © Плехов А.С., 2025 © Чернов Е.А., 2025

Поступила в редакцию 04.03.2025 Принята к публикации 02.05.2025 Received 04.03.2025 Accepted 02.05.205

Библиографический список

- Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технология сварки плавлением. С.-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 483 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i18-111
- [2] Савчук В.С., Плехов А.С. Адаптация параметров сварочного трансформатора с учетом выходных характеристик дуги // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27. № 4. С. 568-576. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576.
- [3] Савчук В.С., Плехов А.С. Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 4(24). С. 43–54. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43
- [4] Доманов В.И., Доманов А.В., Карпухин К.Е., Мишин А.В. Разработка и исследование систем управления током электрической дуги. Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 242 с.
- [5] Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding. Processes and industrial applications. Wiley, 2013. – 514 c.
- [6] Ахмедов А.М. Совершенствование технологической операции центровки секций труб под сварку при осуществлении строительства и методов капитального ремонта магистральных трубопроводов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3976 (дата обращения 02.02.2025).
- [7] Залавин Я.Е. Совершенствование технологии вальцевой формовки с целью получения трубной заготовки с повышенной однородностью напряженно-деформированного состояния: дис. канд. техн. наук, ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, 2022.
 – 132 с.
- [8] Щербаков В.В. Разработка и регулирование процесса орбитальной сварки труб поверхностного нагрева диаметром до 60 мм с программированием режима: маг. дис., ТПУ, Томск, 2021. – 125 с.
- [9] Федулова М.А. Физико-химические процессы в сварочной дуге. Екатеринбург: РГППУ, 2009. – 79 с.
- [10] Аполлонский С.М., Куклев Ю.В., Фролов В.Я. Электрические аппараты управления и автоматики. М.: Лань, 2024. – 256.

References

- V.E. Zavyalov, I.V. Ivanova and N.G. Kobetskoy, *Tekhnologiya svarki plavleniem* [*Melting welding technology*]. St. Petersburg: SPbPU, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i18-111 (in Russian).
- [2] V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, "Adaptation of welding transformer parameters taking into account are output characteristics", *Vestnik of MSTU*, vol.27, no. 4, pp. 568-576, 2024. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576
- [3] V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, "Welding inverter control for electric welding of high-pressure pipes", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-54, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43
- [4] V.I. Domanov, A.V. Domanov, K.E. Karpushin and A.V. Mishin, Razrabotka i issledovanie sistem upravleniya tokom elektricheskoj dugi [Development and study of electric arc current control systems]. Ulyanovsk: UISTU, 2018 (in Russian).
- [5] R. Blondeau, Metallurgy and mechanics of welding. Processes and industrial application. Wiley, 2013.
- [6] A.M. Akhmedov, "The improvement of the technology operation for lining-up of the pipe sections when building and general maintenance of main pipelines", *Engineering journal of Don*, no. 1, 2017. [Online]. Available at: Engineering Journal of Don, http://www.ivdon.ru/en.
- [7] Ya.E. Zalavin, "Sovershenstvovanie tekhnologii val'cevoj formovki s cel'yu polucheniya trubnoj zagotovki s povyshennoj odnorodnost'yu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Improving the technology of roller forming in order to obtain a tubular blank with increased homogeneity of the stress-strain state]", Cand. of Tech. S. thesis, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, 2022 (in Russian).
- [8] V.V. Shcherbakov, "Development and regulation of the orbital welding process of surface heating pipes with the diameter of up to 60 mm with prog mode programming", Master thesis, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2021.
- [9] M.A. Fedulova, *Fiziko-himicheskie processy v svarochnoj duge [Physicochemical processes in a welding arc]*. Ekaterinburg: RSVPU, 2009 (in Russian).
- [10] S.M. Apollonsky, Yu.V. Kuklev, V.Ya. Frolov, *Elektricheskie apparaty upravleniya i avtomatiki [Electrical control and automation devices]*. Moscow: LAN, 2024 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Савчук Владислав Сергеевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

 Плехов
 Александр
 Сергеевич,

 кандидат
 технических
 наук,
 доцент

 Нижегородского
 государственного
 технического
 университета

 им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,
 Российская Федерация.
 Сергеевич,
 серация.

Savchuk Vladislav Sergeevich, graduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

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

ЧерновЕвгенийАлександрович,доктортехническихнаук, профессорНижегородскогогосударственноготехническогоуниверситетаим. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,Российская Федерация.

Chernov Evgeny Alexandrovich, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation. УДК 620.91:621.314

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Д.А. Устинов

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinovDA@pers.spmi.ru Санкт-Петербургский горный университет Санкт-Петербург, Россия

В. Абдалла

ORCID: 0000-0002-9666-7330 e-mail: abdallahwael80@gmail.com Санкт-Петербургский горный университет Санкт-Петербург, Россия

Е.Р. Шафхатов

ORCID: 0009-0009-5828-5348 e-mail: ershat11@mail.ru

Санкт-Петербургский горный университет Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена улучшению динамических характеристик преобразователя постоянного тока *SEPIC*. Представлены три различные модели преобразователя *SEPIC* для определения его передаточной функции. Порядок передаточной функции преобразователя уменьшен с 4-го до 2-го и до 1-го. В статье представлены два метода управления преобразователем. Первый основан на методе подбора параметров преобразователя (метод Николса-Циглера), а второй – на проектировании параметров ПИ-регулятора на основе управления внутренней модели (*Internal Model Control* – *IMC*). Кроме того, предлагается усовершенствование контроллера *IMC*. За счет снижения порядка передаточной функции преобразователя до второго порядка становится возможным использование ПИ-регулирования на основе *IMC*, что приводит к улучшению и упрощению управления.

Ключевые слова: SEPIC, источник питания, модель с уменьшенным порядком, ПИ-регулятор, преобразователь постоянного тока, силовая электроника, управление внутренней модели.

Для цитирования: Устинов Д.А., Абдалла В., Шафхатов Е.Р. Повышение динамических характеристик DC/DC преобразователя за счет настройки ПИ-регулятора напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 71-92. EDN LKHKBT

EDN LKHKBT

IMPROVING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DC/DC CONVERTER BY ADJUSTING VOLTAGE PI-CONTROLLER

D.A. Ustinov

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

V. Abdallah

ORCID: 0000-0002-9666-7330 e-mail: abdallahwael80@gmail.com Saint Petersburg Mining University Saint Petersburg, Russia

E.R. Shafhatov

ORCID: 0009-0009-5828-5348 e-mail: ershat11@mail.ru Saint Petersburg Mining University Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article considers improving the dynamic characteristics of the SEPIC DC/DC converter. Three different models of the SEPIC converter are presented in order to determine its transfer function. The order of the converter's transfer function has been decreased from the 4th order to the 2nd order and to the 1st order. Two main methods for controlling the converter are used. The first one is based on the inverter parameter selection method (Nichols-Ziegler method), and the second method explains the steps of getting the PI-controller parameters based on Internal Model Control (IMC). In addition, an improvement to the PI-controller (IMC-based) is proposed. Reducing the order of the converter transfer function to the 2nd order allows the use of IMC-based PI control, which leads to improved and simplified control.

Keywords: SEPIC, power source, reduced order model, PI-controller, DC/DC converter, power electronics, reduced order model, internal model control.

For citation: D.A. Ustinov, V. Abdalla and E.R. Shafhatov, "Improving the dynamic characteristics of DC/DC converter by adjusting voltage PI-controller", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 71-92, 2025. EDN LKHKBT

І. Введение

Известно, что *DC/DC* преобразователи используются для регулирования входного напряжения постоянного тока, таким образом поддерживая стабильное выходное напряжение постоянного тока. Эти преобразователи с переключаемым режимом (*Switched Mode Power Supplies – SMPS*) намного эффективнее линейных источников питания и способны обеспечивать более высокую удельную мощность. Область применения
SMPS имеет широкий диапазон: от встроенных слаботочных систем до промышленных энергетических установок, комплексов возобновляемых источников энергии, а также в распределенной генерации и интеллектуальных электрических сетях. Например, для обеспечения электроснабжения территориально-удаленных объектов предприятий минерально-сырьевого комплекса: для геологоразведочных, геодезических и других видов работ, проводимых по разведке и подготовке месторождений полезных ископаемых [1-4]. Авторы [1, 2] рассматривают использование ИБП (источник бесперебойного питания) для горнодобывающих предприятий на основе их объединения с альтернативными и возобновляемыми источниками энергии и многоступенчатыми системами автоматического переключения резерва для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей горнодобывающих предприятий. Более того, с интеграцией возобновляемых источников энергии и развитием распределенной генерации объединение различных типов источников энергии в одну систему становится более распространенным [5, 6].

DC/DC преобразователи могут быть реализованы с помощью различных топологий схем [7]. Среди них основные и наиболее часто используемые преобразователи: *CUK*, *ZETA* и *SEPIC*. Различные типы топологий безмостовых преобразователей обсуждаются в [8-12], большинство из которых основаны на конфигурациях повышающих преобразователей. Их главное преимущество – невысокая стоимость. Однако у них есть следующие недостатки [13]: отсутствие изоляции ввода-вывода; высокий пульсирующий ток.

Главная особенность преобразователей *CUK*, *ZETA* и *SEPIC* состоит в том, что они могут работать в повышающем и понижающем режимах. В [14] приведены результаты сравнения указанных преобразователей. Показано, что преобразователь *CUK* имеет более высокий уровень импульсных шумов и длительность переходного процесса. Результаты *SEPIC* и *ZETA* практически идентичны.

В [13], [15] обсуждались преобразователи на основе различных топологий *SEPIC* и показана их способность преодолевать указанные выше проблемы с повышающими преобразователями. При сравнительном анализе работы различных *DC/DC* преобразователей в широком диапазоне мощностей в [14] выявлено, что при применении преобразователя *SEPIC* снижаются значения пульсаций, выбросов напряжения и обеспечивается изоляция ввода/вывода [16].

Регулирование выходного напряжения преобразователя *SEPIC* происходит путем управления рабочим циклом транзистора Q_1 (рис. 1).



Рис. 1. Схема преобразователя *SEPIC* Fig. 1. SEPIC converter schematic

ПИ- и ПИД-регуляторы успешно применяются при управлении *DC/DC* преобразователями. Параметры таких регуляторов рассчитываются с применением методики усредненной модели слабого сигнала, представленной в [17]. Параметры ПИ регулятора, представленного в работе, рассчитывается с помощью метода управления внутренней моделью.

Основная идея заключается в том, что достижение оптимального управления возможно, если система управления является представлением системы под управлением. При этом приведенная передаточная функция пониженного порядка будет использоваться ПИ-регулятором на основе *IMC* для получения своих параметров.

II. Материалы и методы

Основная идея предлагаемого решения состоит в том, чтобы уменьшить порядок передаточной функции исходной модели преобразователя *SEPIC* и использовать ее характеристики для вывода параметров контроллера на основе *PI-IMC*. Для реализации этой стратегии анализируются операции под-интервалов работы преобразователя на основе метода, указанного в [17]. Затем выводится усредненная модель малого сигнала путем линеаризации модели пространства состояний преобразователя. После определения параметра конструкции, и использования *Matlab/Simulink* выводится передаточная функция модели. Используя аппроксимацию Паде, эта передаточная функция сводится к второму и первому порядкам. Были реализованы диаграмма Боде, корневой годограф и сравнение переходной характеристики между исходной передаточной функцией и выведенной.

После получения параметров контроллера с использованием метода Николса-Циглера и метода на основе *PI-IMC* проводится дальнейшее их сравнение с использованием *Matlab/Simulink*, чтобы показать, что поведение преобразователя с использованием предлагаемого метода более стабильно при изменениях входного напряжения.

Модели конвертера

Рассмотрим три модели преобразователя SEPIC:

1) усредненную модель большого сигнала;

2) стационарную модель или модель сигнала постоянного тока;

3) усредненную модель слабого сигнала.

Получение этих моделей помогает нам оценить, как работает преобразователь, и, следовательно, позволяет нам решить, как им управлять. Построение этих моделей поможет в оценке взаимосвязи между различными переменными и даст четкое представление о том, какой будет схема управления. Рассмотрим следующие условные обозначения:

$$\dot{u}_{1} = \frac{du_{c1}}{dt}, \\ \dot{u}_{2} = \frac{du_{c2}}{dt}, \\ \dot{i}_{1} = \frac{di_{L1}}{dt}, \\ \dot{i}_{2} = \frac{di_{L2}}{dt};$$
(1)

$$u_2 = u =$$
Выходное напряжение; (2)

$$d = D + \hat{d}; \tag{3}$$

$$u_g = U_g + \hat{u}_g; \tag{4}$$

$$u_1 = U_1 + \hat{u}_1;$$
 (5)

$$u_2 = U_2 + \hat{u}_2;$$
 (6)

$$i_1 = I_1 + \hat{i}_1;$$
 (7)

$$i_2 = I_2 + \hat{i}_2,$$
 (8)

где d, D и \hat{d} представляют соответственно большую, постоянную и малую часть сигнала.

1. Усредненная модель большого сигнала

Используя схему преобразователя *SEPIC* (рис. 1), получаем представление модели пространства состояний:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{1} \\ \dot{i}_{2} \\ u_{1} \\ u_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1(1-d)}{L_{1}} & \frac{-1(1-d)}{L_{1}} \\ 0 & 0 & \frac{d}{L_{2}} & \frac{-1(1-d)}{L_{2}} \\ \frac{1-d}{C_{1}} & \frac{-d}{C_{1}} & 0 & 0 \\ \frac{1-d}{C_{2}} & \frac{1-d}{C_{2}} & 0 & \frac{-1}{RC_{2}} \\ & & & & & \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{1} \\ \dot{i}_{2} \\ u_{1} \\ u_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ & & \\ & & & \\ B \end{bmatrix} (u_{s});$$
(9)

2. Стационарная модель или модель сигнала постоянного тока

Следует отметить, что указанные выше меняющиеся во времени матрицы зависят от «*d*» и представляют собой нелинейную модель, которую трудно контролировать. По этой причине целесообразно их линеаризовать. Следовательно, произведем возмущение сигнала, используя (3) - (8), разделим матрицы, удалим часть установившегося состояния и линеаризуем модель, рассматривая часть \hat{d} в качестве другого входа. Соответственно, если мы хотим управлять преобразователем, будем рассчитывать на слабый сигнал \hat{d} .

