

Моделирование нормальных и аварийных режимов ЛЭП 25 кВ железнодорожного транспорта

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, И.С. Овечкин^{2c}

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

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Статья поступила 05.08.2024, принята 16.09.2024

Представлены исследования, цель которых состоит в разработке цифровых моделей систем тягового электроснабжения, позволяющих адекватно определять нормальные и аварийные режимы в линиях «два провода – рельс» (ДПП) 27,5 кВ с учетом электромагнитных влияний тяговых сетей. Для их реализации применялся программный продукт Fazonord, версия 5.3.4.1-2024. Рассматривались две модификации ДПП: линия типовой конструкции с использованием рельсов в качестве токоведущей части и трехпроводная ЛЭП с заземленной фазой (ЛЗФ), один из проводов которой присоединяется к рельсовому фидеру. Моделирование осуществлялось для объекта, включающего в первом варианте следующие элементы: 3 линии электропередачи 110 кВ, 2 подстанции с трансформаторами 40 000 кВ·А, тяговую сеть 25 кВ с двухпутного участка, 4 рельсовые нити и линию ДПП 27,5 кВ, 2 провода которой смонтированы на опорах контактной сети с полевой стороны, а в качестве третьей токоведущей части используется рельсовый путь. К этой линии были подключены 4 подстанции с трансформаторами мощностью 250 кВ·А, питающие стационарных потребителей. Для второго варианта линия ДПП заменялась на ЛЗФ. Представленная в статье методика и разработанные на ее основе компьютерные модели дают возможность адекватно определять нормальные и аварийные режимы и позволяют корректно учитывать следующие факторы: трехфазно-однофазную структуру системы электроснабжения; резкопеременную динамику и перемещение нагрузок в пространстве; электромагнитные влияния тяговой сети. Предлагаемая методика является универсальной и может применяться для тяговых сетей различного конструктивного исполнения, включая перспективные разработки повышенного напряжения. Она может использоваться на практике для определения режимов технологических ЛЭП железнодорожного транспорта и настройки устройств защиты.

Ключевые слова: технологические ЛЭП железнодорожного транспорта; нормальные и аварийные режимы; моделирование.

Modeling of normal and emergency modes of 25 kV transmission lines of railway transport

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, I.S. Ovechkin^{1c}

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

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Received 05.08.2024, accepted 16.09.2024

The research is presented, the purpose of which is to develop digital models of traction power supply systems that make it possible to adequately determine normal and emergency modes in 27.5 kV two-wire-rail (TWR) lines, taking into account the electromagnetic influences of traction networks. To implement them, the Fazonord software product, version 5.3.4.1-202, is used. Two modifications of the TWR power transmission line are considered: a line of a standard design, in which rails are used as the current-carrying part, and a three-wire line with a grounded phase, where one of its wires is connected to the rail feeder. The modeling is carried out for an object that, in the first version, included the following elements: three 110 kV power transmission lines, two substations with 40,000 kV·A transformers, a 25 kV traction network with two contact suspensions, four rail threads and a 27.5 kV TWR line, the wires of which are mounted on the contact network supports on the field side, and the rail track is used as the third wire. For the second option, the TWR line was replaced with a power line with a grounded phase. The methodology presented in the article and the computer models developed on its basis make it possible to adequately determine normal and emergency modes and allow the following factors to be correctly taken into account: three-phase-single-phase structure of the power supply system; sharply changing dynamics and movement of traction loads in space; electromagnetic influences of the traction network. The proposed methodology is universal and can be used for traction networks of various designs, including promising high-voltage designs. It can be used in practice to determine the modes of technological power lines of railway transport and configure protection devices.

Keywords: technological power lines of railway transport; normal and emergency modes; delimitation.

Введение. Вопросам определения режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ) посвящено большое число публикаций. Так, например, оценка электромагнитной совместимости СТЭ со смежными системами, полученная на основе моделирования, дана в [1]. В [2] решена задача вычисления транзитных потоков энергии по тяговым сетям. Вопросы определения режимов СТЭ при пропуске поездов повышенной массы рассмотрены в [3]. Методика расчета СТЭ с оценкой эффективности работы защиты представлена в [4]. Результаты анализа программного обеспечения для целей анализа аварийных режимов приведены в [5]. Алгоритмы моделирования системы тягового электроснабжения с использованием данных измерений описаны в [6]. Исследованию динамической устойчивости энергосистемы с учетом СТЭ посвящена статья [7]. Математическая модель СТЭ представлена в [8]. Результаты расчета эквивалентной нагрузки тяговых сетей (ТС) приведены в [9]. Методика определения режимов СТЭ при различных условиях описана в [10]. Имитационная модель совместной работы ТС и линий «два провода – рельс» (ДПР) приведена в [11]. Причина недостоверности учета потребления электроэнергии на линии электропередачи (ЛЭП) ДПР проанализирована в [12]. Оценка влияния тока тяговой сети на ЛЭП ДПР дана в [13]. Результаты исследования режимов работы и

качества электроэнергии в линиях ДПР представлены в [14]. Подход к модернизации ЛЭП ДПР предложен в [15]. Анализ технологии производства работ на отключенной ЛЭП ДПР проведен в [16]. Исследованию наведенного напряжения в линии продольного электроснабжения посвящена работа [17]. Описание особенностей ЛЭП ДПР приведено в [18]. Алгоритмы определения режимов несимметричных ЛЭП, использующих землю в качестве токоведущей части, описаны в [19–21].

