

Научная статья

УДК 681.3.06

EDN MCNUZV

DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(2).221-236

**А.В. Крюков**

*Иркутский государственный университет путей сообщения;
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

И.С. Овечкин

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения железных дорог

Аннотация. Одним из распространенных видов аварий в сетях среднего напряжения, в которых нейтраль питающего трансформатора изолирована, является двойное замыкание на землю (ДЗЗ). В этом режиме ток в поврежденных фазах увеличивается, а напряжение в исправном проводе относительно грунта достигает линейного значения. В отличие от двухфазного короткого замыкания (КЗ) величина тока ДЗЗ не всегда приводит к срабатыванию релейной защиты. Поэтому становится актуальной задача разработки методов и средств для идентификации ДЗЗ и поиска мест их возникновения. В современных условиях ее решение должно осуществляться на основе компьютерных технологий, что требует разработки адекватных моделей для определения режимов ДЗЗ. Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что многие важные аспекты ДЗЗ детально рассмотрены. Однако процессы ДЗЗ в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта, находящихся в зонах повышенного электромагнитного влияния тяговых сетей, остаются не изученными. Эффективный подход к решению этой задачи может быть основан на применении методов моделирования режимов электрических систем, разработанных в ИрГУПСе. Использование такого подхода позволяет получать точные и достоверные данные при расчете ДЗЗ в системах электроснабжения железных дорог.

В статье представлены результаты исследований, направленных на создание моделей для определения режимов ДЗЗ в линиях 6 и 10 кВ, питающих стационарные объекты железных дорог и подверженных электромагнитному воздействию тяговой сети.

Ключевые слова. Двойные замыкания на землю, моделирование, электромагнитные влияния тяговых сетей.

Информация о статье. Дата поступления: 4 марта 2024 г.; дата принятия к публикации: 23 мая 2024 г.; дата онлайн-размещения: 19 июня 2024 г.

A.V. Kryukov*Irkutsk State Transport University;
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation***I.S. Ovechkin***Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation*

Modeling of Double Ground Fault Modes in Railway Power Supply Systems

Abstract. One of the common types of faults in medium voltage networks, where the neutral of the supply transformer is isolated, is a double earth fault. In this mode, the current in the damaged phases increases, and the voltage in the undamaged wire relative to the ground reaches a linear value. Unlike a two-phase short circuit, the magnitude of the double circuit current may not trigger the relay protection. Therefore, the task of developing methods and tools for identifying double short circuits and searching for places of their occurrence becomes urgent. In modern conditions, the solution to this problem must be carried out on the basis of computer modeling, which requires the development of adequate models for determining the modes of double ground faults. An analysis of domestic and foreign publications shows that many important aspects of double closures have been studied in detail. However, the problem of their modeling in technological power lines of railway transport located in areas of increased electromagnetic influence of traction networks remains unsolved. An effective approach to solving it can be based on the use of methods for modeling the modes of electrical systems developed at the Irkutsk State University of Transport. The use of these methods makes it possible to obtain accurate and reliable results when calculating double short circuits in railway power supply systems. The article presents the results of research aimed at creating models for determining the modes of double ground faults in 6 and 10 kV lines feeding automatic blocking facilities and subject to the electromagnetic influence of the traction network.

Keywords. Double ground faults, modeling, electromagnetic influences of traction networks.

Article info. Received 4 March, 2024; Accepted 23 May, 2024; Available online 19 June, 2024.

Введение

Вдоль трасс магистральных железных дорог находятся объекты сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ), предназначенные для обеспечения безопасного движения поездов. Большая часть из них относится к первой категории или особой группе по надежности электроснабжения. Для подключения этих устройств сооружаются специальные линии электропередачи с напряжением 6–10 кВ. Основное питание осуществляется от воздушных ЛЭП, установленных на отдельных опорах (ВЛ СЦБ). Для резервирования используются ЛЭП продольного электроснабжения, расположенные на опорах контактной сети. С целью снижения негативного воздействия на рельсовые цепи железнодорожной автоматики ВЛ СЦБ подключается к шинам собственных нужд че-

рез повышающие трансформаторы с соединением обмоток звезда с нулевым выводом — треугольник. Для правильного моделирования работы таких ЛЭП необходимо учитывать ряд факторов, которые значительно усложняют решение данной задачи. К ним можно отнести следующие аспекты:

- трехфазно-однофазную структуру системы электроснабжения;
- резкопеременную динамику и перемещение тяговых нагрузок в пространстве;
- электромагнитные влияния тяговой сети на ВЛ СЦБ и др.