В установившемся состоянии считаем, что все компоненты имеют постоянные и неизменные значения, что делает все производные равными нулю. Следовательно:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = 0;$$
(11)
$$X$$

$$d = D, \quad u_g = U_g, \quad u_1 = U_1, \quad u_2 = U_2, \quad i_1 = I_1, \quad i_2 = I_2.$$
 (12)

Таким образом, решение модели установившегося состояния можно записать в виде:

$$(U) = -\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1(1-D)}{L_1} & \frac{-1(1-D)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & \frac{-1(1-D)}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & \frac{-D}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_2} & \frac{1-D}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_g \end{pmatrix}.$$
(13)

3. Получение модели слабого сигнала

Подставляя (3) – (8) в (9) – (10), получаем модель малого сигнала, записанную в терминах \hat{d} и \hat{v}_{g} .

Получив уравнение пространства состояний модели малого сигнала, можем теперь изучить поведение системы в переходный момент времени:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu\\ \dot{y} = Cx + Du \end{cases}$$
(16)

Преобразование вышеуказанной системы в форму Лапласа:

$$\begin{cases} sX(s) = A \cdot X(s) + B \cdot U(s) \\ Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s) \end{cases};$$
(17)

$$\begin{cases} X(s) = [sI - A]^{-1} \cdot B \cdot U(s) \\ Y(s) = C \cdot [sI - A]^{-1} \cdot B \cdot U(s) + D \cdot U(s) \end{cases}$$
(18)

Получим передаточную функцию разомкнутого контура выходного напряжения \hat{v} преобразователя относительно коэффициента заполнения \hat{d} :

$$\frac{\hat{u}}{\hat{d}} = C \cdot \left[sI - A \right]^{-1} \cdot B_d, \tag{19}$$

где:

$$B_{d} = \begin{bmatrix} \frac{U_{1} + U_{2}}{L_{1}} \\ \frac{U_{1} + U_{2}}{L_{2}} \\ \frac{-I_{1} - I_{2}}{C_{1}} \\ \frac{-I_{1} - I_{2}}{C_{2}} \end{bmatrix}.$$
 (20)

Модель двунаправленного преобразователя *SEPIC* в *Matlab/Simulink* показана на рис. 2.





III. Моделирование конвертера SEPIC

Рассматриваемая система состоит в основном из набора батарей и/или суперконденсаторов, питающих отдельный преобразователь с напряжением 625 В постоянного тока. Роль преобразователя *SEPIC* состоит в том, чтобы повысить входное напряжение до 800 В и, таким образом, поддерживать максимальную нагрузку 110 кВт на шине звена постоянного тока. Основные расчетные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные параметры Table 1.

Design parameters

Параметр	Значение
Частота переключения	20 кГц
Входное напряжение	625 B
Выходное напряжение	800 B
Сопротивление нагрузки (при 110 кВт)	5,818 Ом
Установившийся коэффициент заполнения D	0,5614
Δi_{L1}	15 % IL1
Δi_{L2}	15 % IL2
L_1	3,322·10 ⁻⁴ Гн
L_2	4,253·10 ⁻⁴ Гн
Δu_{C1}	$1 \% U_{C1}$
Δu_{C2}	$1 \% U_{C2}$
C_1	$3,087 \cdot 10^{-4} \Phi$
C_2	2,412·10 ⁻⁴ Φ

Коэффициент заполнения *D* рассчитывается с использованием следующего соотношения:

$$U = \frac{D}{1 - D} \cdot U_g. \tag{21}$$

С помощью компьютерного моделирования в *Matlab*, указанные выше значения параметров и полученные уравнения используются для получения передаточной функции разомкнутого контура выходного напряжения \hat{u} преобразователя относительно коэффициента заполнения \hat{d} :

$$\frac{\hat{u}}{\hat{d}}(s) = \frac{-1,352 \cdot 10^6 \, s^3 + 1,389 \cdot 10^{10} \, s^2 - 5,556 \cdot 10^{12} \, s + 5,938 \cdot 10^{16}}{s^4 + 712,5s^3 + 8,55 \cdot 10^6 \, s^2 + 3,046 \cdot 10^9 \, s + 1,828 \cdot 10^{13}}.$$
(22)

Видим, что передаточная функция имеет 4-й порядок. Анализ нулей и полюсов этого уравнения показывает, что она имеет 4 полюса и 3 нуля. Один из нулей расположен в правой половине *s*-плоскости. Для оценки устойчивости передаточной функции анализа диаграммы Боде в данном случае недостаточно. Поэтому используем анализ корневого годографа (рис. 3), который описывает, как распределяются полюсы и нули.



Рис. 3. График корневого годографа передаточной функции преобразователя Fig. 3. Root locus plot of the converter transfer function

Уменьшение порядка передаточной функции и приближение Паде

Производная передаточной функции представляет собой полное описание динамики системы. Однако, поскольку его трудно контролировать, мы постараемся минимизировать его порядок, используя приближение Паде для передаточных функций с одним входом и одним выходом (*Single Input Single Output – SISO*). Уменьшая порядок с 4-й степени до 2-го и 1-го порядка, можем использовать результаты для получения пропорционального и интегрального параметра ПИ-регулятора.

Аппроксимация Паде к уравнению 2-го порядка:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(s) = \frac{-1.3 \cdot 10^6 \, s + 1.389 \cdot 10^{10}}{s^2 + 712.5s + 4.275 \cdot 10^6}.$$
(23)

Аппроксимация Паде к уравнению 1-го порядка:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(s) = \frac{1,248 \cdot 10^7}{s + 3843}.$$
(24)

Боде диаграммы всех полученных передаточных функций схематически изображены на рис. 4.



Рис. 4. Диаграмма Боде главной передаточной функции преобразователя и ее приведенных порядков

Fig. 4. Bode plot diagrams of the converter main transfer function and its reduced orders

Все передаточные функции разомкнутого контура достигают стабильности в течение короткого периода времени. Исходная передаточная функция и пониженная передаточная функция до 2-го порядка имеют положительный полюс, в отличие от пониженной передаточной функции до 1го порядка. Поскольку собираемся использовать метод управления *IMC*, выполним проверку реакции ПИ-регулятора на основе передаточных функций 1-го и 2-го порядка.

Переходные характеристики разомкнутого контура показаны на графике для трех вариантов передаточной функции, чтобы показать стабильность в установившемся режиме, рис. 5. Очевидно, что все функции достигают установившегося состояния, в то время как исходная передаточная функция и передаточная функция, уменьшенная до 2-го порядка, демонстрируют схожее поведение.



Рис. 5. Ступенчатая характеристика передаточной функции и ее приведенных порядков: в разомкнутом контуре (а); в замкнутом контуре (б)

Fig. 5. Step response of the transfer function and its reduced orders: in open loop (a); in closed loop (b)

IV. Результаты и обсуждения

Представим два способа получения параметров контроллера. Первый способ заключается в использовании обычного метода подбора пропорциональных и интегральных параметров ПИ-регулятора. Второй метод – это рассмотрение доступной динамики и параметров преобразователя с помощью метода *IMC*. Оба метода эффективны, однако, *IMC* основан на имитации передаточной функции преобразователя.

Переходная характеристика для каждой из моделей (порядков) передаточных функций *SEPIC* была протестирована с использованием переменного ступенчатого входа. Результаты показаны на рис. 6 и 7.

Выбранные параметры ПИ-регулятора, следующие (методом подбора): $k_p = 0,00001$; $k_i = 0,05$.

На рис. 7 показано выходное напряжение относительно входного опорного напряжения 800 В.



Рис. 6. Ступенчатая характеристика передаточной функции и ее приведенных порядков

Fig. 6. Step responses of the transfer function and its reduced orders





Более подробно о контроллере *IMC* рассмотрено в [18], параметры рассчитываются с использованием следующих уравнений для контроллера с одной степенью свободы и с учетом передаточной функции, приведенной к 2-му порядку [18]:

$$k_{p} = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \tau_{r}}{\tau_{sepic}} = 1,2384 \cdot 10^{-12};$$
⁽²⁵⁾

$$k_{i} = \frac{k_{p}}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_{r}} = 1,2803 \cdot 10^{-9},$$
(26)

где τ_r – время нарастания передаточной функции; k_{sepic} – коэффициент уси-

Поскольку разработана передаточная функция с использованием анализа слабого сигнала, выходом ПИ-регулятора является коэффициент заполнения малого сигнала \hat{d} , поэтому, если мы подадим на ШИМ большой сигнал «d» (3), мы будем ожидать более быстрый ответ. Для этого мы добавим часть устойчивого состояния коэффициента заполнения «D» к входному сигналу ШИМ. Блок контроллера *SEPIC* представлен на рис. 8.





Коэффициент заполнения установившегося режима «D» выводится из (21), если выходное напряжение «U» считается « U_{ref} »:

$$D = \frac{U_{ref}}{U_{ref} + U_g}.$$
 (27)

Следовательно, входом в ШИМ является:

$$d = \hat{d} + \frac{U_{ref}}{U_{ref} + U_g}.$$
(28)

Предыдущий анализ был выполнен с учетом идеального источника входного постоянного напряжения U_g , питающего преобразователь; поэтому полезно проверить его реакцию, когда он питается от неидеального источника постоянного тока, такого как фотоэлектрическая панель.

Модель фотоэлектрической панели, используемая в Matlab/Simulink, имитирует поведение панели Trina Solar TSM-250PA05.08 и используется для проверки отклика преобразователя. Параметры панели приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры фотоэлектрической панели Trina Solar TSM-250PA05.08

 Table 2.

 Trina Solar TSM-250PA05.08 photovoltaic panel parameters

Параметр	Значение
Максимальная мощность (Вт)	249,86
Количество ячеек на модуль	60
Напряжение холостого хода (В)	37,6
Ток короткого замыкания (А)	8,55
Количество последовательно соединенных модулей в каждой строке	18
Количество параллельных строк	100
Изменение входной солнечной освещенности на фотоэлектрической панели (Вт /м ²)	250900

Входная освещенность на фотоэлектрической панели будет изменяться в соответствии с режимом, описанным в табл. 2, и отражаться как выходное напряжение панели (рис. 9 а).

На рис. 9 б и в показано, что ПИ-регулятор на основе *IMC* поддерживает более стабильное напряжение на выходе преобразователя *SEPIC*, чем обычный ПИ-регулятор.

На рис. 10 а и б представлены результаты анализа коэффициента искажения (*Total Harmonic Distorsion – THD*) относительно постоянного тока выходного напряжения преобразователя *SEPIC*, но при использовании ПИрегулятора на основе *IMC*, происходит улучшение значения *THD* и более высокое среднеквадратичное выходное напряжение постоянного тока.



Рис. 9. Реакция *SEPIC* на вход фотоэлектрической панели (а): оригинальный ПИ-регулятор (б); ПИ-регулятор на основе *IMC* (в)

Fig. 9. SEPIC converter response to PV panel input (a): original PI-controller (6); IMC-based PI-controller (B)

Очевидно, что ПИ-регулятор на основе *IMC* смог поддерживать более стабильное напряжение на выходе преобразователя *SEPIC*, чем обычный ПИ-регулятор, что подтверждается рис. 9. Хотя анализ *THD* относительно постоянного тока выходного напряжения преобразователя *SEPIC* обоих контроллеров показывает хорошие результаты, у ПИ-регулятора на основе *IMC* ниже значение *THD* и более высокое среднеквадратичное выходное напряжение постоянного тока (рис. 10 а и б). Кроме того, как показано на (рис. 9 в), выходное напряжение преобразователя *SEPIC* все еще находится в пределах проектного значения 1 %. Эти результаты подтверждают правильность конструкции преобразователя в дополнение к способности ПИ-регулятора на основе *IMC* лучше выдерживать входные возмущения и изменения.

Переходная характеристика улучшенного ПИ-регулятора оказалась вполне удовлетворительной, как показано на рис. 11 б, с временем нарастания почти 0,6 мс. Это связано с добавлением значения постоянного тока рабочего цикла. Такая реализация сократила время отклика конвертера с 25,15 мс до 0,6 мс (рис. 11).



Рис. 10. Анализ ТНД выходного напряжения SEPIC: оригинальный ПИ-регулятор (а); ПИ-регулятор на основе IMC (б)

Fig. 10. THD analysis of output voltage: *original PI-controller (a); IMC-based PI-controller (b)*

V. Заключение

Проведен анализ преобразователей постоянного тока. Выполнено обоснование, что для автономных систем электроснабжения, включая накопители энергии (батареи, модули суперконденсаторов) и фотоэлектрические элементы, возможно использование преобразователя *SEPIC*. Результаты моделирования показывают реакцию преобразователя и оправдывают использование ПИ-регулятора на основе *IMC* с использованием модели сокращенного порядка. Полученные результаты моделирования показывают применимость предложенного решения для автономных источников питания от батарей или суперконденсаторов, а также для фотоэлектрических панелей. Для преобразователей с передаточной функцией высокого порядка реализация управления на основе метода внутреннего модельного контроля представляет собой сложный процесс. Однако с помощью приближения Паде, уменьшая порядок передаточной функции преобразователя, все же можно сохранить некоторые характеристики динамики системы, но при этом упростить процесс управления для реализации.