Несмотря на то, что в перечисленных работах решены важные аспекты применения ДПР, вопросы моделирования таких режимов в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта, находящихся в зонах значительного электромагнитного влияния тяговых сетей, изучены недостаточно. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку цифровых моделей, позволяющих адекватно определять режимы короткого замыкания (КЗ) в указанных ЛЭП. Для их реализации использовались методы и алгоритмы, описанные в работах [22–25].

Воздушная линия ДПР. Моделирование нормальных и аварийных режимов осуществлялось в программном комплексе *Fazonord*, версия 5.3.4.9–2024 для системы электроснабжения (рис. 1) участка железной дороги.

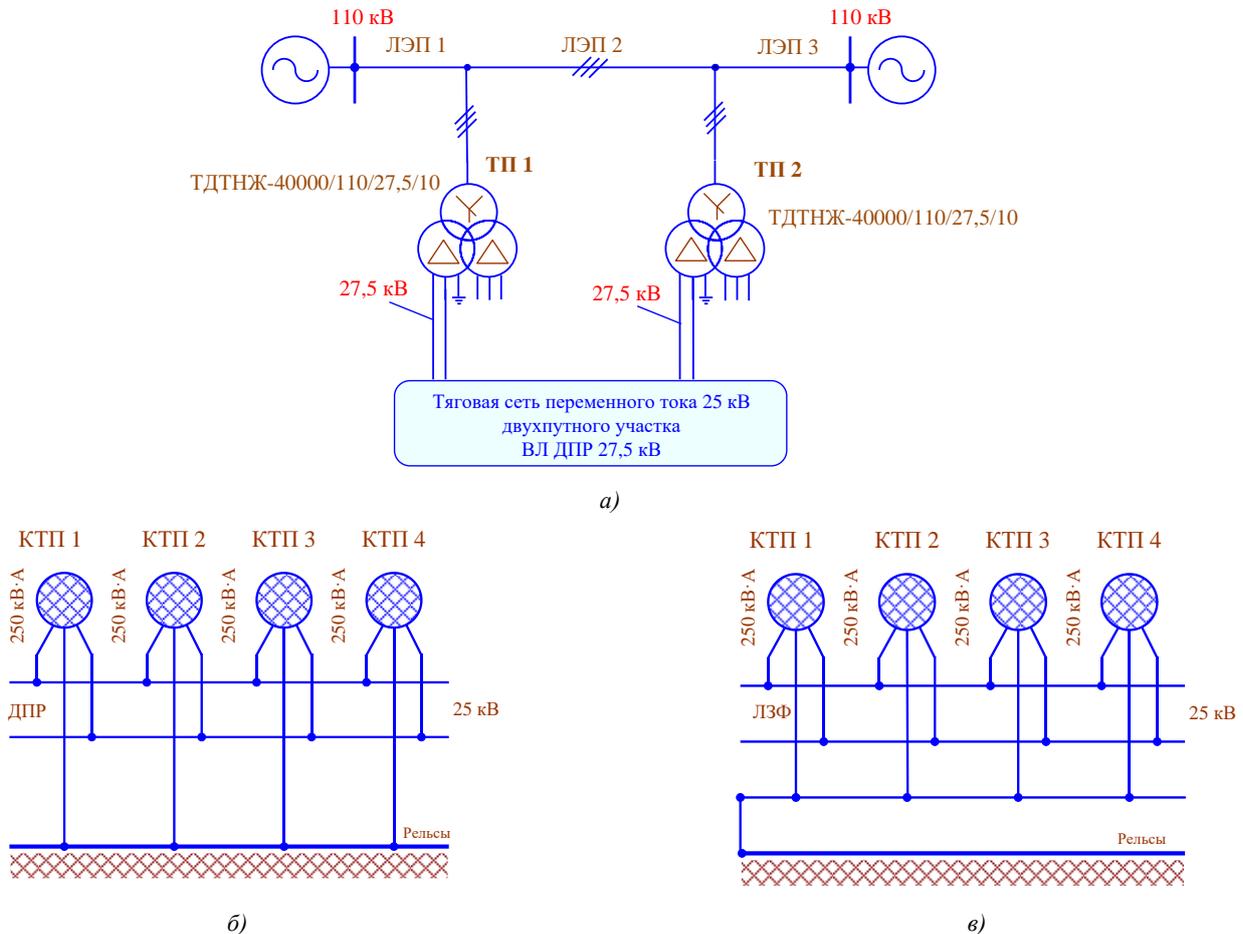


Рис. 1. Схема системы электроснабжения (а), а также линий ДПР (б) и ЛЗФ (в): ТП — тяговая подстанция; ВЛ — воздушная линия; КТП — комплектная трансформаторная подстанция

В модели представлены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; тяговые трансформаторы ТДТНЖ–40000/110/27,5; участок ТС протяженностью 50 км двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити, линия ДПР напряжением 25 кВ, смонтированная на опорах ТС с полевой стороны. Поперечное сечение системы токоведущих частей показано на рис. 2. Нагрузки создавались движением двух поездов массой

3 192 т в нечетном направлении и такого же числа составов массой 4 192 т — в четном.

