

Применение энергороутеров для подключения зарядных станций электромобилей

Ю. Н. Булатов^{1а}, А. В. Крюков^{2,3б}, В. В. Кижин^{1с}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^а bulatovyura@yandex.ru, ^б and_kryukov@mail.ru, ^с vadim-hero4ever@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^с <https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>.

Статья поступила 20.01.2025, принята 10.03.2025

Эффективность использования электромобилей в значительной степени зависит от наличия зарядных станций (ЗС), обеспечивающих быстрое пополнение энергетического запаса их аккумуляторов. ЗС являются связующим звеном между системой электроснабжения (СЭС) и хранилищем энергии электромобиля. На современном этапе применяются ЗС двух типов: переменного и постоянного тока. Последние способны выдавать напряжение до 600 В и ток до 400 А. В типовой схеме электроснабжения ЗС питаются от шин 0,4 кВ подстанций городских или районных распределительных сетей. Компоненты современной силовой электроники дают возможность реализации более эффективной структуры СЭС, построенной с использованием энергороутеров (ЭР), выполненных на базе твердотельных трансформаторов. Такой подход обладает рядом преимуществ, заключающихся в следующем: пониженные уровни гармонических искажений; возможность подключения возобновляемых источников и накопителей энергии. Представлены результаты моделирования режимов работы СЭС с зарядными станциями электромобилей. Выполнено сравнение СЭС типовой структуры, а также использующей энергороутер. Исследования проведены в системе MATLAB. Результаты моделирования показали, что при наличии ЭР снижаются уровни высших гармоник (ВГ) напряжения на шинах 0,4 кВ: коэффициент ВГ уменьшается почти в 29 раз с 2,9 до 0,1 %. Кроме того, выполнено моделирование режимов трехфазного короткого замыкания (КЗ) на питающей СЭС линии 10 кВ и подключения дополнительной мощной нагрузки в сети потребителей 0,4 кВ. При КЗ в СЭС с ЭР на шинах 0,4 кВ не наблюдаются глубокие провалы напряжения. В режиме подключения дополнительной нагрузки переходные процессы в обеих рассматриваемых схемах СЭС отличаются незначительно.

Ключевые слова: зарядные станции электромобилей, трансформатор, энергороутер, гармонические искажения, моделирование.

Using energy routers to connect electric vehicle charging stations

Yu.N. Bulatov^{1а}, A.V. Kryukov^{2,3б}, V.V. Kizhin^{1с}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^а bulatovyura@yandex.ru, ^б and_kryukov@mail.ru, ^с vadim-hero4ever@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^с <https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>.

Received 20.01.2025, accepted 10.03.2025.

The efficiency of using electric vehicles largely depends on the availability of charging stations (CS) that quickly replenish the energy reserve of their batteries. Charging stations are the link between the power supply system (PSS) and the energy storage of an electric vehicle. At the present stage, two types of CS are used: alternating and direct current. The latter are capable of producing voltage up to 600 V and current up to 400 A. In a typical power supply scheme, CS are fed from 0.4 kV buses of substations of city or district distribution networks. Components of modern power electronics make it possible to implement a more efficient PSS structure built using energy routers based on solid-state transformers. This approach has a number of advantages, including the following: reduced levels of harmonic distortion; the ability to connect renewable energy sources and storage devices. The article presents the results of modeling the operating modes of a PSS with electric vehicle charging stations. A comparison of a PSS of a typical structure and one using an energy router is made. The research is carried out in the MATLAB system. The simulation results show that the presence of an energy router reduces harmonic voltage distortions on 0.4 kV buses: the harmonic coefficient decreases almost 29 times from 2.9 to 0.1%. In addition, the simulation of three-phase short circuit (SC) modes on the 10 kV power line of the SES and the connection of an additional powerful load in the 0.4 kV consumer network is performed. During a SC in a SES with an energy router on 0.4 kV buses, deep voltage drops are not observed. In the mode of connecting an additional load, transient processes in both SES schemes under consideration differ insignificantly.

Keywords: electric vehicle charging stations, transformer, energy router, harmonic distortion, modeling.

Введение. В настоящее время наблюдается интенсивный рост рынка электромобилей (ЭМ). Правительства многих стран мира принимают меры по сокращению производства и импорта транспортных средств, использующих двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [1]. В период с 2025 по 2040 гг. восемнадцать стран планируют прекратить продажу новых автомобилей с ДВС [2]. Успешность применения ЭМ в значительной степени зависит от наличия эффективного и надежного оборудования ЗС, обеспечивающих оперативное пополнение энергозапасов ЭМ [3]. Такие станции являются важным связующим звеном между системой электроснабжения (СЭС) и аккумуляторным блоком электромобиля [4].

В работах [5, 6] рассмотрены современные состояния и перспективы развития электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России.