Fig. 11. Transient response of converter supplied by PV: original PI-controller (a); IMC-based PI-controller (6)

Эта статья посвящена памяти нашего научного руководителя, профессора Бориса Николаевича Абрамовича. Утрата Бориса Николаевича не была бесследной, мы потеряли необычайную поддержку, исключительный источник мотивации, видения, знаний и энтузиазма. Руководство Бориса Николаевича и его ценные и конструктивные предложения, критика и рекомендации от планирования этой работы (как и многих других) до окончательного результата, безусловно, бесценны.

© Устинов Д.А., 2025 © Абдалла В., 2025 © Шафхатов Е.Р., 2025

Поступила в редакцию 16.05.2023 Принята к публикации 02.05.2025 Received 16.05.2023 Accepted 02.05.2025

Библиографический список

- Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 132-139.
- [2] Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
- [3] Бельский А.А., Скамьин А.Н., Васильков О.С. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. № 63(3). С. 212-222. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
- [4] N. Korolev, A. Kozyaruk and V. Morenov, "Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle", *Energies*, vol. 14(19), no. 6074, Sept. 2021. DOI: 10.3390/en14196074
- [5] Y.L. Zhukovskiy, A.Y. Lavrik and A.D. Buldysko, "Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, no. 012059, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [6] Бельский А.А., Добуш В.С., Шайбан Фауд Хайкал. 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
- [7] A. DeNardo, N. Femia, F. Forrisi and M.A. Granato, "SEPIC converter passive components design", in proc. 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, May 2008, Saint Julian's, Malta, pp. 1002-1005. DOI: 10.1109/ICECS.2008.4675025
- [8] A. Ferrari de Souza and I. Barbi, "A new ZVS semiresonant high power factor rectifier with reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46(1), no. 6074, pp. 82-90, Feb. 1999. DOI: 10.1109/41.744393
- [9] Пирог С., Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Идентификация местоположения нелинейной электрической нагрузки // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 317-321. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.317
- [10] W. Choi, J. Kwon, E. Kim, J. Lee and B. Kwon, "Bridgeless boost rectifier with Low conduction losses and reduced diode reverse-recovery problems", *IEEE Transactions* on *Industrial Electronics*, vol. 54(2), pp. 769-780, May 2007. DOI: 10.1109/TIE.2007.891991

- [11] Y.E. Shklyarskiy, Z. Hanzelka and A.N. Skamyin, "Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering", *Energies*, vol. 13(21), no. 5536, Oct. 2020. DOI:10.3390/en13215536
- [12] Y.E. Shklyarskiy, A.N. Skamyin and A.Y. Shklyarskiy, "Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker' s power networks", *Tsvetnye Metally*, vol.10, pp. 64-69, Oct. 2020. DOI:10.17580/tsm.2020.10.09
- [13] E.H. Ismail, "Bridgeless SEPIC rectifier with unity power factor and reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56(4), pp. 1147-1157, May 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007552
- [14] K. Singh and M. Singh, "Analysis and comparison of performance of various DC-DC converters using Matlab Simulink", *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 3, pp. 585-590, August 2015.
- [15] J.L. Rose and B. Sankaragomathi, "Design, analysis and simulation of a SEPIC converter", *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 24 (7), pp. 2302-2308, 2016, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.07.23750
- [16] Li N, "Digital control strategies for DC/DC SEPIC converters towards integration", Cand. of Tech. S. doctoral thesis, National Institute of Applied Sciences of Lyon, Lyon, France, 2012.
- [17] Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Абдалла В.Д. Обоснование параметров преобразователя постоянного тока для источника автономного электроснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия: «Энергетика». 2020. Т. 20. № 4. С. 86–95. DOI: 10.14529/power200410
- [18] D.E. Rivera, "Internal model control: a comprehensive view", Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999.

References

- B.N. Abramovich and Yu.A. Sychev, "Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector", *Journal of Mining Institute*, vol. 217, pp. 132-139, 2016.
- [2] B.N. Abramovich, "Uninterruptible power supply system for mining industry enterprises", *Journal of Mining Institute*, vol. 229, pp. 31-40, 2018. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
- [3] A.A. Belsky, A.N. Skamyin and O.S Vasilkov, "The use of hybrid energy storage devices for balancing the electricity load profile of enterprises", *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, vol. 63, no. 3, pp. 212-222, 2020. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
- [4] N. Korolev, A. Kozyaruk and V. Morenov, "Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle", *Energies*, vol. 14(19), no. 6074, Sept. 2021. DOI: 10.3390/en14196074
- [5] Y.L. Zhukovskiy, A.Y. Lavrik and A.D. Buldysko, "Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, no. 012059, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [6] 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 (in Russian). DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564

- [7] A. DeNardo, N. Femia, F. Forrisi and M.A. Granato, "SEPIC converter passive components design", in proc. 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, May 2008, Saint Julian's, Malta, pp. 1002-1005. DOI: 10.1109/ICECS.2008.4675025
- [8] A. Ferrari de Souza and I. Barbi, "A new ZVS semiresonant high power factor rectifier with reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46(1), no. 6074, pp. 82-90, Feb. 1999. DOI: 10.1109/41.744393
- [9] S. Pirog, Y.E. Shklyarskiy and A.N. Skamyin, "Non-linear electrical load location identification", *Journal of Mining Institute*, vol. 237, pp. 317-321, 2019. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.317
- [10] W. Choi, J. Kwon, E. Kim, J. Lee and B. Kwon, "Bridgeless boost rectifier with low conduction losses and reduced diode reverse-recovery problems", *IEEE Transactions* on *Industrial Electronics*, vol. 54(2), pp. 769-780, May 2007. DOI: 10.1109/TIE.2007.891991
- [11] Y.E. Shklyarskiy, Z. Hanzelka and A.N. Skamyin, "Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering", *Energies*, vol. 13(21), no. 5536, Oct. 2020. DOI:10.3390/en13215536
- [12] Y.E. Shklyarskiy, A.N. Skamyin and A.Y. Shklyarskiy, "Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker' s power networks", *Tsvetnye Metally*, vol.10, pp. 64-69, Oct. 2020. DOI:10.17580/tsm.2020.10.09
- [13] E.H. Ismail, "Bridgeless SEPIC rectifier with unity power factor and reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56(4), pp. 1147-1157, May 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007552
- [14] K. Singh and M. Singh, "Analysis and Comparison of Performance of Various DC-DC Converters using MATLAB SIMULINK", *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 3, pp. 585-590, August 2015.
- [15] J.L. Rose and B. Sankaragomathi, "Design, analysis and simulation of a SEPIC converter", *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 24 (7), pp. 2302-2308, 2016, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.07.23750
- [16] Li N, "Digital control strategies for DC/DC SEPIC converters towards integration", Cand. of Tech. S. doctoral thesis, National Institute of Applied Sciences of Lyon, Lyon, France, 2012.
- [17] B.N. Abramovich, D.A. Ustinov and V.D. Abdallah, "Justification of the parameters of a DC/DC converter for an autonomous power supply source", *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 86–95, Dec. 2020. DOI: 10.14529/power200410.
- [18] D.E. Rivera, "Internal model control: a comprehensive view", Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Абдалла Ваэль, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Шафхатов Ершат Рашитович, аспирант 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.

Wael Abdallah, postgraduate student of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Ershat R. Shafhatov, postgraduate student of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.354.3:621.314.58

EDN OQIBFI

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТLАВ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ОТ СЕТИ И ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ В СЕТЬ (РАБОТА В РЕЖИМЕ G2V И V2G)

Б.Н. Сидоров

ORCID: 0009-0007-0643-6373 e-mail: nnv033@gmail.com Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет *Москва, Россия*

Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил

ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: alijber1987@uomisan.edu.iq

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет *Москва, Россия* Университет Майсан *Майсан, Ирак*

В настоящее время в области технологий преобразования энергии перспективными являются концепции V2G (Vehicle-to-Grid) – электромобиль – сеть и G2V(Grid-to-Vehicle) – сеть – электромобиль. Работа в режимах V2G и G2V предполагает двухсторонний энергетический обмен между электромобилем и электрической сетью. Так, в сценарии V2G аккумуляторные батареи электромобилей могут использоваться для частичного покрытия графиков электрических нагрузок энергосистемы, применяться в качестве резервных источников, а также использоваться для решения задач повышения качества электроэнергии. В статье представлен двухступенчатый подход к преобразованию мощности, объединяющий трехфазный активный выпрямитель и двунаправленный BUCK-BOOST преобразователь, обеспечивающий эффективное управление напряжением шины постоянного тока 800 В и током батареи. Функция активного выпрямителя определена для преобразования напряжения сети переменного тока в регулируемое напряжение шины постоянного тока, при этом в двунаправленном BUCK-BOOST конверторе ток батареи регулируется как при зарядке, так и при разрядке. Предложенные решения исследованы с помощью имитационного компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность их применения для зарядного устройства 10 кВт с системой управления, позволяющей передавать мощность в режимах V2G и G2V с обеспечением качества электроэнергии.

Ключевые слова: управление, активный выпрямитель, двунаправленный buck-boost преобразователь, электромобиль, G2V, V2G.

Для цитирования: Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил. Моделирование в Matlab процесса заряда аккумулятора электромобиля от сети и выдачи мощности в сеть (работа в режиме G2V и V2G) // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 93-111. EDN OQIBFI

MATLAB SIMULATION OF BATTERY CHARGING FROM THE GRID AND DISCHARGING TO THE GRID (G2V AND V2G OPERATION)

B.N. Sidorov

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

Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil

ORCID: 0000-0003-0583-0559 email: alijber1987@uomisan.edu.iq

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Moscow, Russia University of Maysan Maysan, Iraq

Abstract. Currently, the concepts of V2G (Vehicle-to-Grid) – electric vehicle – network and G2V (Grid-to-Vehicle) network-electric vehicle are promising in the field of energy conversion technologies. Operation in V2G and G2V modes involves a two-way energy exchange between an electric vehicle and an electric grid. Thus, in the V2G scenario, electric vehicle batteries can be used to partially cover the electrical load schedules of the power system, used as backup sources, and also used to solve problems of improving the quality of electricity. The article presents a two-stage approach to power conversion that combines a three-phase active rectifier and a bidirectional buck-boost converter that provides efficient control of 800 V DC bus voltage and battery current. The function of the active rectifier is defined to convert the AC mains voltage into an adjustable DC bus voltage, while in a bidirectional buck-boost converter, the battery current is regulated both during charging and discharging. The proposed solutions were investigated using Matlab/Simulink environment. The results obtained confirmed the high efficiency of their use for a 10-kW charger with a control system that provides power transmission in V2G and G2V modes while ensuring the quality of the transmitted electricity.

Keywords: control, active rectifier, bidirectional buck-boost converter, EV, G2V, V2G.

For citation: B.N. Sidorov and Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, "Matlab simulation of battery charging from the grid and discharging to the grid (G2V and V2G operation)", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 93-111, 2025. EDN OQIBFI

І. Введение

В настоящее время в рамках развития низкоуглеродной энергетики, активно растет производство электромобилей. Однако рост их числа имеет и негативные стороны. Например, установка зарядных станций и их подключение к существующей инфраструктуре электрических сетей может оказывать значительное влияние на качество электроэнергии в сети, особенно в часы пиковой нагрузки. В настоящее время перспективный подход к снижению влияния зарядных станций на качество электроэнергии в сети связан с использованием алгоритмов управления энергопотреблением, реализующих различные стратегии [1].

Электромобили можно рассматривать в качестве источника энергии для других потребителей. Но такой подход требует обеспечения двунаправленного преобразования энергии от сети к электромобилю и обратно (от электромобиля в сеть). Эта идея была положена в основу концепций V2G и G2V [2-5]. В концепции V2G электроэнергия подается из аккумулятора электромобиля в сеть, а в концепции G2V электромобили получают электроэнергию от сети [6]. Описываемые режимы обеспечивают возможность сглаживания пиковой мощности в период больших нагрузок [7].

Преимущества электромобилей с поддержкой V2G обуславливаются тем, что они обеспечивают возможность регулирования частоты, поддержки напряжения и стабильности работы сети [8, 9]. Режим V2G позволяет электромобилю поставлять электроэнергию от аккумулятора в энергосистему [10]. Однако он не ограничивается только выдачей активной мощности в сеть от аккумулятора. Этот режим также позволяет выдавать определенное количество реактивной мощности [11].

Для реализации режима G2V аккумуляторная батарея должна быть подключена к сети с помощью бортового или внешнего оборудования [2, 3]. Для работы системы в режиме G2V необходимо распределение зарядных станциях для электромобилей в соответствие с имеющимися мощностями энергосистемы [12]. В зависимости от способа заряда и емкости аккумулятора заряд может осуществляться с разной скоростью [13]. Использование аккумуляторов электромобилей для хранения и выдачи энергии является перспективным направлением в переходе к более гибкой и адаптивной энергетической системе.

В [14] исследованы топологии двунаправленного преобразователя *V2G* для передачи энергии. На основе преобразователя с односторонним первичным индукторным модулем с улучшенными характеристиками было показано, что двунаправленное зарядное устройство для аккумуляторов обеспечивает эффективную зарядку транспортных средств с аккумуляторами напряжением 48 В и 120 В. В [15] приведены экспериментальные результаты, касающиеся двунаправленной работы и более легкого переключения для повышения производительности системы. В [16] исследуются вопросы коррекции коэффициента мощности, регулирования напряжения и динамического регулирования с помощью интегрированного зарядного устройства вместе с адаптивным контроллером скользящего режима. Предложенные алгоритмы позволяют уменьшить провалы напряжения и обеспечить адаптивность работы. Результаты имитационного моделирования, полученные с помощью *Matlab/Simulink*, показали, что для высокоуровневого управления на основе состояния заряда интеллектуальных операций V2G и G2V применение контроллера скользящего режима более эффективно, чем контроллера конечного времени.