На 10; 20; 30 и 40 км к линии ДПР подключается трансформатор марки ТМ–250/27,5/0,4 (рис. 1, б, в), который моделирует комплектные подстанции (КТП) с нагрузкой на каждую фазу $0,059 + j0,03$ МВА.



Рис. 2. Расположение токоведущих частей при использовании ВЛ ДПР

Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 3–8. Исходный, доаварийный режим представлен на рис. 3, на котором приведены графики зависимостей от времени t следующих параметров: напряжений основной частоты $U_1 = U_1(t)$, суммарных коэффициентов высших гармоник (ВГ) $k_U = k_U(t)$, эффективных величин с учетом ВГ $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$. На рис. 4, г показаны графики, иллюстрирующие сравнение $U_1 = U_1(t)$ и $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$.

Полученные результаты на 20 км от ТП 1 показывают, что из-за влияния тяговой сети наблюдаются заметные отклонения фазных напряжений основной частоты от номинальных значений; при этом по фазе А коэффициент вариации достигает 4 %, а размах колебаний равен 4,14 кВ.

Возникает существенная несимметрия (рис. 3, а), которая приводит к различию токов КЗ разных фаз.

Электровозы вызывают значительные гармонические искажения напряжений ВЛ ДПР: максимум коэффициента гармоник k_U по фазе А равен 68 %, а по фазе В — 35 %.

На рис. 4 представлены зависимости параметров, характеризующие исходный (доаварийный) режим, на стороне 0,4 кВ КТП, располагаемой на 20 км от ТП 1.

Полученные результаты показывают, что из-за влияния тяговой сети наблюдаются отклонения фазных напряжений от номинала; при этом по фазе А коэффициент вариации достигает 5 %, а размах колебаний равен 40 В.

Имеют место несимметрия напряжений (рис. 4, а) и заметный уровень ВГ: максимум k_U по фазе А равен 38 %, а по фазе В и С — 4 и 42 % соответственно.

На рис. 5 представлена зависимость максимального значения k_{2U} на стороне 0,4 кВ от координаты места установки КТП.

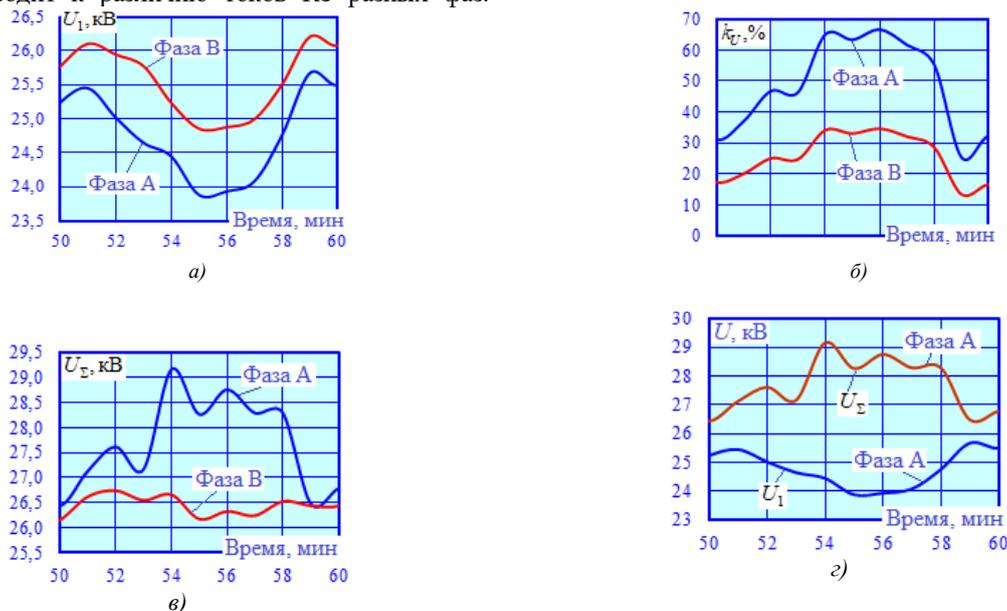


Рис. 3. Исходный, доаварийный режим: напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г):