В статьях [7, 8] описаны основные типы ЗС и классифицированы виды электромобильных разъемов на базе нескольких текущих стандартов. Применяемые в настоящее время ЗС можно разделить на два вида: переменного и постоянного тока (DC). В работах [9–12] разрабатываются модели быстрой зарядной станции DC, которые способны подавать на зажимы ЭМ напряжение до 600 В и ток до 400 А. Их называют быстрыми ЗС DC [13]. Для реализации такого подхода в СЭС требуется установить специальные ЗС с преобразовательными устройствами для регулирования уровня напряжения и снижения электромагнитных помех [14], что увеличивает нагрузку на электрическую сеть и может привести к ухудшению качества электроэнергии. Влияния электромобилей на СЭС и подготовка рекомендаций для электросетевых организаций и производителей ЗС приведены в работе [15]. Одним из способов решения возникающих проблем является применение в ЗС установок распределенной генерации (РГ) [16–18] и накопителей электроэнергии, что потребует модифицировать алгоритмы функционирования релейной защиты и автоматики [19, 20].

Энергорouterы (ЭР), построенные на основе твердотельных трансформаторов [21–23], могут суще-

ственно улучшить работу ЗС и обеспечить эффективное управление потоками мощности, интеграцию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), повышение качества электроэнергии [24, 25]. На этой основе можно будет распределять энергопотоки между несколькими ЗС [25].

В работах [26–29] рассмотрены методы имитационного моделирования, позволяющие рассчитать энергетический баланс аккумуляторной батареи, выбрать оптимальное размещение ЗС и оценить их влияние на общую электрическую сеть города.

Ниже представлены результаты моделирования работы СЭС с зарядными станциями DC для электромобилей. Цель проведенных исследований заключалась в определении влияния ЗС на качество электроэнергии в СЭС. Рассматривалось два варианта формирования ЗС. В первом использовался типовой трансформатор, во втором – энергорouter [24].

Описание модели СЭС и полученных результатов. Моделирование выполнялось в системе MATLAB для схем СЭС, показанных на рис. 1 и состоящих из основного источника питания 10 кВ, силового трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 3600 кВ·А и потребителей электроэнергии в виде постоянной активно-индуктивной нагрузки $1+j0,25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Исследуемые СЭС отличались тем, что были построены на базе обычного силового трансформатора (см. рис. 1, а) и высокочастотного устройства (см. рис. 1, б), представляющего собой часть энергорouterа. В СЭС использовалась ЗС DC мощностью 300 кВт для возможности подключения трех электромобилей с емкостью аккумуляторов 256 А·ч. В представленных СЭС исследовались два режима работы:

- кратковременное трехфазное короткое замыкание (КЗ) на стороне 10 кВ;
- подключение дополнительной нагрузки мощностью $1 + j0,25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ на стороне 0,4 кВ.

Также предварительно было выполнено моделирование установившегося режима СЭС, результаты которого показаны на рис. 2.