В [17] представлен подход к быстрому переключению между прямым и обратным направлением потока мощности для двойных активных мостов, которые улучшают переходный отклик во время скачков мощности для DC-DC-преобразователей. В этой статье представлено трехфазное двунаправленное зарядное устройство, которое может работать как в режимах G2V, так и V2G. Описываемое исследование направлено на решение задачи улучшения двунаправленной бортовой зарядки электромобилей с акцентом на оптимизацию функций управления V2G и G2V. Оно заключается в разработке стратегии оптимальной зарядки на основе активного выпрямителя, обеспечивающей максимальную эффективность, надежность, а также интеграцию электромобилей с сетью.

II. Режимы работы

Работа в режиме G2V

Режим G2V предполагает заряд аккумулятора электромобиля. В этом режиме выпрямители с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) обеспечивают преобразование переменного тока в постоянный.

Аккумулятор может заряжаться в режиме постоянного тока, постоянного напряжения или импульсном режиме. Глубина заряда или скорость, с которой заряжается аккумулятор, фактически зависят от состояния аккумулятора. Следовательно, важным является определение метода заряда: постоянным током или постоянным напряжением. В случае существенного разряда аккумулятора используется метод постоянного тока. Но как только напряжение аккумулятора достигает порогового значения, установленного зарядным устройством, заряд осуществляется при режиме постоянного напряжения [18]. Структурная схема преобразователя для реализации режима G2V приведена на рис. 1.

В режиме заряда (рис. 1) аккумулятор получает энергию от сети. При заряде постоянным током выходное напряжение преобразователя постоянного тока можно регулировать в соответствии с уровнем заряда аккумулятора аккумулятора. С другой стороны, в режиме заряда постоянным током преобразователь постоянного тока регулирует выходной ток в соответствии с установленной скоростью, с которой аккумулятор должен заряжаться. В выпрямителе с ШИМ напряжение звена постоянного тока больше максимального значения напряжения линейной сети. Следовательно, преобразователь постоянного тока должен понижать напряжение, а также обеспечивать синусоидальный ток с единичным коэффициентом мощности.



Рис. 1. Структурная схема работы в режиме *G2V* Fig. 1. Structural circuit of operation in G2V mode

Работа в режиме V2G

Процесс V2G способствует сглаживанию пиков нагрузки в энергосистеме, обеспечивает возможность компенсации реактивной мощности. В этом режиме в сеть может выдаваться как активная, так и реактивная мощность. Для реализации такого режима работы необходим инвертор. Кроме того, в этом режиме для каждого распределенного источника необходимо согласовать фазу, частоту и напряжение источника с сетью.

Протокол V2G, в котором инвертор является основной частью, модулирует мощность и фазу в соответствии с частотой в инверторе. При этом напряжение в звене постоянного тока должно непрерывно контролироваться. Обычно, его значение ниже максимального напряжения полностью заряженной аккумуляторной батареи. Следовательно, напряжение батареи должно быть повышено. Кроме того, разряд аккумуляторной батареи не должен быть ниже допустимого значения.

Таким образом, в режиме работы V2G преобразователь постоянного тока является связующим звеном между инвертором и батареей [19] (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема работы в работе V2G Fig. 2. Structural diagram of work in V2G work

Переходные процессы в рассматриваемых режимах

Реализация режима V2G осуществляется путем подачи постоянного тока от батареи на инвертор, который преобразует его в переменный, после чего мощность подается в сеть. Инвертор отслеживает состояние сети и минимизирует колебания электроэнергии. Напротив, в режиме G2V поток мощности идет от сети к электромобилю. При этом аккумуляторная батарея электромобиля заряжается от трехфазной сети. Мощность передается от сети к инвертору, который работает как выпрямитель. Общая структурная схема системы сопряжения электромобиля с сетью приведена на рис. 3.



Рис. 3. Общая структурная схема системы сопряжения электромобиля с сетью Fig. 3. General structural diagram of the vehicle-network interface system

Переход от режима V2G к режиму G2V и обратно является сложным процессом, требующим контроля многих параметров. Для сети: последовательность фаз, частота и амплитуда линейного напряжения. Для батареи: напряжение, ток, температура, а также состояние заряда [7, 11, 18, 20, 21]. Результатом управления будет являться выдача мощности в зависимости от уровня заряда батареи.

III. Разработка решений

Инвертор моделируется как трехфазный инвертор с двумя силовыми электронными переключателями (обычно *IGBT*) для обеспечения плавного перехода между режимами. Состав инвертора остается неизменным в обоих режимах работы (рис. 1 и 2). Изменения, внесенные в силовые электронные переключатели, обеспечивают управление потоком мощности в любом направлении. В процессе необходимо постоянно контролировать напряжения сети с целью обеспечения синхронизации работы инвертора с сетью. При этом инвертор функционирует как выпрямитель в режиме G2V и как инвертор в режиме V2G.

Методология управления включает получение значений напряжения и тока сети и их учет при преобразовании в опорную систему dq из abc для регулирования потребностей системы в активной и реактивной мощности. Процедура регулирования заключается в изменении значений I_d и I_q для обеспечения передачи активной и реактивной мощности.

В режиме V2G система управления поддерживает активную мощность, и обеспечивает ее изменение, поддерживая постоянное напряжение звена постоянного тока на стороне инвертора. В режиме G2V выпрямитель преобразовывает напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока. Правила интеграции сети требуют, чтобы гармоники тока и разность фаз между током и напряжением поддерживались как можно ниже. Стратегия управления напряжением может быть иллюстрирована при помощи рис. 4.

Система синхронизируется путем управления напряжением оси q таким образом, чтобы оно было равно нулю [8, 9]. При этом мощность может передаваться в обоих направлениях, либо от трехфазного преобразователя мощности к батарее, либо от батареи к трехфазному преобразователю мощности.

Преобразователь постоянного тока в переменный, используемый для двунаправленного потока мощности от аккумулятора электромобиля к сети, должен на выходе поддерживать постоянное напряжение и ток.

Фильтрующий индуктор и конденсатор выбираются в зависимости от допустимых значений пульсации тока и напряжения в системе.

Параметры коммутационного индуктора L_{DC} и конденсатора C_{DC} на этапе преобразования постоянного тока рассчитывается как:

$$L_{DC} = \frac{U_{DC} \cdot \left(U_B - U_{DC}\right)}{3 \cdot f_{vv} \cdot U_B}; \tag{1}$$

$$C_{DC} = \frac{I_{ripple}}{8 \cdot f_{sv} \cdot U_{R}}.$$
 (2)

где U_{DC} – это выходное напряжение на звене постоянного тока на выводах инвертора; U_B – входное напряжение на выводах аккумуляторной батареи электромобиля; f_{sw} – частота переключений; I_{ripple} – пульсация тока.



Рис. 4. Структурная схема управления трехфазным входным преобразователем

Fig. 4. Structural control diagram of a three-phase input converter

IV. Имитационное компьютерное моделирование

Для исследования работы двунаправленной зарядной станции электромобилей мощностью 10 кВт разработана имитационная модель с использованием *Matlab/Simulink*.

Функциональная блок-схема имитационной модели приведена на рис. 5. Имитационная модель создана с использованием стандартных блоков из библиотек Simscape Electrical и SimPowerSystems в среде Matlab/Simulink.



Рис 5. Функциональная блок-схема имитационной компьютерной модели в Matlab/Simulink

Fig. 5. Functional block diagram for the study in Matlab/Simulink

Модель состоит из следующих основных блоков:

- трехфазного источника;
- двунаправленного трехфазного входного преобразователя, предназначенного для преобразования переменного тока в постоянный;
- управляемого источника напряжения;
- блока литий-ионного аккумулятора;
- блоков датчика тока и датчика напряжения, необходимых для измерения тока и напряжения во всей системе;
- блока, оценивающего уровень заряда аккумулятора (SoC).

Параметры системы и параметры литий-ионной батареи приведены в табл. 1.

Преобразователь переменного тока в постоянный / постоянного тока в переменный (двунаправленный ШИМ-инвертор) работает с использованием метода управления, ориентированного на напряжение. При этом контролируется активная мощность, поступающая от преобразователя в сеть. Обеспечивается плавный переход из режима V2G в режим G2V и обратно. Для такого режима получены значения коэффициентов пропорционального усиления K_p и интегрального усиления K_i для всех преобразователей, работающих в замкнутом контуре с режимами V2G и G2V (табл. 2).

V. Результаты моделирования

С помощью имитационной модели проведены исследования работы в режимах G2V и V2G. В режиме G2V опорный ток аккумулятора должен иметь отрицательное значение. В этом режиме инвертор работает как выпрямитель с ШИМ и поддерживает напряжение звена постоянного тока на опорном значении.

Таблица 1. Конфигурация системы

Table 1. System configuration

Параметр	Значение	
Система		
Напряжение в линии питания	415 B	
Частота в линии питания <i>f</i> _c	50 Гц	
Индуктивность фильтра L	5 мГн	
Емкость фильтра С	30 мкФ	
Частота переключения <i>f</i> _{sw}	10 кГц	
Напряжение на шине постоянного тока U _{dc}	800 B	
Батарея		
Номинальное напряжение	360 B	
Напряжение при полном заряде	419 B	
Напряжение отключения	270 B	
Начальное состояние заряда	50 %	
Внутреннее сопротивление	0,012 Ом	
Номинальная мощность	300 Ач	
Время отклика батареи	1 c	
Номинальный ток разряда	130,4 A	

Таблица 2. Значения ПИ-регулятора

Table 2. PI-controller values

Конвертер	AC - DC	DC-AC
Пропорциональный коэффициент усиления Кр	0,5	0,005
Интегральный коэффициент усиления <i>К</i> _i	5	10

Поскольку напряжение звена постоянного тока выше максимального напряжения аккумулятора, преобразователь постоянного тока должен работать как понижающий преобразователь (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что напряжение сети синусоидальное с пиком, равным 338,8 В. Гармоники со стороны инвертора блокируются *LCL*-фильтром и не передаются в сеть. Искажения в сети отсутствуют. На рис. 6 также приведена диаграмма тока, который выдается в сеть. Значение тока составляет 23,4 А с общим коэффициентом гармонических искажений (*THD*) менее 5 %.



Рис. 6. Сетевое напряжение U_{abc} (а) и ток I_{abc} (б) в режиме G2VFig. 6. Mains voltage U_{abc} (a) and current I_{abc} (b) in G2V mode

На рис. 7 а показаны уровень заряда аккумулятора (SoC), напряжение на клеммах и ток аккумулятора в режиме G2V. Для снижения потерь и поддержания температурного режима, максимальный ток заряда аккумулятора ограничивается 30 А. Из рис. 7 а видно, что пульсация постоянного напряжения на клеммах аккумулятора минимальна.

ПИ-регулятор поддерживает значение тока заряда аккумулятора электромобиля постоянным. Как показано на рис. 7 а, двунаправленный преобразователь постоянного тока в переменный работает как повышающий преобразователь, увеличивая входное напряжение батареи на примерно с 387 до 800 В. Уровень заряда батареи поддерживается на значении 50 %, что обеспечивает заряд аккумулятора. Ток для периода разряда поддерживается на уровне 30 А.

Диаграммы уровня заряда аккумулятора, напряжения и тока в режиме V2G представлены на рис. 7 б. Анализ результатов показывает, что схема управления работой преобразователя обеспечивает требуемые характеристики.

Из рис. 8 видно, что трехфазные напряжение и ток сдвинуты по фазе на 120 ° относительно друг друга.

Максимальные амплитуды тока для всех трех фаз составляют 23,4 А. Двунаправленное преобразование постоянного тока в переменный ток обеспечивает повышения входного напряжения инвертора.



Рис. 7. Уровень заряда, ток аккумулятора и напряжение в режиме *G2V* (а) и *V2G* (б)

Fig. 7. Battery SoC, current and voltage in G2V mode (a) and V2G mode (b)



Рис. 8. Сетевое напряжение U_{abc} (а) и ток I_{abc} (б) в режиме V2GFig. 8. Mains voltage U_{abc} (а) and current I_{abc} (b) in V2G mode

На рис. 9 показаны диаграммы тока и напряжения при переходе из режима *G2V* в *V2G*.





Fig. 9. Mains voltage and mains current when switching from G2V to V2G mode

Из результатов моделирования видно, что при использовании принятой схемы управления переходы между режимами осуществляются плавно. Анализ результатов показывает, что существует минимальное изменение выходных линейных напряжений со стороны сети, при этом схема управления позволяет обеспечить выходное напряжение на уровне напряжения сети большую часть времени. Более того, разность фаз линейного тока в сети проявляется в сдвиге фаз относительно напряжения: в режиме G2V в противофазе, а в режиме V2G синхронно (рис. 9).

На рис. 10 изображены переходные процессы в зарядной сети в момент перехода из режима *G2V* в режим *V2G*.



Рис. 10. Уровень заряда, ток аккумулятора и напряжение при переходе из режима *G2V* в режим *V2G*



В начале заряда, при подаче мощности, напряжение и ток стабилизируются. В момент перехода из режима заряда в режим передачи мощности в сеть наблюдаются колебательные процессы, которые подавляются ПИ-регулятором. При этом значение тока аккумулятора остается на уровне 30 А в обоих режимах. Таким образом ПИ-регулятор поддерживает постоянный ток заряда-разряда аккумулятора при постепенном изменении состояния заряда аккумулятора.

На рис. 11 приведен график изменения напряжения от времени перехода из режима G2V в режим V2G. При переходе из режима G2V в режим V2G наблюдаются характерные изменения напряжения постоянного тока.