$$U_\Sigma = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$$

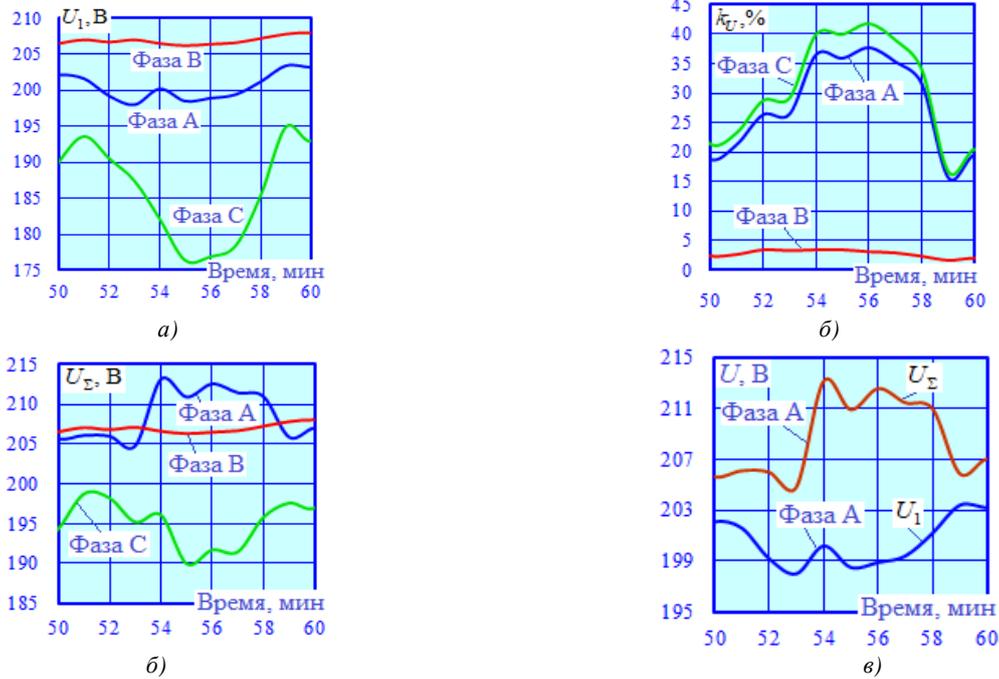


Рис. 4. Исходный, доаварийный режим на стороне 0,4 кВ: напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ

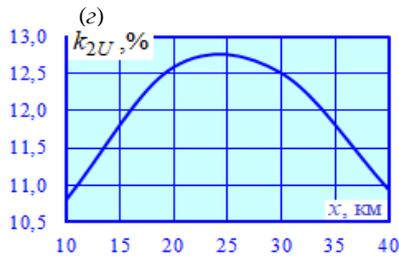


Рис. 5. Зависимость k_{2U} на стороне 0,4 кВ от координаты места установки КТП

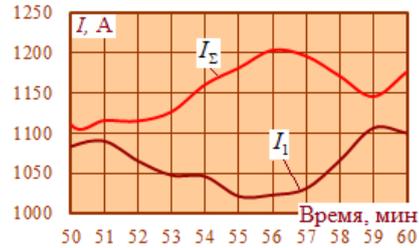


Рис. 6. Токи КЗ: $I_\Sigma = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$

Как видно на рис. 5, зависимость k_{2U} от координаты x имеет нелинейный характер с максимумом в середине рассматриваемого участка.

Результаты моделирования режимов КЗ фазы А в точке, находящейся на расстоянии 20 км от подстанции ТП 1, приведены на рис. 6 и 7; при этом напряжение

неповрежденной фазы В увеличивается на 2 кВ. Потенциал фазы А в точке КЗ снижается до нуля. Максимальная величина коэффициента k_U для фазы В уменьшается на 22 %, а для фазы А — на 10 %. На рис. 6 показан характер изменения токов КЗ. На рис. 7 представлены формы кривых напряжения и тока.

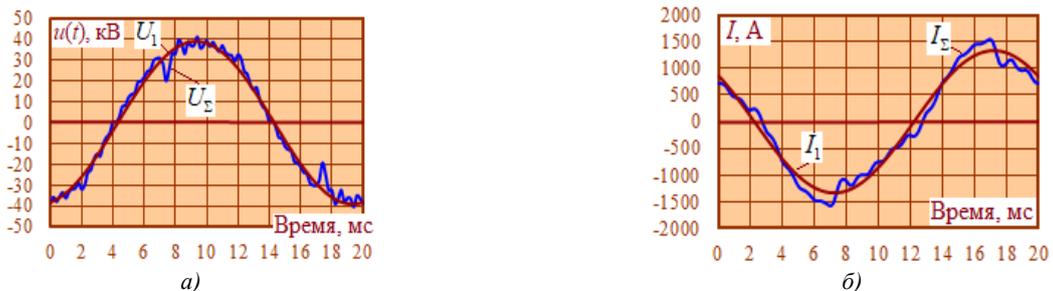


Рис. 7. Форма кривой напряжения неповрежденной фазы В (а) и токов КЗ (б) на 39-й мин моделирования