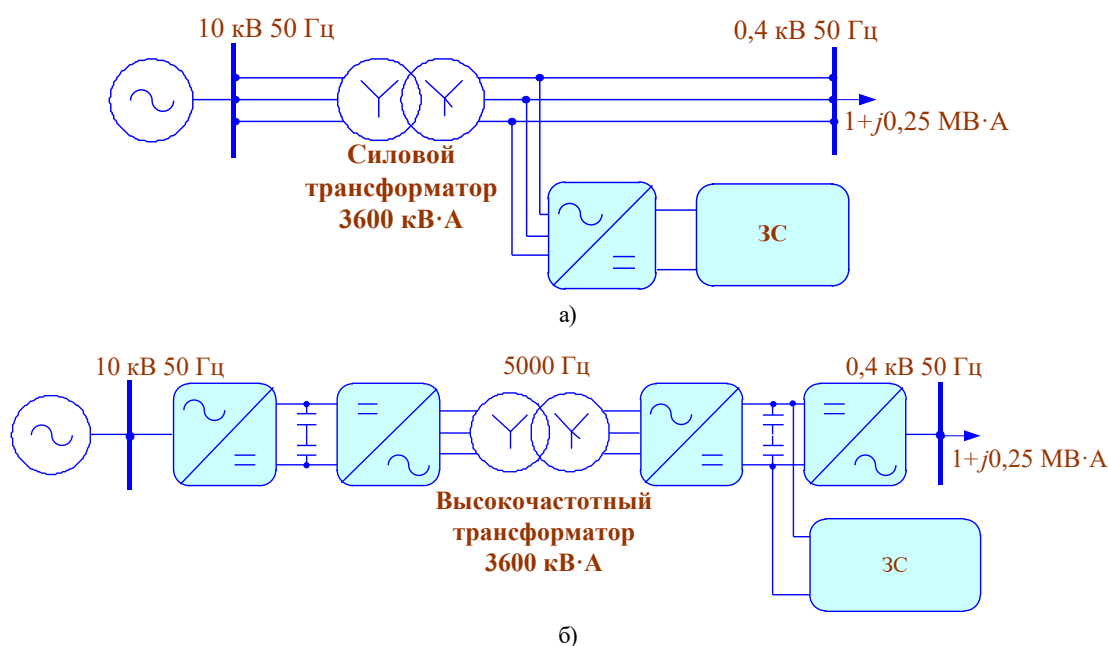


Рис. 1. Схемы СЭС с зарядными станциями электромобилей: а – с типовым трансформатором; б – с энергорouterом

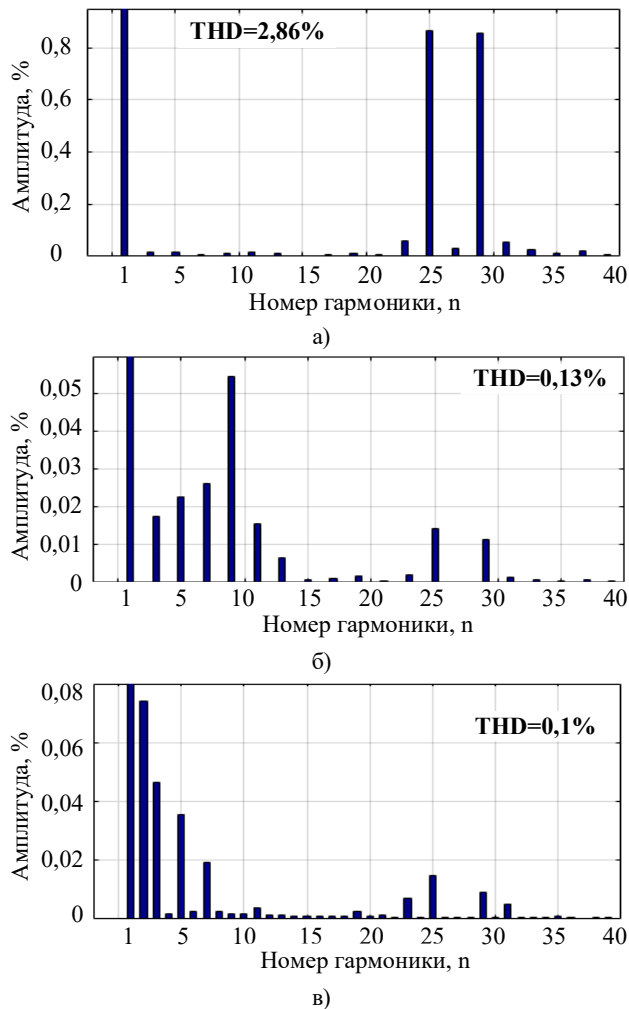


Рис. 2. Состав гармоник напряжения у потребителей 0,4 кВ: а – при использовании трансформатора без фильтра ВГ; б – тоже с пассивным фильтром ВГ; в – при наличии энергоустройства

На основе моделирования установившегося режима работы СЭС был определен состав высших гармоник (ВГ) напряжения у потребителей 0,4 кВ. Результаты

представлены на рис. 2, из которого видно, что при подключении ЗС через силовой трансформатор типовой конструкции и двунаправленный преобразователь наблюдаются заметные гармонические искажения (коэффициент ВГ $k_U = 2,86\%$; на рис. 2 обозначено как THD). Установка пассивного фильтра на стороне низкого напряжения в месте подключения ЗС позволяет снизить k_U до 0,13% (см. рис. 2, б). На основе энергоустройства также можно уменьшить k_U до 0,1 % (см. рис. 2, в). В составе ВГ наблюдаются высокие амплитуды 25 и 29 гармоник от двунаправленного преобразователя ЗС с широтно-импульсной модуляцией, работающего на высоких частотах. Состав и амплитуды ВГ в двух исследуемых СЭС (см. рис. 2, б, в) несколько отличаются в связи с использованием в схеме с энергоустройством большего количества различных преобразователей (см. рис. 1, а, б).

Таким образом, применение ЭР позволяет улучшить качество электроэнергии без применения специальных алгоритмов управления и активного фильтра гармоник. Кроме того, в такой схеме легко реализуется возможность подключения установок РГ на основе ВИЭ и накопителей энергии для питания ЗС, сглаживания графика нагрузок и повышения надежности электро-снабжения потребителей.