Рис. 11. Напряжение постоянного тока при переходе из режима G2V в режим V2G

Fig. 11. DC voltage when switching from G2V to V2G mode

В момент переключения (t = 0,025...0,075 с) напряжение падает с 800 В до 765 В ($\Delta V = 4,35$ %). На интервале t = 0,5...0,65 с наблюдается повышение напряжения до 872 В ($\Delta V = +9,0$ %). В течение времени t = 0,9 с напряжение возвращается к номинальному значению (800 В).

Динамические искажения напряжения при переходе G2V-V2G обусловлены инерционностью системы и одновременным обеспечением быстродействия и устойчивости управления. Резкое изменение направления мощности вызывает задержку в переключении ключей инвертора (~20...25 мс). Компенсаторная реакция ПИ-регулятора на провал заключается в увеличении коэффициента усиления ($K_p = 0.8$; $K_i = 100$).

При этом длительность сигнала во время перехода режимов достаточно мала, что свидетельствует о правильной настройке ПИ-регулятора.

VI. Выводы

В статье представлен двухступенчатый подход к преобразованию мощности, объединяющий трехфазный активный выпрямитель и двунаправленный *buck-boost* преобразователь, обеспечивающий эффективное управления напряжением шины постоянного тока 800 В и током батареи. Упрощенная стратегия управления в системе координат *dq* обеспечивает регулирование параметров как в режимах заряда (G2V), так и разряда (V2G), демонстрируя гибкость и надежность системы. Результаты моделирования в *Matlab/Simulink* подтвердили работоспособность предложенного решения для зарядного устройства мощностью 10 кВт, включая стабильность напряжения шины, точность управления током батареи и сохранение качества электроэнергии при передаче. По результатам моделирования доказано, что при использовании принятой схемы управления переходы между режимами G2V и V2G происходят без образования импульсов. Метод управления, ориентированный на напряжение, обеспечивает двунаправленное преобразование переменного тока в постоянный. Динамические искажения напряжения при переходе G2V-V2G обусловлены инерционностью системы и одновременным обеспечением быстродействия и устойчивости управления. Результаты подтверждают актуальность применения адаптивных алгоритмов для снижения длительности переходных процессов в интеллектуальных сетях.

> © Сидоров Б.Н., 2025 © Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил, 2025

> > Поступила в редакцию 04.04.2025 Принята к публикации 10.06.2025 Received 04.04.2025 Accepted 10.06.2025

Библиографический список

- [1] Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил, Юшкевич У.К. Сравнительный анализ односторонних и двусторонних зарядных станций для электромобилей: особенности функционирования, инфраструктура, проблемы и пути их решения // Международный технический журнал. 2024. № 3 (90). С. 16-31. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [2] Monteiro V., Pinto J.G., Afonso J.L. Improved vehicle-for-grid (iV4G) mode: Novel operation mode for EVs battery chargers in smart grids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. № 110 (5). P. 579-587. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.049
- [3] Awad M., Ibrahim A.M., Alaas Z.M., El-Shahat A., Omar A.I. Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm // Frontiers in Energy Research. 2022. № 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.969482
- [4] Jiang J., Bao Y., Wang L.Y. Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid // Energies. 2014. № 7 (8). P. 4858-4894. DOI: 10.3390/en7084858
- [5] N.V. V.K., T. GM. A comprehensive survey on reduced switch count multilevel inverter topologies and modulation techniques // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2023. № 10 (1). DOI: 10.1186/s43067-023-00071-8
- [6] Gurugubelli V., Ghosh A., Panda A.K. Parallel inverter control using different conventional control methods and an improved virtual oscillator control method in a standalone microgrid // Protection and Control of Modern Power Systems. 2022. № 7 (1). P. 1-13. DOI: 10.1186/s41601-022-00248-9
- [7] Sivapriyan R., Umashankar S. Comparative analysis of PWM controlling techniques of single phase Z-source inverter // Indian Journal of Science and Technology. 2016. № 9 (26). P. 1-5. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i26/92210
- [8] Jia Z., Chen L. Design of a bidirectional power interface for V2G technology with smaller DC-link capacitance // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2014. № 3 (1). P. 104-110. DOI: 10.12720/sgce.3.1.104-110
- [9] Han J., Zhou X., Lu S., Zhao P. A three-phase bidirectional grid-connected AC/DC converter for V2G applications // Journal of Control Science and Engineering. 2020. № 2020 (2). P. 1-12. DOI: 10.1155/2020/8844073
- [10] Liu S., Xie X., Yang L. Analysis, modeling and implementation of a switching bidirectional buck-boost converter based on electric vehicle hybrid energy storage for V2G system // IEEE ACCESS. 2020. № 8. P. 65868-65879. DOI: 10.1109/AC-CESS.2020.2985772
- [11] Raherimihaja H.J., Zhang Q., Xu G., Zhang X. Integration of battery charging process for EVs into segmented three-phase motor drive with V2G-mode capability // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. № 68 (4). P. 2834-2844. DOI: 10.1109/TIE.2020.2978684
- [12] Pany P., Singh R.K., Tripathi R.K. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2011. № 3 (3). DOI:10.4314/ijest.v3i3.68426
- [13] Rashid M.H. Power electronics handbook. New York: Butterworth-Heinemann, 2017. – 1522 p.
- [14] Panchanathan S., Vishnuram P., Rajamanickam N., Bajaj M., Blazek V., Prokop L., Misak S. A comprehensive review of the bidirectional converter topologies for the vehicle-to-grid system // Energies. 2023. № 16 (5). DOI: 10.3390/en16052503
- [15] Yuan J., Dorn-Gomba L., Callegaro A.D., Reimers J., Emadi A. A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles // IEEE ACCESS. 2021. № 9. P. 51501-51518. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069448
- [16] Lu Z., Zhang X. Composite non-linear control of hybrid energy-storage system in electric vehicle // Energies. 2022. № 15 (4). DOI: 10.3390/en15041567
- [17] Boya A.K., Batchalakura J. A novel quadruple active bridge DC converter with reduced inductor current for EV battery charging // Advances in Electrical and Electronic Engineering. 2023. № 21 (2). P. 92-106. DOI: 10.15598/aeee.v21i2.4646
- [18] Rachid A., El Fadil H., Giri F. Dual stage CC-CV charge method for controlling DC-DC power converter in BEV charger // 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), May 02-07, 2018, Marrakech, Morocco: IEEE, 2018. P. 74-79. DOI: 10.1109/MELCON.2018.8379071
- [19] Upputuri R.P., Subudhi B. A comprehensive review and performance evaluation of bidirectional charger topologies for V2G/G2V operations in EV applications // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2024. № 10 (1). P. 583-595. DOI: 10.1109/TTE.2023.3289965
- [20] Wang Z., Zhang Y., You S., Xiao H., Cheng M. An integrated power conversion system for electric traction and V2G operation in electric vehicles with a small film capacitor // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. № 35 (5). P. 5066-5077. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944276
- [21] Khalid H.M., Peng J.C.H. Bidirectional charging in V2G systems: An in-cell variation analysis of vehicle batteries // IEEE Systems Journal. 2020. № 14 (3). P. 3665-3675. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2958967

References

- Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil and U.K. Yushkevich, "Comparative analysis of one-way and two-way charging stations for electric vehicles: infrastructure, challenges and opportunities", *International Technical Journal*, vol. 3, no. 90, pp. 16-31, 2024. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [2] V. Monteiro, J.G. Pinto and J.L. Afonso, "Improved vehicle-for-grid (iV4G) mode: Novel operation mode for EVs battery chargers in smart grids", *International Journal* of Electrical Power & Energy Systems, vol. 110, no. 5, pp. 579-587, Sep. 2019. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.049
- [3] M. Awad, A.M. Ibrahim, Z.M. Alaas, A. El-Shahat and A.I. Omar, "Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm", *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Aug. 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.969482
- [4] J. Jiang, Y. Bao and L.Y. Wang, "Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid", *Energies*, vol. 7, no. 8, pp. 4858-4894, Jul. 2014. DOI: 10.3390/en7084858
- [5] V.K. N.V. and GM. T., "A comprehensive survey on reduced switch count multilevel inverter topologies and modulation techniques", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 10, no. 1, Jan. 2023. DOI: 10.1186/s43067-023-00071-8
- [6] V. Gurugubelli, A. Ghosh and A.K. Panda, "Parallel inverter control using different conventional control methods and an improved virtual oscillator control method in a standalone microgrid", *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, Dec. 2022. DOI: 10.1186/s41601-022-00248-9
- [7] R. Sivapriyan and S. Umashankar, "Comparative analysis of PWM controlling techniques of single phase Z-source inverter", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 26, pp. 1-5, Jul. 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i26/92210
- [8] Z. Jia and L. Chen, "Design of a bidirectional power interface for V2G technology with smaller DC-link capacitance", *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 104-110, Jan. 2014. DOI: 10.12720/sgce.3.1.104-110
- [9] J. Han, X. Zhou, S. Lu and P. Zhao, "A Three-Phase Bidirectional Grid-Connected AC/DC Converter for V2G Applications", *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2020, no. 2, pp. 1-12, Sep. 2020. DOI: 10.1155/2020/8844073
- [10] S. Liu, X. Xie and L. Yang, "Analysis, modeling and implementation of a switching bi-directional buck-boost converter based on electric vehicle hybrid energy storage for V2G system", *IEEE ACCESS*, vol. 8, pp. 65868-65879, Apr. 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985772
- [11] H.J. Raherimihaja, Q. Zhang, G. Xu and X. Zhang, "Integration of battery charging process for EVs into segmented three-phase motor drive with V2G-mode capability", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 4, pp. 2834-2844, Mar. 2020. DOI: 10.1109/TIE.2020.2978684
- [12] P. Pany, R.K. Singh and R.K. Tripathi, "Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system", *International Journal of Engineering, Science and Technol*ogy, vol. 3, no. 3, Jul. 2011. DOI:10.4314/ijest.v3i3.68426
- [13] M.H. Rashid, *Power electronics handbook*. New York: Butterworth-Heinemann, 2017.

- [14] S. Panchanathan, P. Vishnuram, N. Rajamanickam, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop and S. Misak, "A comprehensive review of the bidirectional converter topologies for the vehicle-to-grid system", *Energies*, vol. 16, no. 5, Mar. 2023. DOI: 10.3390/en16052503
- [15] J. Yuan, L. Dorn-Gomba, A.D. Callegaro, J. Reimers and A. Emadi, "A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles", *IEEE ACCESS*, vol. 9, pp. 51501-51518, Mar. 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069448
- [16] Z. Lu and X. Zhang, "Composite non-linear control of hybrid energy-storage system in electric vehicle", *Energies*, vol. 15, no. 4, 2022. DOI: 10.3390/en15041567
- [17] A.K. Boya and J. Batchalakura, "A novel quadruple active bridge DC converter with reduced inductor current for EV battery charging", *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 92-106, Mar. 2023. DOI: 10.15598/aeee.v21i2.4646
- [18] A. Rachid, H. El Fadil and F. Giri, "Dual stage CC-CV charge method for controlling DC-DC power converter in BEV charger", in proc. 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), May 02-07, 2018, Marrakech, Morocco, pp. 74-79. DOI: 10.1109/MELCON.2018.8379071
- [19] R.P. Upputuri and B. Subudhi, "A comprehensive review and performance evaluation of bidirectional charger topologies for V2G/G2V operations in EV applications", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 1, pp. 583-595, Mar. 2024. DOI: 10.1109/TTE.2023.3289965
- [20] Z. Wang, Y. Zhang, S. You, H. Xiao and M. Cheng, "An integrated power conversion system for electric traction and V2G operation in electric vehicles with a small film capacitor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 5066-5077, Sep. 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944276
- [21] H.M. Khalid and J.C.H. Peng, "Bidirectional charging in V2G systems: An in-cell variation analysis of vehicle batteries", *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3665-3675, Sep. 2020. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2958967

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сидоров Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Москва, Российская Федерация. Аль-Мохаммелави Али Лжбер Мшкил, аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Москва. Российская Федерация; ассистент преподавателя Университета Майсан, Майсан, Ирак.

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

Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, postgraduate student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation; assistant of the University of Maysan, Maysan, Iraq. УДК 621.314

EDN PHNVYH

О ЦИФРОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСТАНЦИИ 10/0,4 кВ

А.В. Иванов

ORCID: 0000-0001-7360-5930 e-mail: iv_anton95@mail.ru НТЦ ЕЭС Информационные комплексы *Москва, Россия*

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

Переход от традиционной к интеллектуальной электрической сети (ИЭС) связан с интеграцией электрической и информационной сетей и требует решения проблемы обеспечения информационного взаимодействия интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и систем автоматизированного управления. Статья посвящена решению проблемы информационного взаимодействия ИЭУ на примере автоматизированного проектирования высокоавтоматизированной подстанция (ВАПС). ВАПС – электротехнический комплекс ИЭС, где для организации управления технологическими процессами используются стандартизированные МЭК информационные модели и цифровой информационный обмен. Разработан алгоритм унифицированного представления однолинейной схемы ВАПС. При этом выявлена необходимость в создании методики расширения стандартизированной Международной электротехнической комиссией (МЭК) *СІМ*-модели (*СІМ* – *Соттоп Information Model*). Дано краткое описание *СІМ*-модели как технологии, реализующей информационное взаимодействие. Рассмотрены подходы к расширению *СІМ*-модели, виды расширений и основные правила.