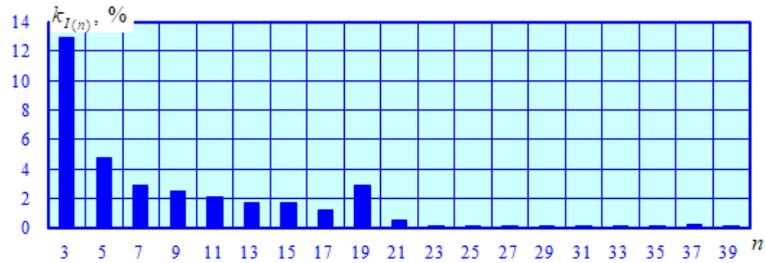


Рис. 8. Спектральный состав тока КЗ в месте повреждения

Коэффициент гармоник тока КЗ в некоторые моменты времени достигает сотен процентов, что приводит к отличиям его формы кривой от синусоиды (рис. 7).

Анализируя результаты изменения параметров на стороне низкого напряжения 0,4 кВ КТП при моделировании КЗ в ВЛ ДПР на расстоянии 20 км от ТП 1, выявлено, что напряжение неповрежденной фазы В увеличивается на 40 В. Потенциал фазы А в точке КЗ

снижается на 80 В, фазы С — на 70 В. Максимальная величина коэффициента k_U для фазы В возрастает на 4 %, а для фазы А и С уменьшается на 30 и 36 %.

В спектральном составе тока КЗ (рис. 8) наблюдается незначительный вклад ВГ. Для гармоники под номером 3 фиксируется величина $k_{I(n)} = I_n / I_1 \cdot 100$, равная 13 %. Для остальных гармоник значения этого параметра лежат в диапазоне 0,1 ... 4,5 %.



Рис. 9. Расположение токоведущих частей при использовании ЛЗФ

Воздушная линия с заземленной фазой (ЛЗФ).

Ниже приведены результаты моделирования КЗ при питании нетяговых потребителей по ЛЭП ЛЗФ [18], которая представляет собой высоковольтную линию 27,5 кВ, с практически одинаковыми пофазными параметрами. В данной линии все токоведущие части выполняются проводами, один из которых присоединяется к рельсовому фидеру тяговой подстанции.

В целях симметрирования заземленный провод выбирается с такими же электрическими параметрами, как и у токоведущих частей двух других фаз.

Ввод фазы КТП, который ранее подключался к рельсам, переключается на данный провод. Такая конструкция позволяет значительно снизить влияние токов ДПР на работу рельсовых цепей и оборудование автоблокировки. Поперечное сечение ЛЗФ показано на рис. 9.

На рис. 10 показаны результаты изменения параметров на стороне 0,4 кВ КТП при моделировании

КЗ в ВЛ ЛЗФ на расстоянии 20 км от ТП 1. По сравнению с аналогичным режимом ДПР, для данного случая напряжение неповрежденной фазы В снижается на 10 В, фазы С — на 20 В, а для фазы А напряжение уменьшается на 10 В. Максимальная величина коэффициента k_U для фазы А увеличивается на 2 %, а для фазы В и С — на 5 и 9 %.

Максимум k_{2U} наблюдается в месте повреждения и равен 80 %, что на 20 % меньше, чем в линии ДПР. На рис. 12, в показан характер изменения токов КЗ во времени. По сравнению с линией ДПР, максимальное значение эффективного тока уменьшается на 100 А.

В спектральном составе тока КЗ (рис. 11) имеет место незначительный вклад ВГ. Для гармоники под номером 3 величина $k_{I(n)} = 12 \%$. Для остальных ВГ этот параметр лежит в интервале 0,1 ... 4,3 %.

