

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2022-3-58-65

Уменьшение несимметрии и гармонических искажений на подстанциях, подключенных к линиям электропередачи 25 кВ, использующим рельсы в качестве токоведущей части

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, А.В. Черепанов^{2c}, Нгуен Куок Хиеу^{3d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d hieu12829@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6969-8369>

Статья поступила 15.06.2022, принята 02.09.2022

Для электроснабжения стационарных объектов, расположенных вблизи трасс железных дорог, применяются линии электропередачи (ЛЭП) 25 кВ, выполненные по схемам «провод – рельс» (ПР) и «два провода – рельс» (ДПР). В этих ЛЭП рельсы железнодорожного пути используются в качестве токоведущих частей. На выводах подстанций, подключенных к таким линиям, наблюдается пониженное качество электроэнергии по следующим показателям: отклонения, колебания и несимметрия напряжений, а также их гармонические искажения. Кроме того, однофазная конструкция линий ПР и подстанций, присоединенным к ним, существенно затрудняет подключение трехфазных потребителей, например, широко распространенных асинхронных электродвигателей. Для расширения функциональных возможностей линий «провод – рельс» может быть предложено техническое решение, использующее преобразователь числа фаз (ФП), активные кондиционеры гармоник (АКГ), а также управляемый источник реактивной мощности (ИРМ) однофазной конструкции, размещенные на подстанции потребителя. Преобразователь ФП выполняется по схеме Штейнмеца и реализуется на основе элементов силовой электроники. Для определения реализуемости и оценки эффективности такого подхода необходима разработка цифровых моделей, обеспечивающих адекватное моделирование систем тягового электроснабжения (СТЭ), оснащенных перечисленными выше устройствами. Анализ отечественной и зарубежной литературы позволяет сделать вывод о том, что задачи создания таких моделей до настоящего времени не решены. На основе исследований, результаты которых представлены в статье, показано, что для решения сформулированной задачи могут быть применены методы моделирования СТЭ, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения и основанные на использовании фазных координат. Результаты моделирования показали, что на базе подхода, использующего ФП, АКГ и ИРМ, возможно расширить функционал ЛЭП ПР и обеспечить на шинах подстанций, подключенных к этим линиям, нормативные показатели качества электроэнергии.

Ключевые слова: системы электроснабжения стационарных объектов; улучшение качества электроэнергии; моделирование.

Reducing unbalance and harmonic distortion in substations connected to 25 kV power lines using rails as a current-carrying part

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, Nguyen Quoc Hieu^{2d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d hieu12829@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6969-8369>

Received 15.06.2022, accepted 02.09.2022

For the power supply of stationary facilities located near railway lines, 25 kV power lines are used, made according to the "wire - rail" (WR) and "two wires – rail" (TWR) schemes. In these transmission lines, the rails of the railway track are used as current-carrying parts. At the outputs of substations connected to such lines, there is a reduced quality of electricity in terms of the following indicators: deviations, fluctuations and asymmetry of voltages, as well as their harmonic distortion. In addition, the single-phase design of WR lines and substations connected to them makes it very difficult to connect three-phase consumers, for example, widely used asynchronous electric motors. To expand the functionality of the "wire – rail" lines, a technical solution can be proposed using a phase number converter

(PC), active harmonic conditioners (AHC), as well as a controlled reactive power source (RPS) of a single-phase design, located at the consumer's substation. The PC converter is made according to the Steinmetz scheme and is implemented on the basis of power electronics elements. To determine the feasibility and evaluate the effectiveness of this approach, it is necessary to develop digital models that provide adequate modeling of traction power supply systems (TPSS) equipped with the devices listed above. An analysis of domestic and foreign literature allows us to conclude that the tasks of creating such models have not yet been solved. Based on the studies, the results of which are presented in the article, it is shown that to solve the formulated problem, the TPSS modeling methods developed at the Irkutsk State Transport University and based on the use of phase coordinates can be applied. The simulation results have shown that based on the approach using PC, AHC and RPS, it is possible to expand the functionality of power transmission lines of the WR and provide standard indicators of power quality on the buses of substations connected to these lines.

Keywords: power supply systems for stationary objects; improvement of power quality; modeling.

Введение. Основное назначение системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД) состоит в приеме электроэнергии из сетей энергоснабжающей организации и распределение ее между потребителями, которых можно разделить на три группы:

- электровозы, осуществляющие тягу грузовых и пассажирских поездов;
- стационарные транспортные объекты, называемые нетяговыми потребителями;
- аналогичные объекты, не относящиеся к транспорту.