Ключевые слова: высокоавтоматизированная подстанция, СІМ-модель, SCL, цифровое проектирование, алгоритм, интеллектуальная электрическая сеть

Для цитирования: Иванов А.В., Соснина Е.Н. К вопросу цифрового проектирования высокоавтоматизированной подстанции 10/0,4 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 112-121. EDN PHNVYH

ABOUT DIGITAL DESIGN OF HIGHLY AUTOMATED 10/0,4 kV SUBSTATION

A.V. Ivanov

ORCID: 0000-0001-7360-5930 e-mail: iv_anton95@mail.ru STC UPS Information complexes Moscow, Russia

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A digital substation (DS) is an electrotechnical component of a Smart Grid. The transition to a Smart Grid involves the integration of electrical and information networks, which necessitates addressing the issue of interoperability between intelligent electronic devices (IEDs) and automation systems. To this end, the authors set out to develop an algorithm for the unified representation of the DS single-line diagram. During the development of this algorithm, the need for a methodology to extend the Common Information Model (CIM), standardized by the International Electrotechnical Commission (IEC), was identified. The article provides a brief overview of the CIM as a technology for enabling interoperability. It also outlines possible approaches to extending the CIM, the types of extensions, and the key rules for their implementation.

Keywords: digital substation, CIM, SCL, digital design, algorithm, smart grid.

For citation: A.V. Ivanov and E.N. Sosnina, "About digital design of highly automated 10/0,4 kV substation", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 112-121, 2025. EDN PHNVYH

I. Введение

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития России является высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика. Для данного направления критически важными технологиями являются высокоэффективные системы генерации, распределения и хранения энергии [1]. Сама электроэнергетическая система должна трансформироваться из централизованной в централизованно-распределенную и объединить на базе цифровизации технологическую, управляющую и рыночную системы [2].

На уровне энергообъектов трансформация может быть представлена как переход от электрических подстанций (ПС) традиционной электрической сети к высокоавтоматизированным электрическим подстанциям (ВАПС) интеллектуальной электрической сети (ИЭС). Одной из главных особенностей ИЭС является интеграция электрической и информационной сетей [3]. Для перехода к ИЭС должна быть сформирована единая цифровая информационная среда, объединяющая множество интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и систем автоматизированного управления [4]. Если не использовать единые подходы к организации информационного взаимодействия, то сложность объединения с каждым добавляемым в информационную среду ИЭУ или с системой кратно возрастает. Поэтому вопросы структурирования данных, формата их представления и организации передачи необходимо учитывать уже на стадии проектирования.

Для информационной совместимости ИЭУ и систем автоматизации необходимо использовать стандартизированные подходы. Подходы по организации информационного взаимодействия приведены в серии стандартов МЭК 61850 и сериях 61970 и 61968, описывающих *CIM*-модель (*CIM* (*Common Information Model*) – это общая информационная модель, описывающая ключевые элементы энергосистемы, их характеристики и взаимосвязи) [5, 6].

ВАПС – подстанция, на которой для организации управления технологическими процессами и реализации взаимодействия вторичных систем используются стандартизированные МЭК информационные модели и цифровой информационный обмен. При организации проектирования ВАПС типовым проектным документом является ее однолинейная схема. Согласно требованиям МЭК 61850 для представления данных об однолинейной схеме ВАПС (единицы электрооборудования и их гальванические соединения) должен использоваться язык разметки SCL (System Configuration Language) [7], благодаря которому данные однолинейной схемы могут быть обработаны автоматически.

Однако, в соответствии с [8], в основе цифровой информационной модели ИЭС лежит *СІМ*-модель, где для возможности автоматической обработки данных об однолинейной схеме используется *RDF/XML* (*RDF* – *Resource Description Framework* – структура описания ресурсов; *XML* – *eXtensible Markup Language* – расширяемый язык разметки) [9].

Для учета требований [7-9] была поставлена цель: разработать алгоритм унифицированного представления однолинейной схемы ВАПС для информационного обмена в составе проектной системы ВАПС.

На рис. 1 дано схематичное представление связи проектной системы ВАПС с информационными моделями МЭК 61850 и *СІМ*-модели.



Рис. 1. Схематичное представление связи проектной системы ВАПС с информационными моделями МЭК 61850 и *СІМ*-модели

Fig. 1. Schematic representation of the relation between the digital substation design system and the IEC 61850 and CIM

При разработке алгоритма представления однолинейной схемы ВАПС (рис. 2) возникла необходимость в методике расширения стандартной *СІМ*-модели [4] (здесь и далее под словосочетанием «стандартная *СІМ*-модель» будет подразумеваться *СІМ*-модель, разработанная МЭК. Соответственно содержащиеся в ней классы, атрибуты и ассоциации также считаются «стандартными»).

Было выявлено, что используемый в рамках ГОСТ подход к расширению *СІМ*-модели отличается от подхода, принятого МЭК. Расширения, сделанные в рамках ГОСТ, редактируют стандартную *СІМ*-модель, что недопустимо. В результате существенно усложняется задача автоматизированного обновления версии используемой в российских системах автоматизации стандартной *СІМ*-модели (при выпуске МЭК обновленной версии стандартной *СІМ*-модели).

П. Краткое описание СІМ-модели

СІМ-модель – стандартизированная МЭК семантическая информационная модель, описывающая данные, используемые автоматизированными системами для управления и анализа состояния электроэнергетической системы (например, расчет установившихся режимов). Термин «семантическая» означает, что информационная модель, помимо структурирования данных, также регламентирует их смысл.

CIM-модель использует объектно-ориентированный подход, т.е. фактически является совокупностью классов, их атрибутов и связывающих их ассоциаций, которые описывают:

- электроустановки и электрооборудование (электрические ПС, трансформаторы, линии электропередачи и др.);
- электрические аппараты (выключатели, разъединители и др.);

- электрические соединения;
- электроустановки и электрооборудование (электрические ПС, трансформаторы, линии электропередачи и др.);
- электрические аппараты (выключатели, разъединители и др.);
- электрические соединения и др.



Рис. 2. Алгоритм представления однолинейной схемы ВАПС с учетом требований МЭК 61850, 61970 и 61968

Fig.2. Algorithm for representing the digital substation single-line diagram considering the requirements of IEC 61850, 61970, and 61968

Для визуального представления *CIM*-модели используется *UML*-диаграммы классов (*UML-Unified Modeling Language* – унифицированный язык моделирования).

На рис. 3 в качестве примера представлена часть стандартной *CIM*модели: классы *Substation* и *VoltageLevel* и связь между ними. С помощью класса *Substation* может быть представлена ПС, а с помощью *VoltageLevel* – распределительные устройства (РУ). Связь показывает, что при цифровом моделировании у ПС может быть указано множество РУ, а у каждого РУ – должна быть указана ПС. Класс *VoltageLevel* содержит два атрибута – *highVoltageLimit* и *lowVoltageLimit*, используемые для хранения максимально и минимально допустимого для РУ напряжения.

Как видно из приведенного примера, смысл (семантика) данных задается через наименования классов, наименования атрибутов, расположения атрибутов и связи между классами.



Рис. 3. Часть стандартной CIM-модели (классы Substation и VoltageLevel)

Fig. 3. Part of standard CIM (Substation and VoltageLevel classes)

III. Подходы к расширению стандартной *CIM*-модели Виды расширений

При разработке расширений они должны быть явно отделены от стандартной *СІМ*-модели и идентифицированы собственным, уникальным пространством имен. Это необходимо для обеспечения «модульности» и, как результат, возможности автоматизировано перенести расширения в обновленную версию стандартной *СІМ*-модели. Можно выделить два подхода к расширению: через мультинаследование и через ввод нового подкласса. При первом подходе вводится новый класс, где содержится новый атрибут или с которым связана новая ассоциация. От этого нового класса наследуется стандартный класс (рис. 4).





Fig. 4. An example of CIM extension through multiple inheritance

При втором подходе через наследование от стандартного класса водится новый подкласс. Данный подкласс содержит новый атрибут или связан с новой ассоциацией (рис. 5).



Рис. 5. Пример расширения *CIM*-модели через ввод нового подкласса Fig. 5. An example of CIM extension through sub-typing class

При втором подходе создается риск конфликта при будущих расширениях, поэтому предпочтительным является первый подход.

Виды расширений и правила сведены в табл. 1.

Таблица 1. Виды расширений и правила

Table 1. Types of extensions and rules

Вид расширения	Мультинаследование	Основные правила
		Новый класс должен быть
Ввод нового класса	Не требуется	закреплен за отдельным
		пространством имен
Ввод ассоциации между		Ассоциация должна быть
новым и стандартным	Не требуется	направлена от нового класса
классом		к стандартному классу
Ввод нового		Новый (расширяющий) класс
атрибута в стандартный	Требуется	должен быть закреплен
класс		за отдельным пространством
		имен.
Ввод новой ассоциации		Новый (расширяющий) класс
между стандартными	Требуется	должен иметь такое же
классами		наименование,
		как и стандартный класс

IV. Выводы

При проектировании ВАПС должны учитываться требования международных стандартов МЭК 61850, 61970 и 61968. Это необходимо для обеспечения единой цифровой информационной среды ИЭС. Из-за разности используемых МЭК 61850 и *СІМ*-моделью форматов представления данных об однолинейной схеме становится актуальной разработка унифицирующего алгоритма. Алгоритм должен опираться на имеющиеся в *СІМ*-модели классы, атрибуты и ассоциации, предназначенные для моделирования электрооборудования и электроустановок.

Особенности российской электроэнергетики требуют разработки расширения стандартной *СІМ*-модели. Но добавление новых классов, атрибутов и ассоциаций должно выполняться так, чтобы расширения могли быть легко перенесены в обновленную версию стандартной *СІМ*-модели.

Выделены виды расширений. Для каждого вида указаны используемые подходы и основные правила выполнения. Дальнейшие исследования направлены на практическое применение рассмотренных подходов и правил.

Поступила в редакцию 12.05.2025 Принята к публикации 10.06.2025 Received 12.05.2025 Accepted 10.06.2025

Библиографический список

- [1] Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/
- [2] Подковальников С.В. Смена парадигмы управления электроэнергетическими системами // Электричество. 2024. №3. С. 4-15. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-4-15
- [3] Наумов В.А., Матисон В.А., Федоров Ю.Г. Новые направления развития стандартизации в процессе цифровой трансформации электроэнергетики // Энергия единой сети. 2022. № 3-4 (64-65). С. 20-29.
- [4] Иванов А.В., Соснина Е.Н. Об информационной составляющей интеллектуальной электрической сети а // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: сборник материалов XVI Всероссийской научнотехн. конф. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2025 (в печати).
- [5] Головинский И.А. Объектно-топологическое моделирование электрических сетей // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 16 – 26. DOI: 10.37493/2307-907X.2024.6.2
- [6] Черкасский П., Попов С. Риски применения электротехнических комплексов на основе СІМ-модели (МЭК 61970, МЭК 61968) в сетевом комплексе России // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 4 (31). С. 36 – 41.
- [7] ГОСТ Р МЭК 61850-6–2009. Изм. 1. Сети и системы связи на подстанциях Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2018-06. МЭК: 2018. – 274 с.
- [8] Федеральный закон от 11.06.2022 № 174-ФЗ. «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/
- [9] МЭК 61970-552. Интерфейс прикладных программ систем энергетического менеджмента (EMS-API) – Ч. 552: Обмен моделями в формате CIMXML. Введ. 2016-09. МЭК: 2016. – 76 с.

References

- [1] Order of the President of the Russian Federation dated June 18, 2024 no. 529 "Ob utverzhdenii prioritetnyh napravlenij nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya i perechnya vazhnejshih naukoemkih tekhnologij [On approval of priority directions of scientific and technological development and the list of the most important scienceintensive technologies]", Official Internet portal of legal information. [Online]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/ (in Russian).
- [2] S.V. Podkoval'nikov, "A shift of the electric power system control paradigm", *Electricity*, no. 3, pp. 4-15, Jan. 2024. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-4-15

- [3] V.A. Naumov, V.A. Matison and Y.G. Fedorov, "Novye napravleniya razvitiya standartizacii v processe cifrovoj transformacii elektroenergetiki [New directions of standardization development in the process of digital transformation of the electric power industry]", Energiya edinoj seti [Energy of a single grid], no. 3-4 (64-65), pp. 20-29, 2022 (in Russian).
- [4] A.V. Ivanov and E.N. Sosnina, "Ob informacionnoj sostavlyayushchej intellektual'noj elektricheskoj seti [On the information component of the smart grid]", in proc. Dinamika nelinejnyh diskretnyh elektrotekhnicheskih i elektronnyh system [Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems]: collection of materials XVI All-Russian Scientific and Technical Conf., Cheboksary, Russia, 2025. (in Russian).
- [5] I.A. Golovinskii, "Object-topological modeling of electrical networks", *Newsletter of North-Caucasus Federal University*, no. 6 (105), pp. 16-26, 2024. DOI: 10.37493/2307-907X.2024.6.2
- [6] P. Cherkassky and S. Popov, "Riski primeneniya elektrotekhnicheskih kompleksov na osnove CIM-modeli (MEK 61970, MEK 61968) v setevom komplekse Rossii [Risks of application of electrical complexes based on CIM-model (IEC 61970, IEC 61968) in the network complex of Russia]", Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution], no. 4 (31), pp. 36-41, 2023 (in Russian).
- [7] Substation communication networks and systems Part 6: Configuration description language for communication between intelligent electronic devices in electrical substations, GOST R MEC 61850-6-2009, June 2018.
- [8] Federal Law No. 174-FZ dated 11.06.2022. "O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon «Ob elektroenergetike» i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii. [On Amendments to the Federal Law «On Electric Power Industry» and Certain Legislative Acts of the Russian Federation]", *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/ (in Russian).
- [9] Energy Management Systems Application Program Interface (EMS-API) Part. 552: Model Exchange in CIMXML Format, IEC 61970-552, September 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Антон Валерьевич, старший аналитик НТЦ ЕЭС «Информационные комплексы», Москва, Российская Федерация.

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton V. Ivanov, senior analyst of STC UPS Information complexes, Moscow, Russian Federation.