Результаты моделирования режима кратковременного КЗ на стороне 10 кВ в виде напряжений и величин заряда аккумуляторов ЭМ показаны на рис. 3 и 4. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что использование ЭР дает возможность поддерживать напряжение у потребителей вблизи номинального значения (см. рис. 3, кривая 2). Это объясняется тем, что в схеме с энергоустройством при моделировании на стороне 10 кВ использовался однонаправленный преобразователь, поэтому подпитка места КЗ со стороны ЭР отсутствовала в отличие от схемы с обычным трансформатором.

Результаты моделирования для режима подключения мощной нагрузки у потребителей 0,4 кВ показаны на рис. 5 и 6.

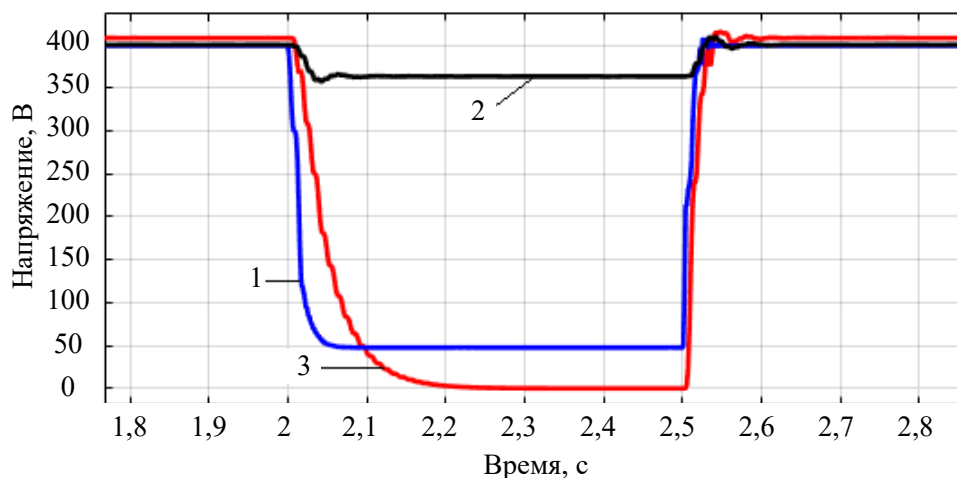


Рис. 3. Напряжение у потребителей 0,4 кВ при кратковременном КЗ на стороне 10 кВ: 1 – типовой трансформатор; 2 – энергоустройство; 3 – энергоустройство без подключенных аккумуляторов ЭМ

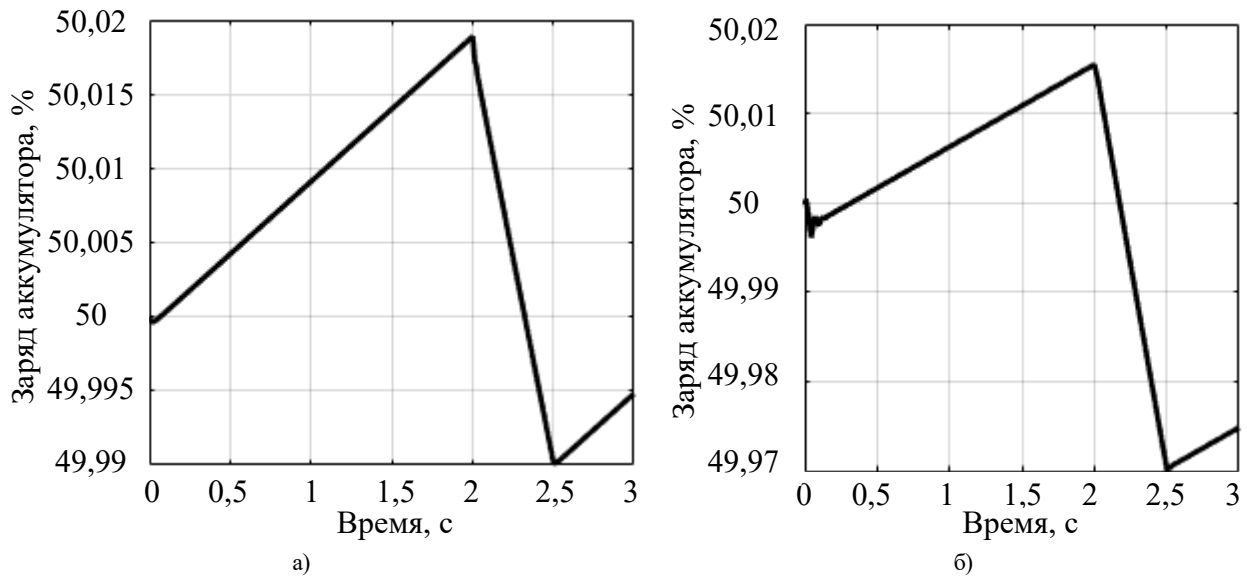


Рис. 4. Изменение заряда аккумуляторов электромобилей при КЗ на стороне 10 кВ: а – при использовании типового трансформатора; б – при наличии энергорouters