В процессе эксплуатации ВЛ СЦБ могут возникать режимы двойных замыканий на землю (ДЗЗ) [1–3], которые являются, как правило, результатом развития однофазных замыканий (ОЗЗ), не относящихся к категории аварийных и не отключаемых релейной защитой. При появлении ОЗЗ напряжения неповрежденных фаз относительно земли возрастают до линейных значений, что способствует возникновению замыканий в других точках сети, часто удаленных от места первичного ОЗЗ на несколько десятков километров (рис. 1).

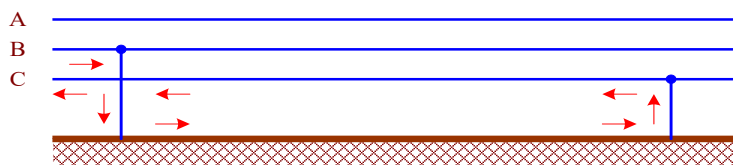


Рис. 1. Схема режима ДЗЗ

Вопросам изучения ДЗЗ посвящен целый ряд работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Значительное число публикаций по ДЗЗ посвящено решению сложной задачи [4] определения мест их возникновения. Так, например, в [5–7] для локализации ДЗЗ предлагается применять фиксирующий орган сопротивления линии электропередачи. В [8–10] для поиска мест ДЗЗ рекомендуется использовать подходы, основанные на применении алгоритмических моделей и энергетического критерия. В [11] описан метод определения мест двойных замыканий на землю. Эффективные итерационные процедуры для нахождения мест ДЗЗ предложены в [12–16]. Новый метод обнаружения ДЗЗ представлен в [17]. Подход к локализации мест ДЗЗ, основанный на использовании гибридного профиля тока, предложен в [18]. Опыт поиска ДЗЗ в компенсированных сетях с применением технологии бегущей волны описан в работе [19].

Отдельным, но важным аспектам режимов ДЗЗ, посвящены работы [20–23]. Результаты анализа двойных замыканий с исполь-

зованием данных осциллографии приведены в [20]. Вопросы защиты от замыканий на землю рассмотрены в [21]. Способ повышения эффективности функционирования сетей 6–10 кВ, основанный на автоматическом переводе двойных замыканий на землю в ОЗЗ, предложен в [22]. Задача определения термической стойкости металлических оболочек кабелей при ДЗЗ в сетях среднего напряжения решена в [23].

Несмотря на большое число публикаций, посвященных ДЗЗ, задача моделирования таких режимов в линиях 6–10 кВ, работающих в системах электроснабжения железных дорог и расположенных в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей, остается не решенной. В представленных выше работах используется метод симметричных составляющих, применение которого для моделирования сложных трехфазно-однофазных сетей с многократными продольно-поперечными несимметриями приводит к значительным методическим и алгоритмическим затруднениям. Наиболее эффективно решить эти проблемы можно на основе использования фазных координат [24]. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку цифровых моделей для определения режимов ДЗЗ в системах электроснабжения железных дорог.

Методика и результаты моделирования

Для моделирования режимов ДЗЗ использовались методы мультифазного представления электроэнергетических систем (ЭЭС), предложенные в работе [24] и реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord. На базе этих методов возможно определение режимов ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) на основной частоте и частотах высших гармоник. При расчетах СЭЖД тяговые нагрузки формируются путем моделирования движения поездов по магистрали с реальным профилем пути. Кроме расчета уровней напряжения в узловых точках сети и потоков мощности по ее ветвям возможно определение показателей качества электроэнергии по несимметрии и гармоническим искажениям.

Расчеты режимов двойных замыканий на землю в ВЛ СЦБ и ВЛ ПЭ осуществлялись для схемы СЭЖД, показанной на рис. 2.

В модели, реализованной в ПК Fazonord, были учтены следующие элементы: питающие ЛЭП 110 кВ; силовые трансформаторы; участок тяговой сети (ТС) протяженностью 50 км, включающий контактные подвески, рельсовые нити, ВЛ ПЭ 10 кВ, смонтированную на опорах контактной сети с полевой стороны, и ВЛ СЦБ 6 кВ, которая была расположена параллельно трассе железной дороги. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3 192 т в нечетном направлении и такого же числа составов 4 192 т — в четном. При моделировании ДЗЗ учитывалось сопротивление самозаземления опор ВЛ СЦБ, принятое равным 15 Ом [25].