Elena N. Sosnina, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332:621.316.728

EDN QCGPMP

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ В ТЯГОВОЙ СЕТИ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Л.А. Герман

e-mail: lagerman@mail.ru Нижегородский институт путей сообщения – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения» Нижний Новгород, Россия

В.А. Маралова

e-mail: maralova-v@mail.ru ОАО «РЖД». Горьковская дирекция по энергообеспечению Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена исследованию влияния поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с односторонним питанием. При раздельном питании тяговой сети контактная сеть работает консольно с питанием тяговой сети от одной подстанции или от двух, но с разделом на посту секционирования с введением нейтральной вставки. Выбор конкретного варианта схемы электроснабжения определяется технико-экономическими расчетами. Если введение нейтральной вставки не обеспечивает нормированный уровень напряжения, то включают установки поперечной емкостной компенсации. Предложены расчетные схемы и выполнены расчеты потерь напряжения и потерь мощности при различных схемах включения конденсаторных установок.

Ключевые слова: конденсаторная установка, контактная сеть, нейтральная вставка, поперечная емкостная компенсация, потери напряжения, потери мощности, пост секционирования, раздельное питание.

Для цитирования: Герман Л.А., Маралова В.А. Снижение потерь напряжения и потерь мощности конденсаторной установкой в тяговой сети с односторонним питанием // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 122-133. EDN QCGPMP

REDUCTION OF VOLTAGE LOSSES AND POWER LOSSES OF CAPACITOR UNIT IN TRACTION NETWORK WITH ONE-WAY POWER SUPPLY

L.A. German

e-mail: lagerman@mail.ru Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering – branch «Volga State University of Railway Engineering» Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Maralova

e-mail: maralova-v@mail.ru JSC «Russian Railways». Gorky directorate for energy supply Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of reactive power compensation in a traction network with a one-way supply. In the case of a separate supply of the traction network, the contact network operates as a console with the supply of the traction network from one or two substations, but with a section at the sectioning post with the introduction of a neutral link. The choice of a specific version of the power supply scheme is determined by technical and economic calculations. If the introduction of a neutral link does not provide a required voltage level, then reactive power compensation units are included. Calculation schemes are proposed and calculations of voltage losses and power losses are performed for various connection schemes of capacitor units.

Keywords: capacitor unit, contact network, neutral link, reactive power compensation, voltage losses, power losses, sectioning post, separate power supply.

For citation: L.A. German and V.A. Maralova, "Reduction of voltage losses and power losses of capacitor unit in traction network with one-way power supply", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 122-133, 2025. EDN QCGPMP

І. Введение

В ряде случаев при особых условиях работы системы внешнего электроснабжения необходимо выполнять раздельное питание тяговой сети, т.е. в этом варианте контактная сеть работает консольно [1, 2] с питанием тяговой сети от одной подстанции или от двух, но с разделом по посту секционирования (ПС). На отечественных железных дорогах таких межподстанционных зон (МПЗ) около 7 % [3], одна из причин – стыковка двух энергосистем у тяговой подстанции (ТП). В этом случае наблюдаются пониженное напряжение на токоприемниках и повышенные потери мощности в тяговой сети. Достаточно подробно о необходимости раздела питания на стыке двух энергосистем рассмотрено в [4]. Для исключения указанных недостатков была предпринята попытка [5] выполнить схему питания МПЗ с встречноконсольным питанием, установив на ПС пятый высоковольтный коммутационный аппарат (выключатель или контактор), осуществляющий раздел контактной сети по ПС, с его автоматическим включением при проходе токоприемника у ПС [6, 7]. Однако опыт эксплуатации [8] показал, что на двухпутном участке ресурс существующих высоковольтных выключателей на включение и отключение с шунтированием раздела контактной сети явно недостаточен, даже для вакуумных выключателей он составляет не более 50 тысяч переключений, а необходимо в несколько раз больше. Поэтому приходится раздел по ПС выполнять нейтральной вставкой (НВ) на контактной сети без автоматики ее шунтирования при проходе токоприемника.

Эксплуатационные требования к проходу НВ рассмотрены в [9]. При подходе к НВ установлен знак «выключить ток» и после прохода НВ (как правило, 200 м) для электровозов действует знак «включить ток». Однако при наличии поперечной емкостной компенсации – конденсаторной установки (КУ), повышающей уровень напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС) в МПЗ, можно исключить установку НВ, что недостаточно рассмотрено в существующей технической литературе. Таким образом, в статье показаны преимущества и недостатки включения НВ в схеме с разделом питания по ПС и предложены целесообразные точки включения КУ (у ПС и (или)в конце МПЗ) в этом случае.

Для расчетов использован метод равномерно распределенной нагрузки [1]: изменяющиеся во времени и по месту расположения нагрузки МПЗ заменяются равномерно распределенной нагрузкой, приходящейся на единицу длины (так называемая удельная нагрузка, А/км). Параметры удельной нагрузки рассчитаны в [1] в зависимости от расхода энергии в данной МПЗ. Конечно, результаты расчетов по этому методу будут всегда заниженными, однако этот метод часто оказывается весьма полезным при всевозможных быстрых расчетах и, главным образом, для определения не абсолютных значений, а относительных величин при изменении какого-либо параметра.

Для оценки технических возможностей установки КУ составим упрощенный вариант схемы замещения (рис. 1). Распределенная нагрузка в схеме замещения заменена на узловые токи у тяговых подстанций и ПС. На рис. 1 а схема замещения с двусторонним питанием без раздела по контактной сети, на рис. 1 б раздел по ПС с НВ. На рис. 1 в консольная тяговая сеть до отключенной смежной тяговой подстанции, НВ отсутствует.

На участке между тяговыми подстанциями ТП А и ТП В среднее значение суммарной равномерно распределенной нагрузки на участках от ТП до ПС равно (P+jQ)/U, где P – активная мощность, Q – реактивная мощность, U – среднее напряжение.



Рис. 1. Схемы замещения: системы электроснабжения с двусторонним питанием (а); встречно-консольной схемы питания с КУ и разделом по ПС (б); консольная схема питания с КУ (в)

Fig. 1. Equivalent circuits: power supply systems with two-way power supply (a); counter-console power supply circuit with a capacitor unit and a section by substation (b); console power supply circuit with a capacitor unit (B)

Таким образом, средние значения активной и реактивной мощности в схемах замещения равны:

$$P = \frac{W}{T}; \ \frac{P}{Q} = \operatorname{tg}\varphi;$$
$$P = S \cdot \cos\varphi; \ Q = S \cdot \sin\varphi,$$

где W – расход активной энергии на МПЗ за расчетный период T в кВт·ч; φ – фаза среднего значения тягового тока; S – полная мощность тяговой нагрузки на МПЗ. Принимаем для тяговой нагрузки $\cos \phi = 0.8$ и $\sin \phi = 0.6$, $P = S \cdot \cos \phi$, $Q = S \cdot \sin \phi$. Согласно [1], при использовании установок поперечной емкостной компенсации в расчетах принимается синусоидальная тяговая нагрузка.

II. Расчет потерь напряжения

Принимая нагрузки узлов по схемам замещения (рис. 1), зависящих от суммарной мощности МПЗ *P*+*jQ*, потери напряжения равны:

до ПС при двустороннем питании МПЗ и при разделе питания по ПС:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{4U};\tag{1}$$

- в конце контактной сети при консольном питании до смежной ТП:

$$\Delta U = 3\frac{PR + QX}{4U} + \frac{PR + QX}{4U}.$$
(2)

С учетом составного сопротивления тяговой сети:

$$Z_{\rm cocr} = R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi,$$

перепишем (1) и (2):

$$\Delta U = \frac{SZ_{\text{corr}}}{4U} = \frac{0.125SZ_{\text{corr}}}{U}; \tag{1a}$$

$$\Delta U = \frac{SZ_{\text{corr}}}{U}.$$
 (2a)

Таким образом, при встречно-консольной схеме питания потери напряжения в четыре раза меньше, чем при консольной схеме питания. Столь большие потери напряжения при консольной схеме питания объясняют известное решение принять встречно-консольную схему питания и установить нейтральную вставку у ПС [3].

По указанным формулам проведем расчеты по схемам замещения на рис. 1.

Решение задачи снижения повышенных потерь напряжения достигается включением регулируемой КУ (СГРМ) в тяговой сети на консоли

участка и/или у ПС [5]. Если мощности КУ на консоли и на ПС равны реактивным мощностям узлов, то потери напряжения от реактивных нагрузок узлов равны нулю. Поэтому в этом случае потери напряжения с КУ равны:

– при двусторонней схеме питания:

$$\Delta U = \frac{0.8SZ_{\text{corr}}}{4U} = \frac{0.2SZ_{\text{corr}}}{U};$$
(3)

при консольном питании:

$$\Delta U = \frac{0.8SZ_{\text{corr}}}{U}.$$
(4)

Результаты расчета потерь напряжения приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета потерь напряжения в тяговой сети

Table 1. Results of calculation of voltage losses in the traction network

Расчетная	ΔU без КУ		ΔU с КУ	
схема	до ПС	на консоли	до ПС	на консоли
параллельная	$0,25 \ S \cdot Z_{\text{coct}}/U$	-	$0,2 S \cdot Z_{\text{coct}}/U$	-
раздел по ПС	$0,25 \ S \cdot Z_{\text{coct}}/U$	-	$0,2 S \cdot Z_{\text{coct}}/U$	-
консоль	-	$S \cdot Z_{\text{coct}} / U$	-	$0,8 S \cdot Z_{\text{coct}}/U$

Важно добавить, что при увеличении мощности КУ можно достичь любых, в том числе нулевых, потерь напряжения. Таким образом, КУ решает проблему необходимого понижения потерь напряжения и, следовательно, обеспечивает работу контактной сети без установки нейтральной вставки у ПС.

Повышение напряжения в тяговой сети возможно и целесообразно выполнить и при одиночном включении КУ: или на ПС, или в конце консоли, причем уровень напряжения будет зависеть от мощности КУ.

III. Расчет снижения скорости при проходе тяжеловесного поезда HB

Как указано, проход НВ осуществляется на выбеге, поэтому важно знать, как снижается скорость тяжеловесного поезда при проходе НВ. С запасом считаем, что электровоз по НВ в режиме выбега проходит примерно 400 м. Тогда путь, проходимый ЭПС при изменении скорости от V₁ (при отключении тока перед заездом на HB) и до V₂ (при включении тока после съезда с НВ) под действием удельной замедляющей силы *w*_{ox} paвен [9, 10]:

$$\Delta l = \frac{500 \left(V_1^2 - V_2^2 \right)}{\zeta \, w_{\rm ox}} \, [{\rm M}], \tag{5}$$

где ζ – ускорение поезда в км/ч² при действии удельной замедляющей силы в 1 H/кН тяжеловесного поезда. В [10] для грузового поезда ζ = 120 км/ч².

В качестве примера принимаем для расчетов: $V_1 = 50$ км/ч, $V_2 = 48$ км/ч. Результат расчета по (5) свидетельствует, что скорость снижается незначительно — на 1,5 км/ч при проходе НВ на участке $\Delta l = 387$ м. Массовые расчеты показывают, что снижение скорости составляет не более 2...3 км/ч.

IV. Расчет потерь мощности в тяговой сети

Рассмотрим потери мощности в двух схемах: при разделе по ПС и в консольной схеме питания. Потери активной мощности в схемах с двусторонним питанием (рис. 1 а), а также для встречно-консольной схемы питания с разделом по ПС (рис. 1 б) равны:

$$\Delta P = \left(\frac{S}{2U}\right)^2 \cdot \frac{R}{2} = \frac{S^2 R}{8U^2} = \frac{0.125S^2 R}{U^2};$$
(6)

$$S^2 = P^2 + Q^2, (7)$$

где P = 0.8S, Q = 0.6S.

Для схемы с консольным питанием потери мощности равны:

$$\Delta P = \left(\frac{3S}{4U}\right)^2 \cdot R + \left(\frac{S}{4U}\right)^2 \cdot R = \frac{5S^2R}{8U^2} = \frac{0,625S^2R}{U^2}.$$
 (8)

При установке КУ в тяговой сети снижаются потери мощности и повышаются напряжения. Проведем анализ снижения потерь мощности при различной расстановке КУ.

Двустороннее питание. Наименьшие потери мощности в тяговой сети будут при двусторонней схеме питания и, если на ПС установлена одиночная КУ1 (табл. 2), полностью компенсирующая реактивную мощность в этом узле, то:

$$\Delta P = \left(\frac{S}{2} - jQ_{\kappa l}\right)^2 \cdot \frac{R}{2U^2},\tag{9}$$

и при $Q_{\kappa 1} = Q/2$:

$$\Delta P = \frac{0.08S^2R}{U^2}.\tag{10}$$

Одностороннее питание. Если на ПС и на консоли участка установлены КУ (табл. 2), полностью компенсирующие реактивную мощность узлов, то:

$$\Delta P = 5 \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot \frac{R}{8} = 5 \left(\frac{S\cos\varphi}{U}\right)^2 \cdot \frac{R}{8} = 5 \left(\frac{0.8S}{U}\right)^2 \cdot \frac{R}{8} = \frac{0.4S^2R}{U^2}.$$
 (11)

При этом мощность КУ на ПС $Q_{\kappa 1} = Q/2$, а на консоли $Q_{\kappa 2} = Q/4$.

Как видно, при консольной схеме питания потери мощности с КУ снижаются до $0.4(S/U)^2 R$, то есть уменьшение в 1,56 раз.