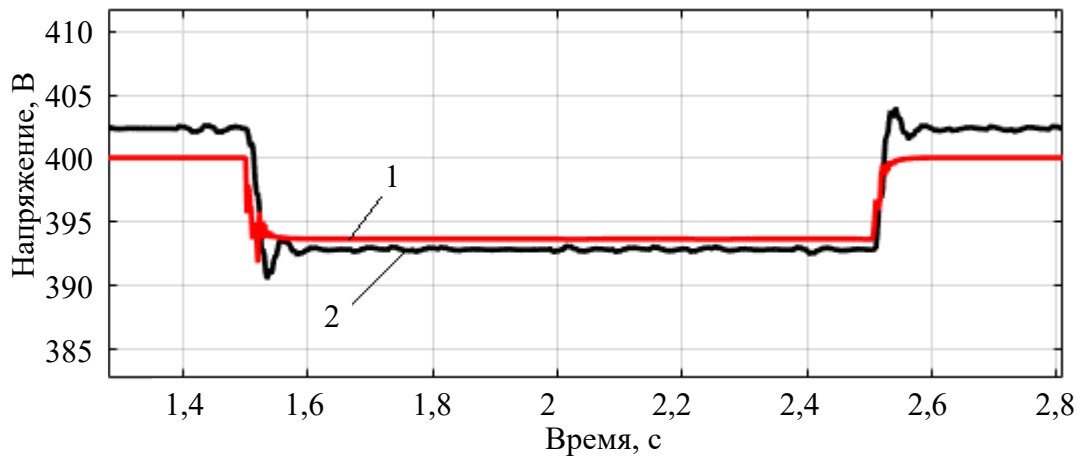


Рис. 5. Напряжение у потребителей 0,4 кВ при подключении дополнительной нагрузки: 1 – типовой трансформатор; 2 – энергорouter

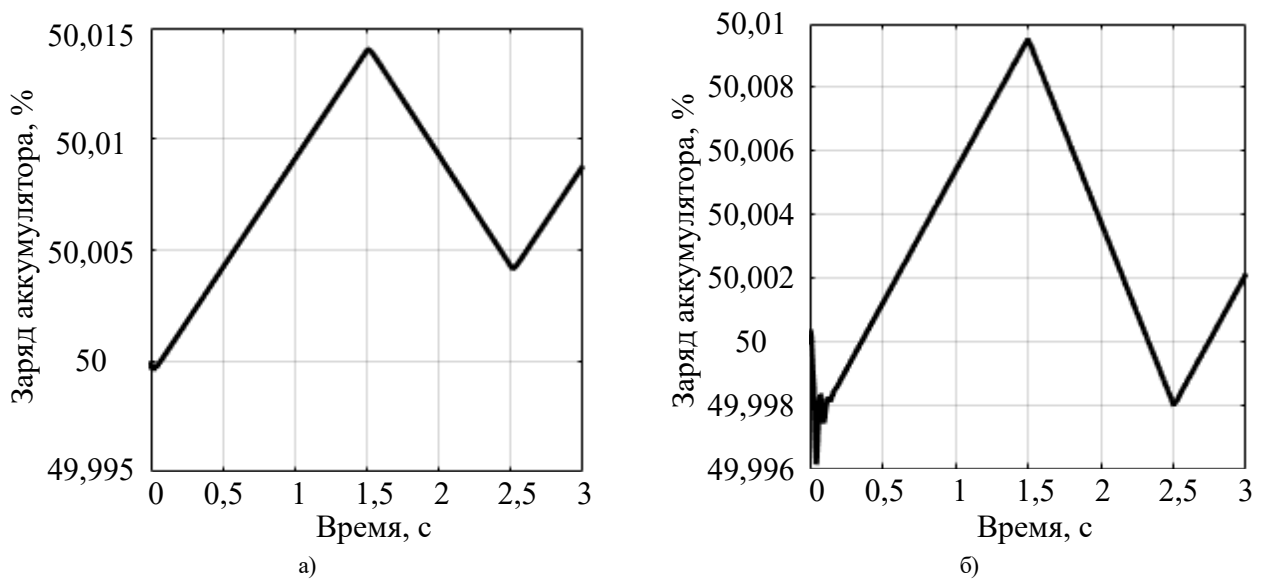


Рис. 6. Изменение заряда аккумуляторов электромобилей при подключении дополнительной нагрузки у потребителей 0,4 кВ: а – при использовании типового трансформатора; б – при наличии энергорouters

В режиме подключения дополнительной мощной нагрузки в схеме с энергороутером действующее значение напряжения снижается также как и в случае применения типового трансформатора (см. рис. 5). При этом наблюдается одинаковый разряд аккумуляторов ЭМ (см. рис. 6). Для автоматического регулирования напряжения в этом режиме на стороне 0,4 кВ можно использовать систему управления энергороутера.