В сетях, питающих две последние группы, могут применяться линии электропередачи (ЛЭП) специальной конструкции, выполненные по схемам «провод – рельс» (ПР) и «два провода – рельс» (ДПР). В этих ЛЭП рельсы железнодорожного пути используются в качестве токоведущих частей. На выводах подстанций, подключенных к таким линиям,

наблюдается пониженное качество электроэнергии по следующим показателям: отклонения, колебания и несимметрия напряжений, а также их гармонические искажения. Кроме того, однофазная конструкция линий ПР и подстанций, присоединенным к ним, существенно затрудняет подключение трехфазных потребителей, например, широко распространенных асинхронных электродвигателей.

Для расширения функциональных возможностей линий «провод – рельс» может быть предложено техническое решение, использующее преобразователь числа фаз (ФП), активные кондиционеры гармоник (АКГ), а также управляемый источник реактивной мощности (ИРМ) однофазной конструкции, размещенные на подстанции потребителя (рис. 1). Преобразователь ФП выполняется по схеме Штейнмеца (рис. 2) и реализуется на основе элементов силовой электроники.

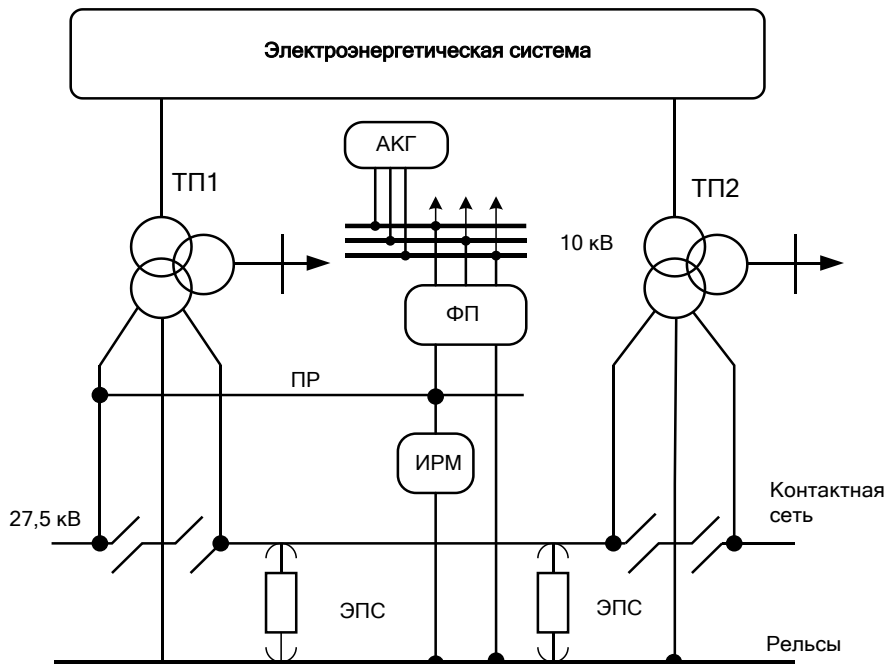


Рис. 1. Часть схемы СЭЖД: ЭПС — электродвижной состав

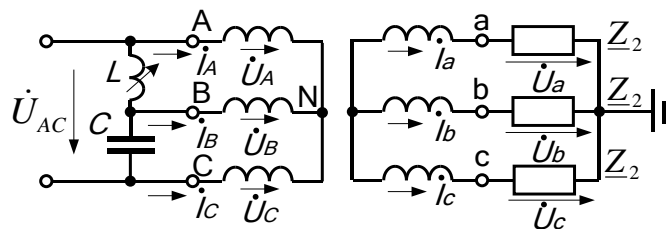


Рис. 2. Преобразователь числа фаз, реализованный на основе схемы Штейнмеца

Для определения реализуемости и оценки эффективности такого подхода необходима разработка цифровых моделей, обеспечивающих адекватное моделирование СЭЖД, оснащенных перечисленными выше устройствами. Вопросам исследования систем электроснабжения стационарных объектов, подключенных к тяговым подстанциям (ТП) и технологическим ЛЭП железнодорожного транспорта, посвящен целый ряд работ. Так, например, в статьях [1; 2] приведены решения задач повышения качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей. В работе [3] рассмотрены вопросы мониторинга качества электрической энергии в линиях автоблокировки. Проблемы, возникающие в распределительных сетях железнодорожных узлов, и пути их решения проанализированы в статье [4]. Задача повышения качества и надежности электроснабжения средств железнодорожной автоматики и телемеханики сформулирована в работах [5; 6]. Технологии управления качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта представлены в статье [7]. Описанию результатов решения задач регулирования напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей посвящена работа [8]. Анализ результатов моделирования системы электроснабжения нетяговых потребителей проведен в статье [9]. Проверка статистической адекватности математической модели системы электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей выполнена в работе [10]. Задачам моделирования систем электроснабжения нетяговых потребителей посвящены статьи [11; 12]. В работе [13] рассмотрены вопросы применения силовой электроники в системах тягового электроснабжения Японии. Результаты решения задачи повышения качества электроэнергии в СЭЖД представлены в статье [14]. Методика расчета фликера напряжения для однофазных систем тягового электроснабжения (СТЭ)

описана в работе [15]. Задача оптимизации качества электроэнергии на объектах транспорта рассмотрена в статье [16].