Таблица 2. Мощности КУ

Table 2. Power of the capacitor unit

	Мощность КУ		
Схемы КУ	на ПС	на консоли	Сумма на ПС или на участок
Двустороннее (рис. 1, б)	<i>Q</i> /4	-	Q/2
Одностороннее КУ на ПС и на консоли (рис. 1, в)	<i>Q</i> /2	<i>Q</i> /4	3 <i>Q</i> /4
Одностороннее (рис. 1, в): – КУ1 только ПС – КУ2 только на консоли	3 <i>Q</i> /4	 	3 <i>Q</i> /4 <i>Q</i> /2

При одностороннем питании также целесообразно дополнительно рассмотреть варианты включения одиночной КУ или на ПС, или в конце консольного участка. Для наименьших потерь мощности в тяговой сети в первом случае мощности КУ $Q_{\kappa 1} = 3Q/4$, а во втором $Q_{\kappa 2} = Q/2$ (табл. 2). В этом случае потери при КУ равны (табл. 3):

– при консольной схеме с КУ $Q_{\kappa l}$:

$$\Delta P = \frac{0,422S^2R}{U^2};$$
 (12)

– при консольной схеме с КУ $Q_{\kappa 2}$:

$$\Delta P = \frac{0,445S^2R}{U^2}.$$
 (13)

В обоих вариантах с КУ снижение потерь мощности в $0,625(S/U)^2R / 0,422(S/U)^2R = 1,48$ и $0,625(S/U)^2R / 0,445(S/U)^2R = 1,4$ практически равные. Поэтому в технико-экономических расчетах (ТЭР) сравнения мест включения КУ следует тщательно выбирать исходные данные по нагрузкам и расстояниям участков до ПС. Таким образом, по потерям мощности варианты консольной схемы с одиночными КУ сравнительно мало отличаются от схемы с двумя КУ на ПС и на консоли. Это определяет возможность при консольной схеме питания установить только одно КУ: или на ПС или в конце консоли, что уточняется в расчете конкретного участка с учетом места расположения ремонтной бригады.

Таблица 3. Потери мощности в тяговой сети Table 3.

Power losses in the traction network

	Результаты расчета потерь мощности в кВт			
Схемы	без КУ	с КУ на консоли и ПС	с КУ на ПС	с КУ на консоли
Двусторонняя без раздела	$0,125(S/U)^2R$	-	$0,08 (S/U)^2 R$	—
То же с разделом по ПС	$0,125(S/U)^2R$	_	$0,08 (S/U)^2 R$	_
Консоль	$0,625(S/U)^2R$	$0,4(S/U)^2R$	$0,422(S/U)^2R$	$0,445(S/U)^2R$

Выполненные расчеты определяют стратегию выбора той или иной схемы электроснабжения при разделе питания по контактной сети между тяговыми подстанциями.

При технико-экономическом сравнении места включения КУ следует учитывать место постоянного нахождения ремонтной бригады, чтобы учесть в расчетах затраты на перемещение ремонтной бригады на обслуживание КУ. Постоянное обслуживание КУ необходимо из-за наличия постоянно вращающихся мощных вентиляторов, предназначенных для обдува силовых транзисторов КУ. Поэтому ТЭР КУ в тяговой сети в общем случае рассматриваются в трех вариантах в зависимости от реальной загрузки тяговой сети в зонах от ПС до тяговых подстанций, реальных расстояниях от ПП до ПС, и места постоянного нахождения ремонтной бригады: КУ установлена на ПС, КУ установлена на консоли у ПП и КУ установлены в обеих указанных точках.

Определяющими факторами выбора схемы электроснабжения являются повышенные потери напряжения и мощности в тяговой сети (в 3-4 раза при консольной схеме питания), а также дополнительные расходы на обслуживание и ремонт КУ в точках их включения. В связи с малым изменением скорости тяжеловесного поезда при проходе НВ и повышенными потерями напряжения и мощности при консольном питании, показана целесообразность разделения питания тяговой сети по ПС с введением НВ у ПС. При необходимости повышения напряжения на токоприемниках ЭПС в контактной сети необходимо включить КУ.

Практика установки КУ в тяговой сети [5] подтверждает эффект по снижению потерь напряжения и потерь мощности, а также обеспечивает повышение пропускной способности. Поэтому установка КУ при разделе питания тяговой сети является эффективным техническим решением.

V. Выводы

При особых условиях работы системы внешнего электроснабжения (например, при стыковке энергосистем) приходится выполнять раздельное питание тяговой сети. В этом случае в тяговой сети наблюдаются пониженное напряжение на токоприемниках и повышенные потери мощности в тяговой сети. Для предотвращения существенных пониженных напряжений на токоприемнике и снижения потерь напряжения выполняют встречно-консольное питание контактной сети с монтажом нейтральной вставки у ПС. Если указанное техническое решение окажется недостаточным, то на МПЗ необходимо использовать установки поперечной емкостной компенсации.

Используя метод равномерно распределенной нагрузки, удалось оценить режимы напряжения и потерь мощности при различных схемах тяговых сетей с односторонним питанием с применением установок поперечной емкостной компенсации. Рассмотрены рациональные схемы питания. При наличии нейтральной вставки КУ целесообразно устанавливать на ПС или на консоли тяговой сети у ТП. Место установки необходимо определить на основании ТЭР с учетом снижения потерь мощности в тяговой сети и повышения затрат на обслуживание КУ при удаленном расположении ремонтной бригады от КУ.

Если принято решение консольного питания без HB, то целесообразно провести технико-экономические расчеты с установкой одной КУ или в конце консольного участка, или на ПС.

Поступила в редакцию 02.11.2024 Принята к публикации 13.01.2025 Received 02.11.2024 Accepted 13.01.2025

Библиографический список

- Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [2] СП 224. 1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 79 с.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. – 208 с.
- [4] Кузнецов Г.В. Мероприятия и технические средства снижения уравнительных токов: автореф. дис. канд. техн. наук, Ростов. ин-т инж. желез. тран-та, Ростовна-Дону, 1991. – 20 с.
- [5] Гапанович В.Д. [и др.]. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИ-СиС», 2012. – 619 с.
- [6] Кващук В.А., Кондратьев Ю.В., Черемисин В.Т. Система для управления устройством раздела питания тяговой сети переменного тока электрических железных дорог, Пат. 2248282 RU, заявл. 17.02.03; опубл. 20.03.05. – Бюл. № 8.
- [7] Кващук В.А., Кондратьев Ю.В., Лапенко Н.М., Черемисин В.Т. Система управления устройством раздела питания тяговой сети переменного тока электрических железных дорог, Пат. 2291069 RU, заявл. 10.04.06; опубл. 10.01.07. – Бюл. № 1.
- [8] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. М.: ГОУ УМЦ, 2024.
- [9] Правила тяговых расчетов для поездной работы. Введ. 1980-08-15. М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
- [10] Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. М.: УМК МПС России, 2000. 592 с.

References

- [1] K.G. Marquardt, *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Power supply of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [2] Traction power supply of railways, SP 224. 1326000.2014, December 2014.
- [3] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, Avtomatizaciya elektrosnabzheniya tyagovoj seti peremennogo toka [Automation of power supply of the AC traction network]. Moscow: Federal state budgetary educational institution of additional professional education "Educational and methodological center for education in railway transport", 2021 (in Russian).
- [4] G.V. Kuznetsov, "Meropriyatiya i tekhnicheskie sredstva snizheniya uravnitel'nyh tokov [Measures and technical means of reducing equalizing currents]", Cand. of Tech. S. thesis, Rostov. in-t eng. railway transport, Rostov-on-Don, Russia, 1991 (in Russian).

- [5] V.D. Gapanovich et al., Energosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport]. Moscow: National University of Science and Technology "MISiS", 2012 (in Russian).
- [6] V.A. Kvashchuk, Yu.V. Kondratyev and V.T. Cheremisin, "System to control supply divider of electrified railway ac traction system", Patent RU 2248282, Mar. 20, 2005.
- [7] V.A. Kvashchuk, Yu.V. Kondratyev, N.M. Lapenko and V.T. Cheremisin, "System to control power supply divider of ac traction system of electrified railways", Patent RU 2291069, Jan. 10, 2007.
- [8] L.A. German, Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povysheniya propusknoj sposobnosti zheleznyh dorog [Improvement of AC traction power supply to increase the capacity of railways]. Moscow: State Educational Institution of the Russian Academy of Sciences, 2024 (in Russian).
- [9] Rules for traction calculations for train operation, August 1985.
- [10] S.I. Osipov and S.S. Osipov, Osnovy tyagi poezdov [Basics of train traction]. Moscow: UMK MPS of Russia, 2000 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского института путей сообщения – филиал «Приволжский государственный университета путей сообщения», г. Нижний Новгород, Российская Федерация. Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering - branch "Volga State University of Railway Engineering", Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Маралова Виктория Алексеевна, инженер Горьковской дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация. Victoria A. Maralova, engineer of the JSC «Russian Railways» Gorky directorate for energy supply, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ХРОНИКА

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ГЕОРГИЕВИЧА ТИТОВА (12.09.1943 – 02.04.2025)



Владимир Георгиевич Титов родился 12 сентября 1943 г. в г. Горьком. После окончания средней школы в 1960 г. поступил на электротехнический факультет Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова.

В декабре 1970 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию и с января 1971 г. последовательно занимал должности ассистента, старшего преподавателя и доцента кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» электротехнического факультета ГПИ.

В 1970-1980-е гг. В.Г. Титов читает курсы «Системы автоматического управления электроприводами», «Судовые электроэнергетические системы», организует лаборатории по данным дисциплинам, издает три учебных пособия. В 1973-1974 гг. возглавляет Совет молодых ученых Политехнического института. В 1991 г. В.Г. Титов успешно защищает диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук, в 1993 г. ему присвоено ученое звание профессора.

С 1992 по 2013 гг. В.Г. Титов был заведующим кафедрой «Электрооборудование судов» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Он активно участвовал в подготовке инженерных кадров для Нижегородского и других регионов РФ и вел большую организационную работу по совершенствованию учебного процесса, лабораторий кафедры, разрабатывает и читает курсы «Теория автоматического управления», «Гребные электрические установки» и др.

В 2003 г. В.Г. Титову присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ», а в 2009 г. – звание «Почетный работник Высшей школы».

В 2013-2025 г. В.Г. Титов работал профессором кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ.

Основные научные разработки В.Г. Титова, направленные на повышение энергетической эффективности работы современного электрооборудования, включают в себя:

- теорию и практику электрических нагружающих устройств для испытания двигателей внутреннего сгорания;
- теорию асинхронных вентильных каскадов и машин двойного питания;
- теорию и практику управляемых электротехнических комплексов генерировании электрической энергии для малой гидро-и ветроэнергетики, судовых электростанций и др.;
- создание нового класса современных полупроводниковых устройств в области судовой электротехники.

В.Г. Титов руководил созданной им в Нижнем Новгороде научной школой «Управляемые электротехнические комплексы генерирования электрической энергии с силовыми полупроводниковыми регуляторами». Разработки научной школы В.Г. Титова воплотились в создании совместно с ФГУП НИИ силовой электроники (г. Саранск) серии электрических нагружающих устройств мощностью 30-320 кВт для испытания двигателей внутреннего сгорания, которые успешно эксплуатируются на моторостроительных предприятиях России и стран СНГ (тракторные и автомобильные заводы в Ярославле, Владимире, Челябинске, Нижнем Новгороде, Минске, Кустанае и др.), использованы в программе развития малой гидроэнергетики Нижегородской области и, в частности, пуске Ичалковской малой ГЭС и для технико-экономического обоснования внедрения частотно-регулируемых электроприводов собственных нужд ТЭЦ Нижегородского региона.

Под научным руководством профессора В.Г. Титова защищено более 20 кандидатских и 1 докторская диссертация.

С 2013 г. по 2025 г. В.Г. Титов возглавлял диссертационный совет по защите докторских и кандидатских диссертаций при НГТУ по научным специальностям «Электротехнические комплексы и системы» и «Силовая электроника».

В.Г. Титовым опубликованы 5 монографий, около 200 статей и докладов, им получено 13 авторских свидетельств и патентов на изобретения и полезные модели. Ряд работ опубликовано за рубежом.

Владимир Георгиевич Титов ушел из жизни 2 апреля 2025 г.

О Владимире Георгиевиче скорбят родные и близкие, друзья, ученые, коллеги и студенты.

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

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

<u>№</u> 2

Nizhny Novgorod 2025

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2025. № 2 (30). – 140 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin
	Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU
	(Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch
	in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU
	(Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU
	(Saransk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian
	Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU
	(Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU
Mescheryakov	(Lipetsk, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate profes-
	sor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design
	engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair
	FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU
	(NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU
	(Nizhny Novgorod, Russia)
Electronic version	Periodic printed edition registrated by Roskompadzor
http://www.io.watu.wi	$\frac{1}{10000000000000000000000000000000000$
nup//www.ie.nniu.ru	1111 Ju WC / / -01000 00 00 Aug., 2021

ISSN 2658-6754

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

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
Kulikov A.L., Osokin V.L., Levakov D.A. Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary	
network fault location. Part 2	4
of electric load schedule in microgrid	34
supply in high-pressure pipe welding Ustinov D.A., Abdallah V., Shafkhatov E.R. Improving the dynamic	56
characteristics of DC/DC converter by adjusting voltage PI-controller Sidorov B.N., Al-Mohammedawi A.J.M. Matlab simulation of battery charging from the grid and discharging to the grid (G2V and V2G	71
operation)	93
10/0,4 kV substation	112
POWER INDUSTRY	122
German L.A., Maralova V.A. Reduction of voltage losses and power	
losses of capacitor unit in traction network with one-way power supply	122
CRONICLE	134
In memory of Vladimir Georgievich Titov (12.09.1943-02.04.2025)	134

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<u>№</u> 2

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

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

> > Свободная цена

Подписано в печать 19.06.2025. Дата выхода в свет: 27.06.2025 Формат 60х84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,75. Тираж 100 экз. Заказ .

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

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