Таким образом, дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении разработки, испытания и настройки системы автоматического регулирования (САР) напряжения преобразователей ЭР и формирования встроенного активного фильтра для улучшения качества электроэнергии.

По результатам проведенных исследований также можно отметить возможность использования аккумуляторов ЭМ для поддержания напряжения и временного питания потребителей в ненормальных и аварийных режимах СЭС. Однако для этой цели также требуется разработка САР ЗС, согласованной с системой управления энергороутера.

Заключение. Результаты имитационного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. При подключении зарядной станции через типовой трансформатор и двунаправленный преобразователь AC/DC наблюдается заметные гармонические искажения

напряжения (коэффициент ВГ k_U равен 2,9 %). Путем установки пассивного фильтра на стороне 0,4 кВ можно снизить k_U до 0,13 %.

2. Использование в СЭС энергороутера позволяет значительно уменьшить амплитуды генерируемых ВГ на шинах потребителей 0,4 кВ: коэффициент k_U в установившемся режиме уменьшается в 29 раз с 2,9 до 0,1 %. Полное гашение ВГ возможно при использовании активных фильтров с соответствующим алгоритмом управления.

3. В режиме короткого замыкания в схеме с ЭР в отличие от СЭС с типовым трансформатором удастся поддерживать напряжение вблизи номинального значения. Это объясняется тем, что при моделировании у ЭР на стороне 10 кВ использовался однонаправленный преобразователь AC/DC и подпитка места КЗ со стороны энергороутера отсутствовала.

4. В режиме подключения дополнительной нагрузки характер изменения напряжения практически одинаков в обеих рассматриваемых схемах СЭС.

5. Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении разработки, испытания и настройки систем автоматического регулирования напряжения преобразователей ЭР и ЗС со встроенным активным фильтром для улучшения качества электроэнергии.

Литература

1. Раков В.А. Исследование эксплуатационной надежности гибридных силовых установок автомобилей // Автотранспортное предприятие. 2013. № 4. С. 44-49.
2. Раков В.А. Развитие парка гибридных автомобилей // Мир транспорта. 2013. № 1. С. 52-59.
3. Крюков А.В., Булатов Ю.Н., Кузнецова О.В., Черепанов А.В., Мизова Э.М. Критерии интегральной оценки возможностей развития региональной зарядной инфраструктуры электромобилей в России // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 2, № 10 (139). С. 68-73.
4. Александров И.К., Раков В.А., Щербакова А.А. Перспективы развития транспортных средств с электроприводом // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 4. С. 65-68.
5. Санатов Д.В., Абакумов А.М., Айдемиров А.Ю., Боровков А.И., Васеев И.Е., Гареев Т.Р., Годунова Е.А., Гумеров И.Ф., Кашин А.М., Клепач А.Н., Клявин О.И., Клявина М.П., Княгинин В.Н., Когогин С.А., Матасов М.В., Пономарев А.К., Салкуцан С.В., Таршин А.Ю., Финк П.П., Харитонов М.А. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России: экспертно-аналитический доклад. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 44 с.
6. Ремизова Т.С. Развитие зарядной инфраструктуры в России: стимулы и перспективы применения технологии Vehicle-to-Grid // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2023. Т. 19, № 2 (419). С. 380-400.
7. Тихонов А.И. Заряжаем электромобиль – основные типы зарядных станций и разъемов зарядных устройств // Главный энергетик. 2022. № 3. С. 28-35.
8. Огиевич А.В. Зарядные станции для электромобилей. Их виды, особенности, требования // Электроэнергетика и электротехника: Мат-лы 78-й науч.-технич. конф. студентов и аспирантов, Минск, 25–27 апреля 2022 года. Минск: Изд-во Белорус. национал. технич. ун-та, 2022. С. 64-69.
9. Arancibia A., Strunz K. Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, USA. P. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183232
10. Беляков Д., Бескровный С. Быстрая зарядная станция электромобилей мощностью более 20 кВт // Компоненты и технологии. 2020. № 5(226). С. 82-84.
11. Черниченко А.В. Быстрая зарядная станция для электромобилей. Схема станции и осциллограммы зарядной станции // ADVANCED SCIENCE: сб. статей XI Междунар. науч.-практич. конф., Пенза, 17 января 2020 г. Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. С. 54-57.
12. Сафиуллин Б.И. Применение трехфазных активных выпрямителей в зарядных станциях постоянного тока для электромобилей // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: Мат-лы Междунар. молодежной науч. конф. В 3 т. Т. 1. Казань, 28–30 апреля 2021 г. Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2021. С. 261-263.
13. Раков В.А. Диагностирование автомобилей с гибридной силовой установкой – проблемы и пути их решения // Мат-лы шестой междунар. науч.-технич. конф. В 2 т. Т. 2. Вологда: Изд-во Вологод. гос. технич. ун-та, 2010. С. 64-68.
14. Bala S., Das D., Aeloiza E., Maitra A., Rajagopalan S. Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, North Carolina, USA. 15-20 September 2012. P. 4061-4068.
15. Ахмадеев А.Р. Влияние электромобилей и зарядных станций на электрические сети // Энергоэксперт. 2018. №1(65). С. 24-28.
16. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // Appl. Therm. Eng., 2002, Vol.22, № 18. P. 2003–2014.
17. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
18. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К. Управление режимами систем электроснабжения с установками