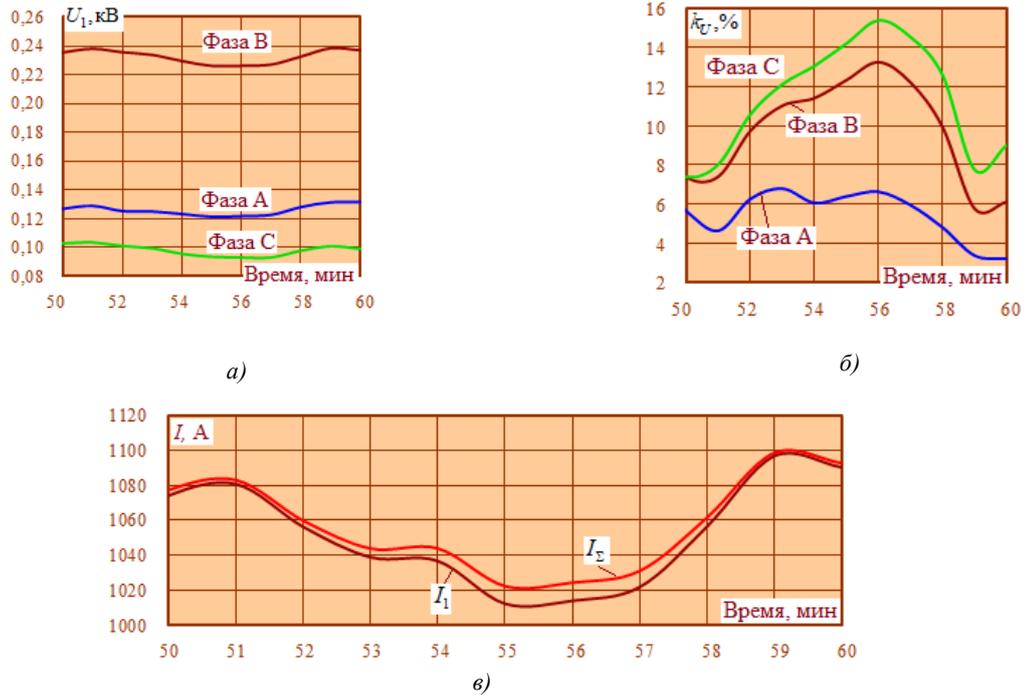


Рис. 10. Режим КЗ: напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б) и токи КЗ (в)

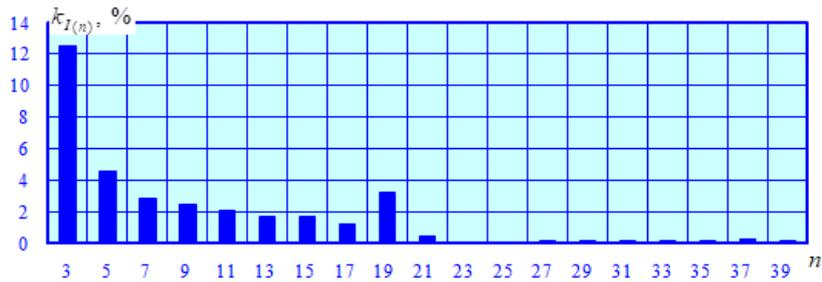


Рис. 11. Спектральный состав тока КЗ в месте повреждения

Сравнение вариантов исполнения ВЛ ДПР.

Результаты сравнения приведены на рис. 12–14. На рис. 12 представлены зависимости напряжения в ЛЭП ДПР и ЛЗФ от координаты x при КЗ на расстоянии 20 км

от ТП 1. На рисунке видно, что графики $U = U(x)$ фазы А для ЛЗФ и ДПР совпадают, а для фаз В и С зависимости $U = U(x)$ располагаются немного выше.

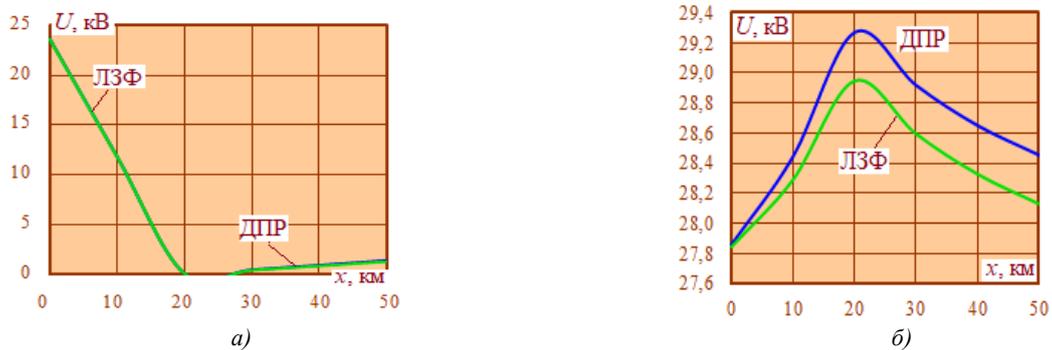


Рис. 12. Режим КЗ. Зависимость напряжения фазы А (а) и фазы В (б) от места измерения

Напряжение поврежденной фазы А для обеих ЛЭП уменьшается до места КЗ, где принимает минимальное значение 89 В. При дальнейшем увеличении

координаты x напряжение возрастает до 1,38 кВ (рис. 12, а). Напряжение фазы В возрастает при увеличении x от нуля до 20 км, а затем начинает снижаться (рис. 12, б).

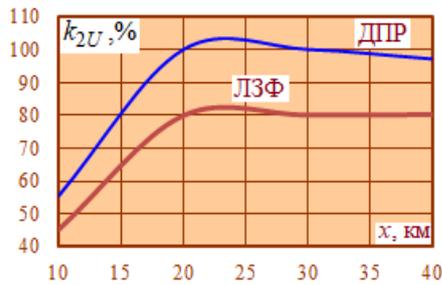


Рис. 13. Зависимость k_{2U} на стороне 0,4 кВ от координаты места установки КТП

Характер изменения k_{2U} (рис. 13) для линий ДПР и ЛЗФ схож, но имеет место отличие, заключающееся в разнице максимального значения в месте повреждения. Для линии ДПР он на 20 % больше. Сравнение спектральных составов ДПР и ЛЗФ показано на рис. 14. Для всех ВГ, кроме 19-й величины, $k_{U(n)}$ линии ЛЗФ меньше, чем у ДПР.