жения графика тока значительно меньше, что объясняется относительно небольшими величинами коэффициентов гармоник k_I ; для фазы В его максимальное значение равно 8,5 %, а для фазы С — 8,4 %.

На рис. 5, 6 представлены зависимости тока замыкания фазы С от координаты x при фиксированном соединении с землей фазы В в точках, отвечающих $x = 0$ км (рис. 5) и $x = 50$ км (рис. 6). Из этих рисунков видно, что с увеличением расстояния между точками ОЗЗ токи уменьшаются. Зависимость максимальных значений тока от координаты x для первого варианта расчетов близка к линейной. Аналогичным свойством обладает график средних значений для второго варианта.

На рис. 8 показана динамика изменений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Кривые соответствуют замыканию фазы В при $x = 10$ км и фазы С в точке $x = 20$ км. На рис. 9 приведены зависимости коэффициентов несимметрии от координаты x . Представленные графики показывают, что в режимах ДЗЗ возникают существенные уровни несимметрии.

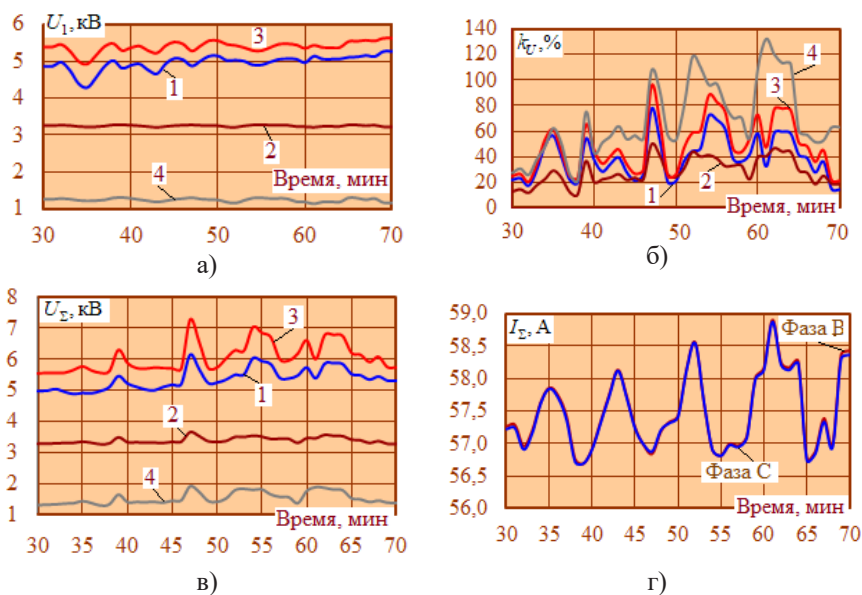


Рис. 3. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение эффективных токов ДЗЗ (г): 1 — фаза А при $x = 0$, 2 — фаза С при $x = 0$, 3 — фаза А при $x = 50$ км, 4 — фаза В при $x = 50$ км; $U_{\Sigma} = U_I \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$; k_U, k_I — суммарные коэффициенты гармоник напряжения и тока:

$$I_{\Sigma} = I_I \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}$$

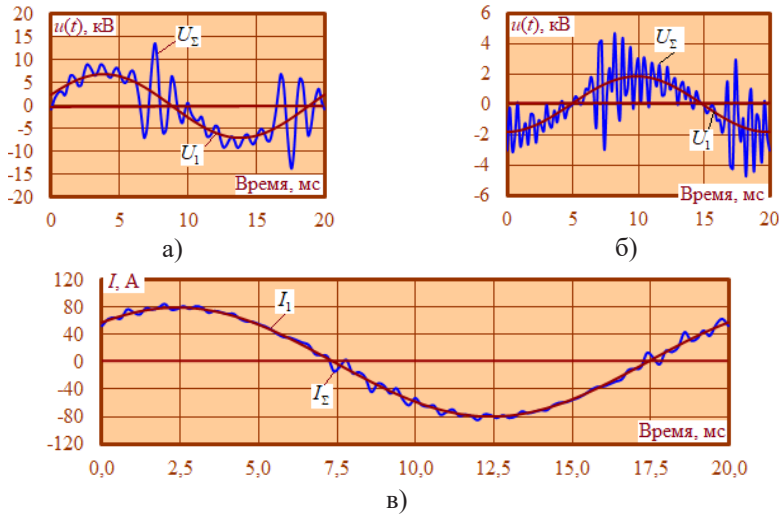


Рис. 4. Формы кривых напряжений фаз А (а) и С (б), а также токов замыкания фазы В (в) в узлах, отвечающих координате $x = 50$ км, на 47-й минуте моделирования