Вопросы использования симметрирующих устройств, реализованных на базе схемы Штейнмеца, в трехфазных электрических сетях рассмотрены в работах [17–19].

На основании приведенных выше результатов анализа отечественной и зарубежной литературы можно сделать вывод о том, что задача создания цифровых моделей систем электроснабжения, оснащенных ФП, АКГ и ИРМ и подключенных к линии электропередачи 25 кВ «провод – рельс», до настоящего времени не решена. Ниже представлены результаты решения этой задачи, полученные на основе применения методов моделирования СЭЖД, описанных в работах [20; 21].

Результаты моделирования. В качестве инструмента для моделирования СЭЖД, принципиальная схема которой показана на рис. 1, использовался программный продукт Fazonord [20]. Схема тягового электроснабжения 25 кВ и внешней сети 220 кВ включала следующие элементы:

- семь линий электропередачи 220 кВ, выполненных проводами АС-240; протяженности этих ЛЭП лежали в диапазоне 37...85 км;
- семь тяговых трансформаторов ТДТНЖ-40000/220/27,5;
- шесть межподстанционных зон (МПЗ).

Предполагалось, что МПЗ, расположенная между третьей и четвертой ТП, была оборудована линией «провод – рельс», выполненной проводом АС-95, рис. 3, а. Эта МПЗ была разбита на два участка с длинами 33,3 и 20,4 км. В точке стыковки участков предполагалось подключение следующих активных элементов: ФП (рис. 3, б) и однофазного ИРМ. На всех вводах вторичной стороны трансформатора ФП предполагалось присоединение активных кондиционеров гармоник.

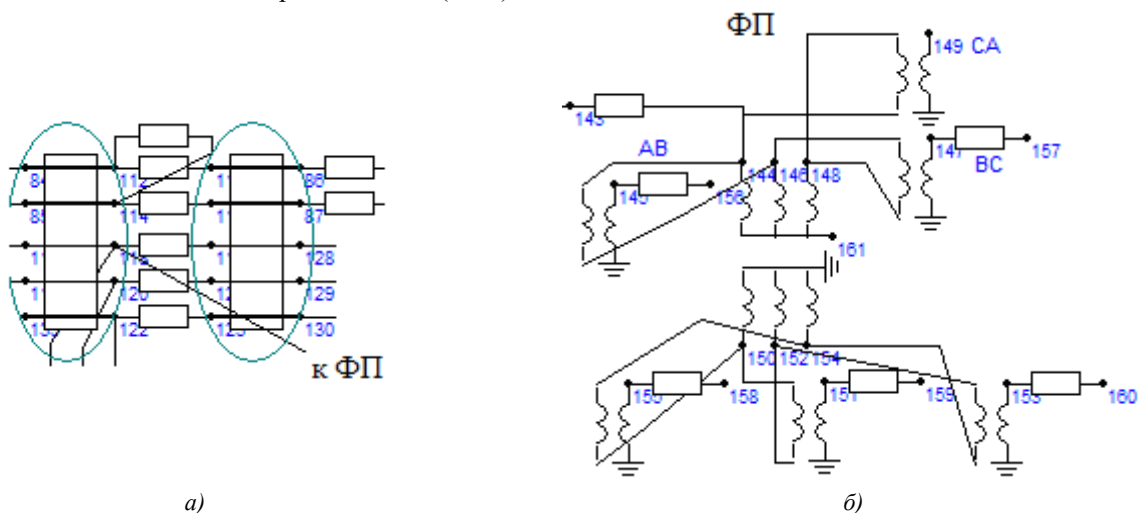


Рис. 3. Фрагменты схемы расчетной модели: а — часть схемы, отвечающая тяговой сети с линией ПР; б — часть схемы, соответствующая системе электроснабжения (СЭС) нетягового потребителя

При моделировании режимов рассматривалась ситуация движения четырех четных и нечетных поездов массой 5 024 т (рис. 4, а), токовые профили которых показаны на рис. 4, б, в. Результаты моделирования

представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 5–9. На рис. 5 показаны графики зависимостей напряжений на шинах 10 кВ преобразователя от времени для двух режимов: ИРМ включен и отключен. На рис. 6 приведены

аналогичные графики для коэффициента несимметрии k_{2U} .