- распределенной генерации, сформированными на основе асинхронизированных машин // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2020. № 1 (78). С. 175–188.
19. Илюшин П.В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 3 (20). С. 24–29.
 20. Илюшин П.В. Анализ влияния распределенной генерации на алгоритмы работы и параметры настройки устройств автоматики энергосистем // Энергетик. 2018. № 7. С. 21–26.
 21. She X., Huang A.Q., Burgos R. Review of Solid State Transformer technologies and their applications in power distribution system // IEEE Journ. Emerg. Sel. Topics in Power Electron. 2013. Vol. 1, № 3. P. 186–198.
 22. Kolar J.W., Ortiz G. Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems // Internat. Power Electronics Conference (IPEC). Hiroshima, Japan, May 18–21, 2014. P. 22–35.
 23. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Арсентьев Г.О. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог. М.-Берлин: ДиректМедиа, 2020. 171 с.
 24. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of Power Routers and Renewable Energy Resources in Smart Power Supply Systems // Internat. Ural Conference on Green Energy (UralCon). 2018. P. 143–148.
 25. Соснина Е.Н., Шумский Н.В., Шрамко П.А. Обучение распределенной системы управления энергороутера на базе нейронной сети // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Мат-лы XII Всерос. науч.-технич. конф. Чебоксары, 2020. С. 328–330.
 26. Майорова Е.С. Развитие сети зарядных станций для электротранспорта с использованием имитационного моделирования // Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: Сб. науч. статей по мат-лам Междунар. конф. В 3 т. Т. 3. Алматы-Казань, 20–21 октября 2022 г. Казань: Изд-во Казан. гос. энергетич. ун-та, 2023. С. 188–191.
 27. Петров Т.И., Сафин А.Р., Грачева Е.И., Ившин И.В., Цветков А.Н., Басенко В.Р. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2022. Т. 25, № 4. С. 365–377.
 28. Артамонов В.Ю. Модель зарядной станции с буферными элементами для электромобилей // Мат-лы XXII науч.-практич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национал. исслед. Мордовского гос. ун-та им. Н.П. Огарёва. В 3 ч. Ч. 1. Саранск, 25 сентября – 1 октября 2018 г. Саранск: Изд-во Национал. исслед. Мордовского гос. ун-та им. Н.П. Огарёва, 2019. С. 244–248.
 29. Каталевский Д.Ю. Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона // Балтийский регион. 2020. Т. 12, № 2. С. 118–139.
 4. Alexandrov I.K., Rakov V.A., Shcherbakova A.A. Prospects of development of vehicles with electric drive // Transportation on alternative fuel. 2011. № 4. P. 65–68.
 5. Sanatov D.V., Abakumov A.M., Aidemirov A.Y., Borovkov A.I., Vaseev I.E., Gareev T.R., Godunova E.A., Gumerov I.F., Kashin A.M., Klepach A.N., Klyavin O.I., Klyavina M.P., Knyagin V.N., Kogogin S.A., Matasov M.V., Ponomarev A.K., Salkutsan S.V., Tarshin A.Y., Fink P.P., Kharitonov M.A. Prospects of development of the market of electric transport-port and charging infrastructure in Russia: an expert-analytical report. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2021. 44 p.
 6. Remizova T.S. Development of charging infrastructure in Russia: incentives and prospects of Vehicle-to-Grid technology application // National interests: priorities and safety. 2023. Vol. 19, № 2 (419). P. 380–400.
 7. Tikhonov A.I. Charging an electric car – main types of charging stations and charger connectors // Chief Power Engineer. 2022. № 3. P. 28–35.
 8. Ogievich A.V. Charging stations for electric vehicles. Their types, features, requirements // Electric Power Engineering and Electrical Engineering: Proceedings of the 78th Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Minsk, April 25–27, 2022. Minsk: Publishing house of the Belarusian National Technical University, 2022. P. 64–69.
 9. Arancibia A., Strunz K. Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, USA. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183232
 10. Belyakov D., Beskrovny S. Fast charging station for electric vehicles with the power more than 20 kW // Components and Technologies. 2020. № 5(226). P. 82–84.
 11. Chernichenko A.V. Fast charging station for electric cars. Scheme of the station and oscillograms of the charging station // ADVANCED SCIENCE: collection of articles of the XI International Scientific and Practical Conference, Penza, January 17, 2020. Penza: "Science and Enlightenment" (IP Gul'yaev G.Yu.), 2020. С. 54–57.
 12. Safiullin B.I. Application of three-phase active rectifiers in DC charging stations for electric vehicles // Tinchurin Readings – 2021 "Energy and Digital Transformation": Proceedings of the International Youth Scientific Conference. In 3 vol. Vol. 1. Kazan, April 28–30, 2021. Kazan: OOO PK "As-tor and Ya", 2021. P. 261–263.
 13. Rakov V.A. Diagnostics of vehicles with hybrid power plant – problems and ways of their solution // Proceedings of the sixth international scientific-technical conf. In 2 vol. Vol. 2. Vologda: Vologda State Technical University Publishing House, 2010. P. 64–68.
 14. Bala S., Das D., Aeloiza E., Maitra A., Rajagopalan S. Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, North Carolina, USA. 15–20 September 2012. P. 4061–4068.
 15. Akhmedeev, A.R. Impact of electric vehicles and charging stations on power grids // Energoekspert. 2018. № 1(65). P. 24–28.
 16. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // Appl. Therm. Eng., 2002, Vol.22, № 18. P. 2003–2014.
 17. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
 18. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Shumansky E.K. Control of the power supply systems modes with the distributed generation units formed on the basis of asynchronized machines // Scientific bulletin of Novosibirsk State Technical University. 2020. № 1 (78). P. 175–188.
 19. Ilyushin P.V. Analysis of the feasibility of RPA devices settings of generating units with internal combustion engines