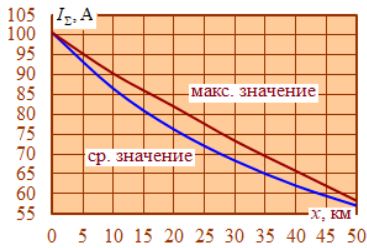


Рис. 5. Зависимости тока замыкания фазы С от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 0$

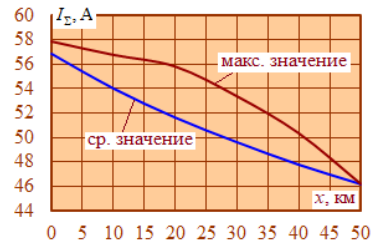


Рис. 6. Зависимости тока фазы С от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 50$ км

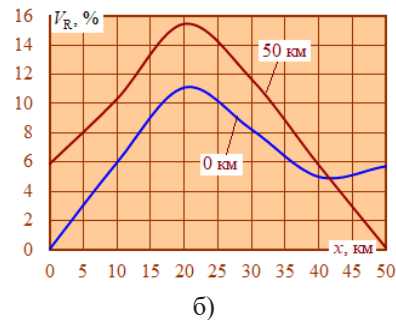
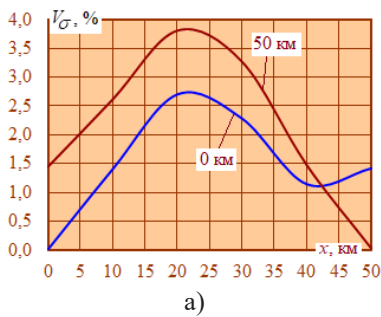


Рис. 7. Зависимости коэффициента вариации (а) и осцилляции (б) тока фазы С от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точках, отвечающих $x = 0$ км и $x = 50$ км

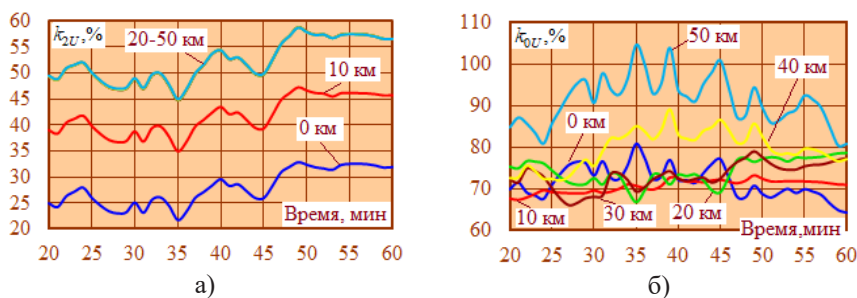


Рис. 8. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от времени

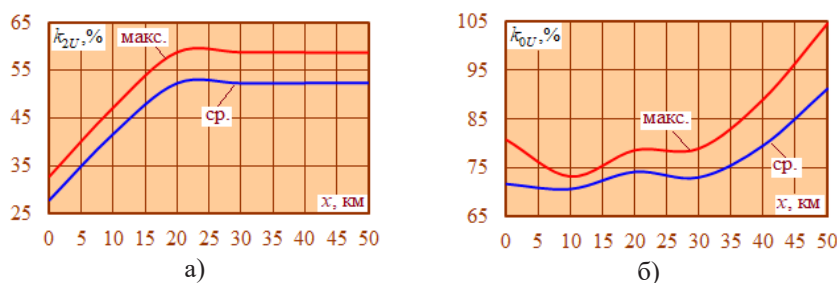


Рис. 9. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 10$ км, а фазы С — в точке $x = 20$ км

Результаты моделирования ДЗЗ для ВЛ ПЭ

На рис. 10–16 представлены результаты моделирования ДЗЗ для линии продольного электроснабжения ВЛ ПЭ, смонтированной на опорах контактной сети. Координаты x точек ДЗЗ задавались также как в предыдущем разделе. На рис. 10 проиллюстрирована динамика изменений параметров режима в узлах ВЛ ПЭ, отвечающих координатам x , равным нулю и пятидесяти километрам при замыкании фазы В при $x = 0$ и фазы С в точке $x = 50$ км. Из этого рисунка видно, что влияние резкопеременной и нелинейной тяговой нагрузки приводит к вариациям параметров, характеризующих режим ДЗЗ ВЛ ПЭ: напряжений основной частоты, коэффициентов гармоник и эффективных значений U_{Σ} .