На рис. 7 представлены графики, характеризующие временные зависимости напряжений в точке

подключения ИРМ. Динамика изменений реактивных мощностей, генерируемых ИРМ, иллюстрируется графиком, показанным на рис. 5.

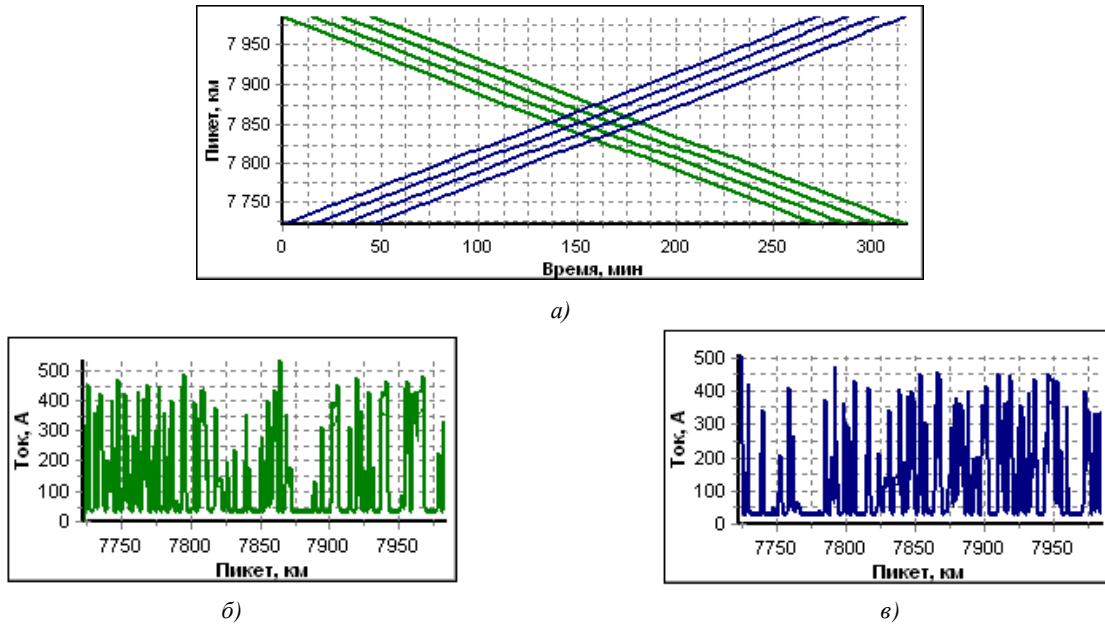


Рис. 4. График движения (а) и зависимости токов электровозов от пикета (б, в): б — нечетный поезд массой 5 024 т; в — четный поезд такой же массы

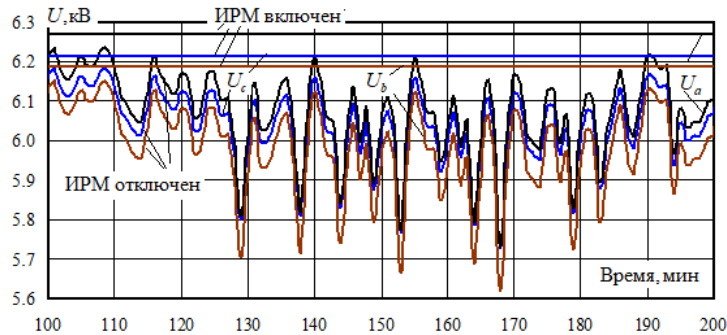


Рис. 5. Графики зависимостей напряжений на шинах 10 кВ преобразователя от времени

Результаты моделирования несинусоидальных режимов представлены на рис. 9–12 и в табл. 1 и 2. На рис. 9 приведены графики, отвечающие временным зависимостям суммарных коэффициентов гармоник k_U на шинах 10 кВ трансформатора ФП при отключенных АКГ. Формы кривых напряжений и токов на выводе фазы С преобразователя для 168-й минуты моделирования показаны на рис. 10. Спектры гармоник напряжения на выводе фазы С преобразователя при

отключенном АКГ представлены на рис. 11. Временные графики коэффициентов k_U на шинах 10 кВ трансформатора ФП при включенных АКГ приведены на рис. 12.

В табл. 1 сведены статистические данные по суммарным коэффициентам гармоник при отключенном АКГ, а в табл. 2 приведена информация о продолжительностях превышений коэффициентом k_U допустимых значений.