References

1. Rakov V.A. Investigation of operational reliability of hybrid car power plants // Avtotransportnoe predpriyatie. 2013. № 4. P. 44–49.
2. Rakov V.A. Development of the hybrid car park. // World of Transport. 2013. № 1. С. 52–59.
3. Kryukov A.V., Bulatov Yu.N., Kuznetsova O.V., Cherepanov A.V., Mizova E.M. Criteria of the integral assessment of the regional charging infrastructure development opportunities for electric vehicles in Russia // Economics and Management: problems, solutions. 2023. Vol. 2, № 10 (139). P. 68–73.

- at the distributed generation facilities // Relay protection and automation. 2015. № 3 (20). P. 24-29.
20. Ilyushin P.V. Analysis of the distributed generation influence on the operation algorithms and adjustment parameters of the power system automation devices // Energetik. 2018. № 7. P. 21-26.
 21. She X., Huang A.Q., Burgos R. Review of Solid State Transformer technologies and their applications in power distribution system // IEEE Journ. Emerg. Sel. Topics in Power Electron. 2013. Vol. 1, № 3. P. 186-198.
 22. Kolar J.W., Ortiz G. Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems // Internat. Power Electronics Conference (IPEC). Hiroshima, Japan, May 18-21, 2014. P. 22-35.
 23. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Distributed generation and energy routers in the railroad power supply systems. Moscow-Berlin: DirectMedia, 2020. 171 p.
 24. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of Power Routers and Renewable Energy Resources in Smart Power Supply Systems // Internat. Ural Conference on Green Energy (UralCon). 2018. P. 143-148.
 25. Sosnina E.N., Shumskiy N.V., Shramko P.A. Training of the distributed control system of the power router based on the neural network // Information technologies in electrical engineering and electric power engineering: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference. Cheboksary, 2020. P. 328-330.
 26. Mayorova E.S. Development of the network of charging stations for electric transport using simulation modeling // Power Engineering, Info-communication Technologies and Higher Education: Collection of scientific articles on materials of Intern. conf. In 3 vol. Vol. 3. Almaty-Kazan, October 20-21, 2022, Kazan: Publishing House of Kazan State Power Engineering University, 2023. P. 188-191.
 27. Petrov T.I., Safin A.R., Gracheva E.I., Ivshin I.V., Tsvetkov A.N., Basenko V.R. Modeling of the equipment operation of a mobile charging unit for electric transport charging in order to confirm the compliance with the groups of climatic and mechanical performance // Bulletin of Murmansk State Technical University. 2022. T. 25, № 4. P. 365-377.
 28. Artamonov V.Yu. Model of the charging station with buffer elements for electric cars // Proceedings of the XXII Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students of the National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov. In 3 parts. P. 1. Saransk, September 25 – October 1, 2018. Saransk: Publishing House of the National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, 2019. P. 244-248.
 29. Katalevskiy D.Yu. Simulation modeling for forecasting the development of automobile electric transport at the regional level // Baltic region. 2020. Vol. 12, № 2. P. 118-139.