Заключение. Представленная в статье методика и разработанные на ее основе компьютерные модели, реализованные в программном комплексе *Fazonord*,

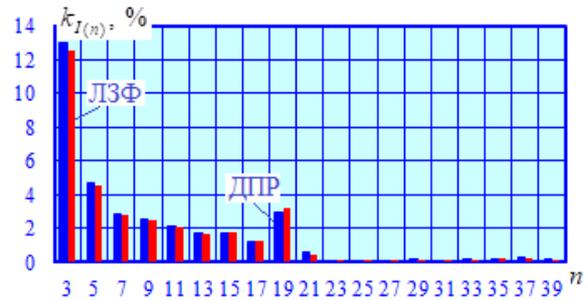


Рис. 14. Спектральный состав тока КЗ в месте повреждения

дают возможность адекватно определять нормальные и аварийные режимы ЛЭП ДПР и ЛЗФ. Они позволяют корректно оценить электромагнитное влияние контактной сети с учетом высших гармоник. Методика является универсальной и применима для ТС любой конструкции.

Разработки, описанные в статье, могут быть использованы на практике для проведения расчетов режимов и настройки устройств релейной защиты и автоматики.

Литература

- Бочарников Ю.В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами // Технологии электромагнитной совместимости. 2008. № 1 (24). С. 45-55.
- Константинова Ю.А., Ли В.Н., Константинов А.М. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока // Вестн. Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4 (37). С. 70-76.
- Гаранин М.А., Бошкарева Т.В., Фроленков С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуска поездов повышенной массы // Вестн. транспорта Поволжья. 2016. № 5 (59). С. 22-27.
- Пинчуков П.С., Макашева С.И. Моделирование режимов системы тягового электроснабжения с оценкой эффективности работы защиты // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 2 (31). С. 58-64.
- Костин А.П., Пинчуков П.С. Анализ программного обеспечения для моделирования аварийных режимов в системе тягового электроснабжения // Науч.-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 2. С. 23-28.
- Yong Wang Zhang, Rui Min Chen, Yong Xiao, Wei Zhao, Xin Ran Li, Guang Dong Zhang. Measurement-based modeling of traction power supply system. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011. Publisher: IEEE.
- Jin Xin Li, Xin Ran Li, Wei Deng, Zhen Hua Xu, Qian Yong Liu, Yong Wang Zhang. Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Publisher: IEEE.
- Xishan Yu General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 2020. Publisher: IEEE.
- Chunjing Lu, Xinran Li, Shulin Chen. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021. Publisher: IEEE.
- Jie Luo. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power Supply System under Multiple Working Conditions. 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), 2022. Publisher: IEEE.
- Ивлев В.А., Евдасев И.С. Имитационная модель совместной работы тяговой сети и линий «два провода - рельс» // Вестн. Белорусского гос. ун-та транспорта: наука и транспорт. 2010. № 2 (21). С. 20-23.
- Семенова Е.Ю. Причина недоверности учета потребления электроэнергии на линиях «два провода - рельс» продольного электроснабжения электрифицированного транспорта // Электричество. 2021. № 9. С. 67-72.
- Семёнова Е.Ю., Дудин Б.А., Дюдалова Д.А. Влияние тока тяговой сети на провода по системе «два провода - рельс» // Кабели и провода. 2023. № 6 (404). С. 19-25.
- Финоченко Т.Э. Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПР // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2002. № 3. С. 60-62.
- Бочев А.С., Финоченко Т.Э. Модернизация линии продольного электроснабжения «два провода - рельс» // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2006. № 4 (24). С. 117-119.
- Заруцкая Т.А., Попова Н.А., Сергеев С.С. Анализ технологии производства работ на отключенной секции ДПР при различной конфигурации линии // Транспорт: наука, образование, производство: тр. междунар. науч.-практической конф. (12-15 апр. 2016 г.). Ростов н/Д., 2016. С. 269-271.
- Семенова Е.Ю. Исследование наведенного напряжения в линии продольного электроснабжения // Электричество. 2020. № 8. С. 23-28.
- Емцев А.Н., Шумаков Н.М., Фадеев В.А. Линии ДПР электрифицированных железных дорог как источник питания нетяговых потребителей // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2010. Т. 2. С. 3-8.
- Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Лесных Е.В. Четырехфазные системы электроснабжения на базе линий электропередачи «два провода - рельс» // Политранспортные системы. Новосибирск, 2009. С. 128-133.
- Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Лесных Е.В. Использование линий электропередачи по схеме «два провода - земля» // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2017. Т. 21, № 3 (122). С. 91-99.
- Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Малеева Е.И. Линии электропередач с уменьшенным количеством проводов в горных территориях // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10, № 3 (37). С. 404-410.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Качество электроэнергии в линиях

ДПР // Наука и техника транспорта. 2008. № 3. С. 60-64.

23. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В. Уменьшение несимметрии и гармонических искажений на подстанциях, подключенных к линиям электропередачи 25 кВ, использующим рельсы в качестве токоведущей части // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 58-65.
24. Крюков А.В., Лэ В.Т., Чан З.Х. Моделирование режимов систем электроснабжения, оборудованных сдвоенными линиями «два провода - земля» // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 41. С. 41-55.
25. Kryukov Andrey, Cherepanov Aleksandr, Nguen Khyok Khieu. Reducing Asymmetry and Harmonic Distortion at Substations Connected to 25 kV Power Lines Using Rails As a Live Part. 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022. Publisher: IEEE.

References

1. Bocharnikov Yu.V. Modeling of a traction power supply system to assess electromagnetic compatibility with adjacent systems // Technology of electromagnetic compatibility. 2008. № 1 (24). P. 45-55.
2. Konstantinova Yu.A., Li V.N., Konstantinov A.M. Simulation modeling of electricity transit from an external power supply system via an AC traction network // Sholom-Aleichem Priamursky state university bulletin. 2019. № 4 (37). P. 70-76.
3. Garanin M.A., Boshkareva T.V., Frolenkov S.A. Modeling of an alternating current traction power supply system for passing heavy trains // Vestn. transporta Povolzh'ya. 2016. № 5 (59). P. 22-27.
4. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Modeling of traction power supply system modes with assessment of protection efficiency // Pacific Rim countries transportation system. 2022. № 2 (31). P. 58-64.
5. Kostin A.P., Pinchukov P.S. Analysis of software for modeling emergency conditions in the traction power supply system // Nauch.-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2023. V. 2. P. 23-28.
6. Yong Wang Zhang, Rui Min Chen, Yong Xiao, Wei Zhao, Xin Ran Li, Guang Dong Zhang. Measurement-based modeling of traction power supply system. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011. Publisher: IEEE.
7. Jin Xin Li, Xin Ran Li, Wei Deng, Zhen Hua Xu, Qian Yong Liu, Yong Wang Zhang. Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Publisher: IEEE.
8. Xishan Yu General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 2020. Publisher: IEEE.
9. Chunjing Lu, Xinran Li, Shulin Chen. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021. Publisher: IEEE.
10. Jie Luo. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power

- Supply System under Multiple Working Conditions. 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), 2022. Publisher: IEEE.
11. Ivlev V.A., Evdasev I.S. Simulation model of joint operation of the traction network and "two wires - rail" lines // Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science & Transport. 2010. № 2 (21). P. 20-23.
12. Semenova E.Yu. The reason for the unreliability of electricity consumption metering on the "two wires - rail" lines of longitudinal power supply of electrified transport // Electrichestvo (Electricity). 2021. № 9. P. 67-72.
13. Semyonova E.Yu., Dudin B.A., Dyudalova D.A. Influence of traction network current on wires in the "two wires - rail" system // Cables and wires. 2023. № 6 (404). P. 19-25.
14. Finochenko T.E. Study of operating modes and quality of electricity in DPR lines // Vestnik RGUPS. 2002. № 3. P. 60-62.
15. Bochev A.S., Finochenko T.E. Modernization of the longitudinal power supply line "two wires - rails" // Vestnik RGUPS. 2006. № 4 (24). P. 117-119.
16. Zaruckaya T.A., Popova N.A., Sergeev S.S. Analysis of the technology for performing work on a disconnected section of the DPR with different line configurations: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: tr. mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (12-15 apr. 2016 g.). Rostov n/D., 2016. P. 269-271.
17. Semenova E.Yu. Study of induced voltage in a longitudinal power supply line // Electrichestvo (Electricity). 2020. № 8. P. 23-28.
18. Emcev A.N., Shumakov N.M., Fadeev V.A. DPR lines of electrified railways as a power source for non-traction consumers // Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2010. V. 2. P. 3-8.
19. Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F., Lesnyh E.V. Four-phase power supply systems based on two-wire-rail power transmission lines // Politransportnye sistemy. Novosibirsk, 2009. P. 128-133.
20. Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F., Lesnyh E.V. Use of power lines according to the "two wires - ground" scheme // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. V. 21, № 3 (122). P. 91-99.
21. Buryanina N.S., Korolyuk Yu. F., Maleeva E.I. Power lines with a reduced number of wires in mountainous areas // Sustainable development of mountain territories. 2018. V. 10, № 3 (37). P. 404-410.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Quality of electricity in DPR lines // Science and Technology in Transport. 2008. № 3. P. 60-64.
23. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Reducing asymmetry and harmonic distortion at substations connected to 25 kV power lines using rails as a current-carrying part // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 58-65.
24. Kryukov A.V., Le V.T., Chan Z.H. Modeling of modes of power supply systems equipped with dual lines "two wires - ground" // Actual issues of agrarian science. 2021. № 41. P. 41-55.
25. Kryukov Andrey, Cherepanov Aleksandr, Nguen Khyok Khieu. Reducing Asymmetry and Harmonic Distortion at Substations Connected to 25 kV Power Lines Using Rails As a Live Part. 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022. Publisher: IEEE.