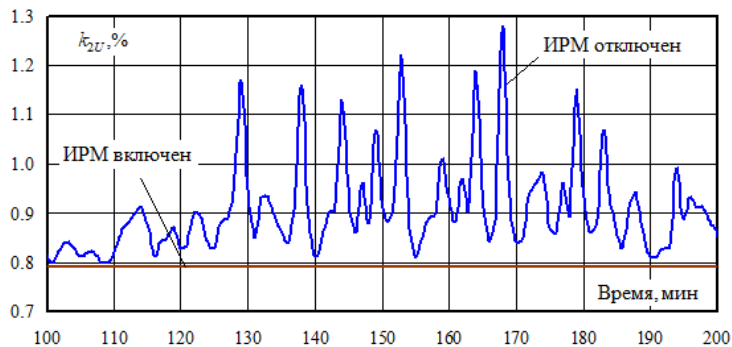


Рис. 6. Графики зависимостей коэффициентов несимметрии от времени

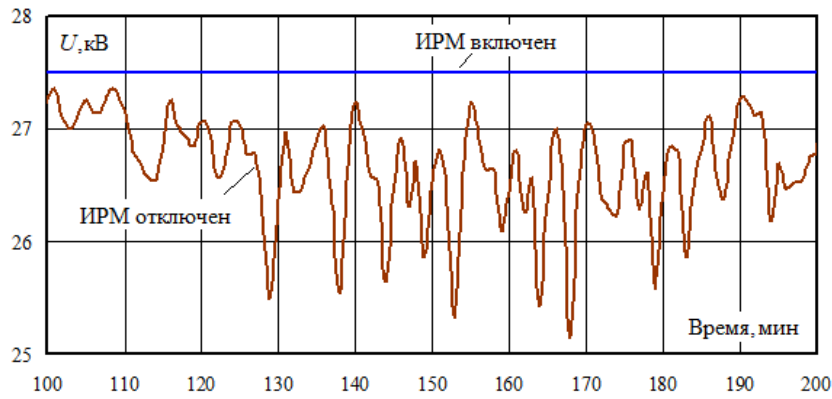


Рис. 7. Графики зависимостей напряжений в точке подключения ИРМ от времени

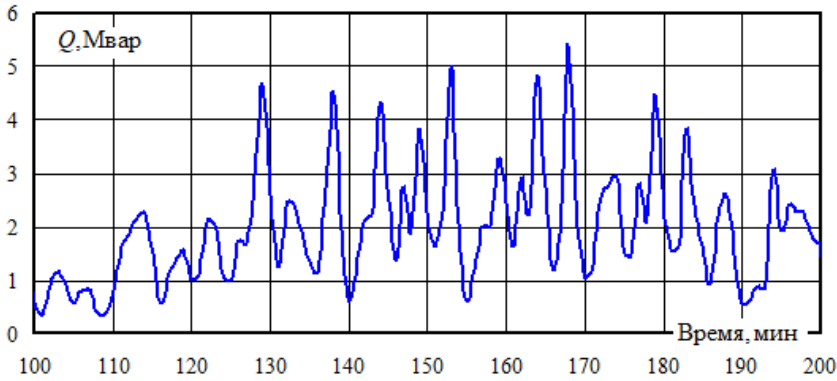


Рис. 8. График зависимости реактивной мощности, генерируемой ИРМ, от времени

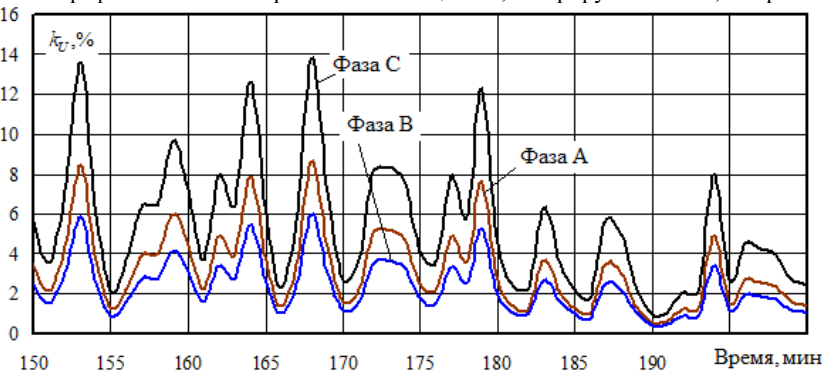


Рис. 9. График зависимостей коэффициентов гармоник от времени при отключенном АКГ

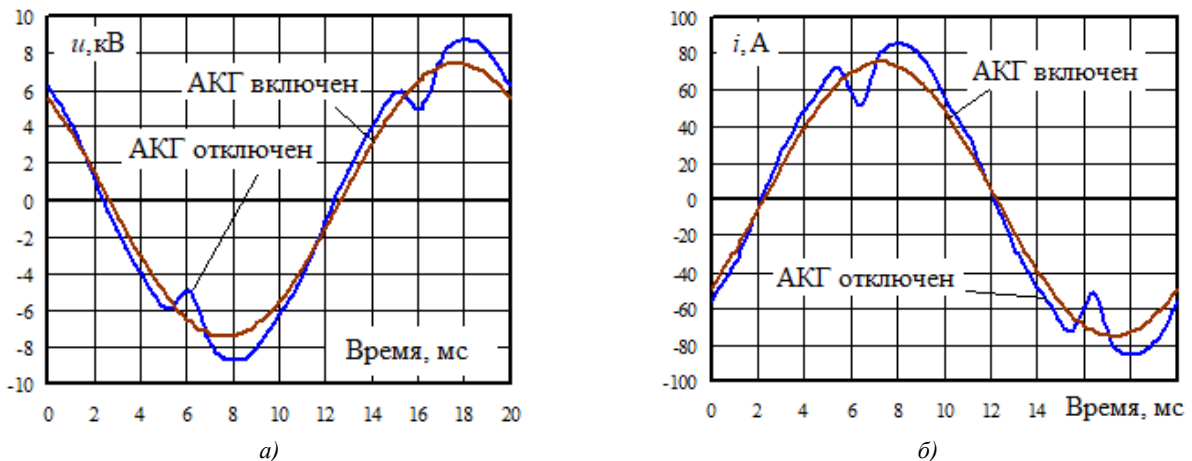


Рис. 10. Формы кривых напряжений (а) и токов (б) на выводе фазы С преобразователя

(узел 150 на рис. 2, б) для 168-й минуты моделирования

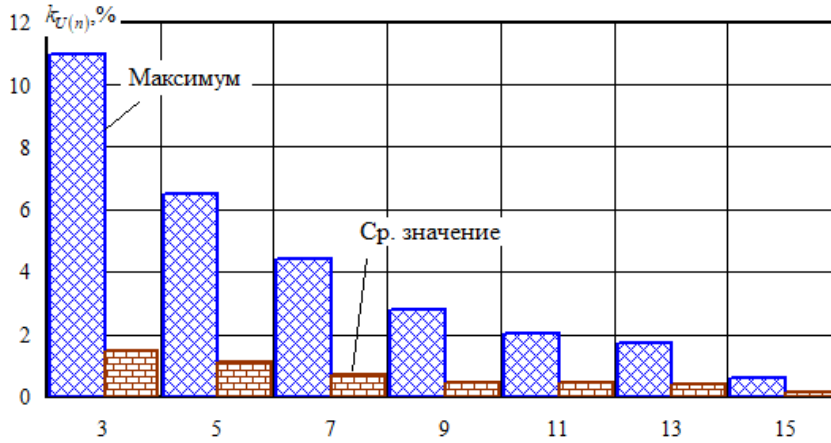


Рис. 11. Спектры гармоник напряжения на выводе фазы С преобразователя при отключенном АКГ

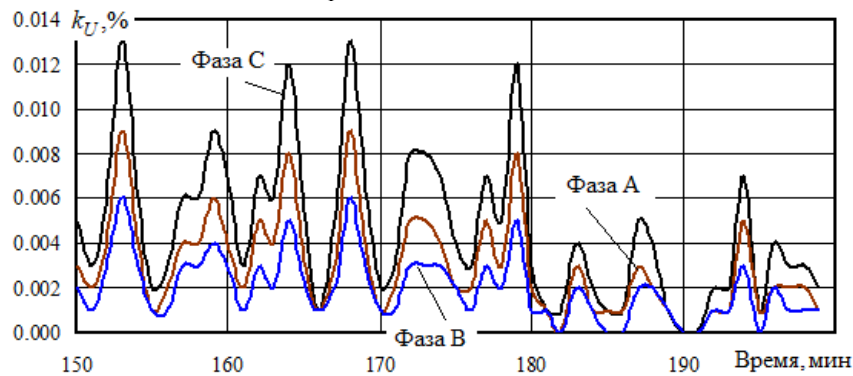


Рис. 12. График зависимостей коэффициентов гармоник от времени при включенном АКГ

Таблица 1. Максимальные и средние значения $k_{U(n)}$ при отключенном АКГ

№	Фаза	Среднее значение, %	Максимум, %
3	А	0,95	7,13
5		0,65	3,81
7		0,38	2,45
9		0,24	1,52
11		0,22	1,08
13		0,21	0,89
15		0,08	0,32
3	В	0,63	4,62
5		0,48	2,82
7		0,31	1,98
9		0,21	1,3
11		0,19	0,96
13		0,19	0,81
15		0,07	0,29
3	С	1,48	10,98
5		1,12	6,51
7		0,68	4,38
9		0,45	2,79
11		0,41	2,02
13		0,39	1,7
15		0,15	0,61

Таблица 2. Продолжительность превышений коэффициентом k_U допустимых значений

Фаза	T1, %	T2, %
А	3,46	1,26
В	2,2	0
С	12,89	3,46

Примечание. T1 — продолжительность превышения нормально допустимых значений; T2 — то же для предельно допустимых величин

На основе анализа результатов моделирования, показанных на приведенных выше графиках, и данных, сведенных в табл. 1 и 2, можно сформулировать следующие выводы:

- при отсутствии ИРМ в точке подключения ФП напряжения на выводах 10 кВ преобразователя числа фаз колеблются в диапазоне 5,6 ... 6,23 кВ; при включении ИРМ эти напряжения остаются неизменными (рис. 5);
- с помощью ИРМ удастся стабилизировать несимметрию на достаточно низком уровне; при этом величина k_{2U} не превышает 0,8 %;
- для получения этих результатов необходим ИРМ, позволяющий регулировать реактивную мощность в диапазоне 0...5 Мвар;
- при отключенных АКГ коэффициенты несинусоидальности достигают 14 %, что на 75 % превышает предельно допустимое значение; включение АКГ позволяет снизить величины k_U практически до нулевых уровней (рис. 12);

– при отключенных АКГ формы кривых напряжений и токов существенно отличаются от синусоид (рис. 10);

– в спектральном составе напряжений преобладает третья гармоника (рис. 11).

Заключение. Для расширения функциональных возможностей линий «провод – рельс» и улучшения качества электроэнергии может быть предложено техническое решение, использующее преобразователь числа фаз, активные кондиционеры гармоник, а также управляемый источник реактивной мощности однофазной конструкции, размещенные на подстанции потребителя. Преобразователь числа фаз выполняется по схеме Штейнмеца и реализуется на основе элементов силовой электроники. Для определения реализуемости и оценки эффективности такого подхода разработаны цифровые модели, обеспечивающие адекватное моделирование систем тягового электроснабжения,

оснащенных перечисленными выше устройствами. При формировании моделей применялись методы моделирования СТЭ, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения и основанные на использовании фазных координат.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020 г.

Литература

- Авилов В.Д. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей // Изв. Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 48-54.
- Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Омский науч. вестн. 2013. № 1 (117). С. 183-187.
- Бобун А.А., Пинчуков П.С. Мониторинг качества электрической энергии в линиях автоблокировки железных дорог // Актуальные вопросы и перспективы развития науки и образования: материалы Междунар. (заочной) науч.-практической конф. (29 нояб. 2018 г.). Нефтекамск, 2018. С. 23-26.
- Каштанов А.Л., Ананьева Н.Г. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов. Проблемы и пути их решения // Изв. Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 79-87.
- Ожиганов Н.В., Попов А.А., Ожиганов С.Н. О повышении качества и надежности электроснабжения средств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 10. С. 27-30.
- Ожиганов Н.В. Повышение качества электроэнергии для ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 22-26.
- Орешков Е.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-технической конф. (20 апр. 2018 г.). Курск, 2018. С. 106-109.
- Соколов С.Е., Соколова И.С. Регулирование напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Казахской акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2014. № 6 (91). С. 154-157.
- Евдасёв И.С., Дробов А.В., Галушко В.Н. Анализ результатов моделирования системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Междунар. науч.-практической конф. (23-24 нояб. 2017 г.). Гомель, 2017. С. 219-221.
- Дробов А.В. Статистическая проверка адекватности математической модели системы электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всерос. науч.-практической конф. (12-13 окт. 2017 г.). Кемерово, 2017. С. 65-67.
- Евдасев И.С., Галушко В.Н., Дробов А.В. Моделирование системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Белорусского гос. ун-та транспорта: наука и транспорт. 2017. № 2 (35). С. 33-36.
- Третьяков Е.А., Малышева Н.Н. Моделирование установившихся режимов системы электроснабжения нетяговых потребителей // Совершенствование электромеханических преобразователей энергии: междуз. тематический сб. науч. тр. Омск: ОмГУПС, 2010. С. 54-61.
- Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. 2014 Publisher: IEEE.
- Sokol Yevgen, Zamaruiev Volodymyr, Ivakhno Volodymyr, Styslo Bohdan. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018 Publisher: IEEE.
- Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. 2003 Publisher: IEEE.
- Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, Changmu Lee. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. 2006 Publisher: IEEE.
- Петрова А.С. Эффективность методов устранения перекоса фазных напряжений // Науч.-практические исследования. 2021. № 4-7 (39). С. 4-6.
- Дикович В.В., Кац И.М., Стремиллова О.С. Выбор методов и средств снижения несимметрии напряжений в восточной части ОЭС Сибири // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9-10. С. 66-72.
- Богдан А.В., Винников А.В., Надтока И.И. Необходимость структурно-функциональных изменений в сельской низковольтной распределительной сети // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 3. С. 69-79.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог: моногр. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 183 с.

References

1. Avilov V.D. Improving the quality of electricity in distribution networks of non-traction consumers // *Izvestia Transsiba (Journal of Transsib Railway Studies)*. 2013. № 1 (13). P. 48-54.
2. Avilov V.D., Tret'yakov E.A., Krauze A.V. Management of the quality of electricity in the distribution networks of railway transport // *Omsk Scientific Bulletin*. 2013. № 1 (117). P. 183-187.
3. Bobun A.A., Pinchukov P.S. Monitoring of the quality of electric energy in the automatic blocking lines of railways // *Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya: materialy Mezhdunar. (zaочноj) nauch.-prakticheskoy konf. (29 noyab. 2018 g.)*. Neftekamsk, 2018. P. 23-26.
4. Kashtanov A.L., Anan'eva N.G. Electric distribution networks of railway junctions. Problems and ways to solve them // *Izvestia Transsiba (Journal of Transsib Railway Studies)*. 2018. № 1 (33). P. 79-87.
5. Ozhiganov N.V., Popov A.A., Ozhiganov S.N. On improving the quality and reliability of power supply of ZhAT facilities // *Automation, communication and Informatics*. 2017. № 10. P. 27-30.
6. Ozhiganov N.V. Improving the quality of electricity for ZhAT // *Automation, communication and Informatics*. 2012. № 1. P. 22-26.
7. Oreshkov E.V. Quality management of electricity in distribution networks of railway transport // *Kachestvo v proizvodstvennyh i social'no-ekonomicheskikh sistemah: sb. nauch. tr. 6-j Mezhdunar. nauch.-tehnicheskoy konf. (20 apr. 2018 g.)*. Kursk, 2018. P. 106-109.
8. Sokolov S.E., Sokolova I.S. Voltage regulation in power supply systems for non-traction consumers of railway transport // *Vestn. Kazahskoj akad. transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva*. 2014. № 6 (91). P. 154-157.
9. Evdasyov I.S., Drobov A.V., Galushko V.N. Analysis of the results of modeling the power supply system for non-traction consumers of railway transport // *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (23-24 noyab. 2017 g.)*. Gomel', 2017. P. 219-221.
10. Drobov A.V. Statistical verification of the adequacy of the mathematical model of the power supply system for non-traction railway consumers // *Informacionno-telekommunikacionnye sistemy i tekhnologii: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12-13 okt. 2017 g.)*. Kemerovo, 2017. P. 65-67.
11. Evdasev I.S., Galushko V.N., Drobov A.V. Modeling of the power supply system for non-traction consumers of railway transport // *Bulletin of the Belarusian State University of Science and Transport*. 2017. № 2 (35). P. 33-36.
12. Tret'yakov E.A., Malysheva N.N. Modeling of steady state modes of the power supply system for non-traction consumers // *Sovershenstvovanie elektromekhanicheskikh preobrazovatelej energii: mezhvuz. tematicheskij sb. nauch. tr. Omsk: OmgUPS, 2010. P. 54-61*.
13. Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. 2014 Publisher: IEEE.
14. Sokol Yevgen, Zamaruiev Volodymyr, Ivakhno Volodymyr, Styslo Bohdan. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018 Publisher: IEEE.
15. Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. 2003 Publisher: IEEE.
16. Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, Changmu Lee. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. 2006 Publisher: IEEE.
17. Petrova A.S. Efficiency of methods for eliminating the imbalance of phase voltages // *Nauch.-prakticheskie issledovaniya*. 2021. № 4-7 (39). P. 4-6.
18. Dikovich V.V., Kac I.M., Stremilova O.S. Choice of methods and means of reducing stress asymmetry in the eastern part of the UPS of Siberia // *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*. 2016. № 9-10. P. 66-72.
19. Bogdan A.V., Vinnikov A.V., Nadtoka I.I. The need for structural and functional changes in the rural low-voltage distribution network // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*. 2019. V. 62. № 3. P. 69-79.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical regimes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lyubchenko I.A., Cherepanov A.V. Improving the quality of electricity in power supply systems for non-traction consumers of railways: monogr. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020. 183 p.