На рис. 11 представлена динамика изменений токов ДЗЗ, стекающих в землю, при замыкании фазы В при $x = 0$ и С в точке $x = 50$ км. Из него видно, что токи по фазам В и С практически не различаются. Максимальное отклонение равно 1,7 А.

Формы кривых напряжений и тока замыкания фазы В для первого варианта моделирования приведены на рис. 12. Кривые

соответствуют соединению с землей фазы В при $x=0$ и фазы С в точке $x=50$ км. Из этого рисунка видно, что графики напряжений заметно отличаются от синусоиды. Степень искажения кривой тока значительно меньше, что объясняется относительно небольшими величинами коэффициентов гармоник k_I : для фазы В его максимальный уровень равен 8,19 %, а для С — 10,95 %.

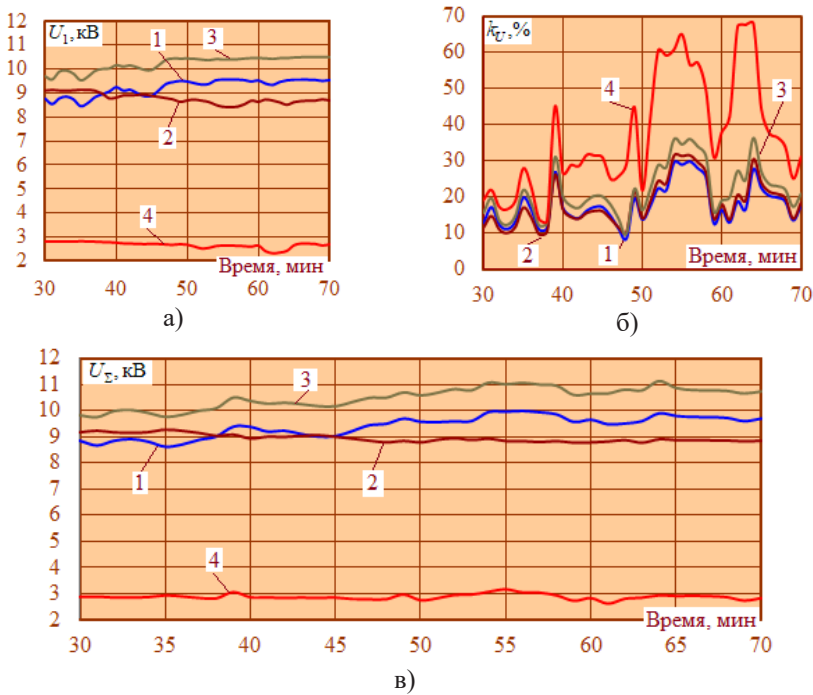


Рис. 10. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б) и эффективные напряжения с учетом ВГ (в): 1 — фаза А при $x=0$, 2 — фаза С при $x=0$, 3 — фаза А при $x=50$ км, 4 — фаза В при $x=50$ км

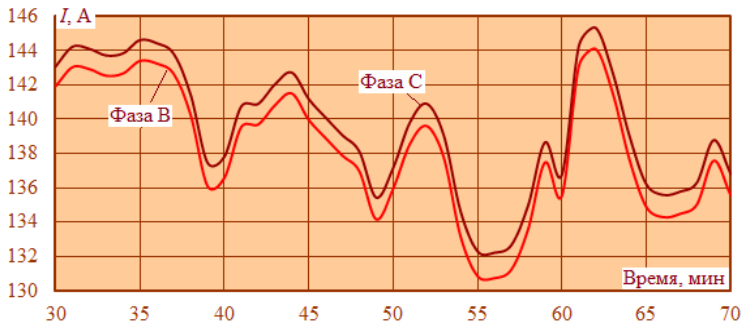


Рис. 11. Сравнение эффективных токов ДЗЗ

На рис. 13, 14 представлены зависимости тока замыкания фазы С от координаты x при фиксированном соединении с землей

фазы В при $x = 0$ км (рис. 13) и $x = 50$ км (рис. 14). Из этих рисунков видно, что с увеличением расстояния между точками замыканий тока уменьшаются. Зависимость средних значений тока от x для второго варианта расчетов близка к линейной.

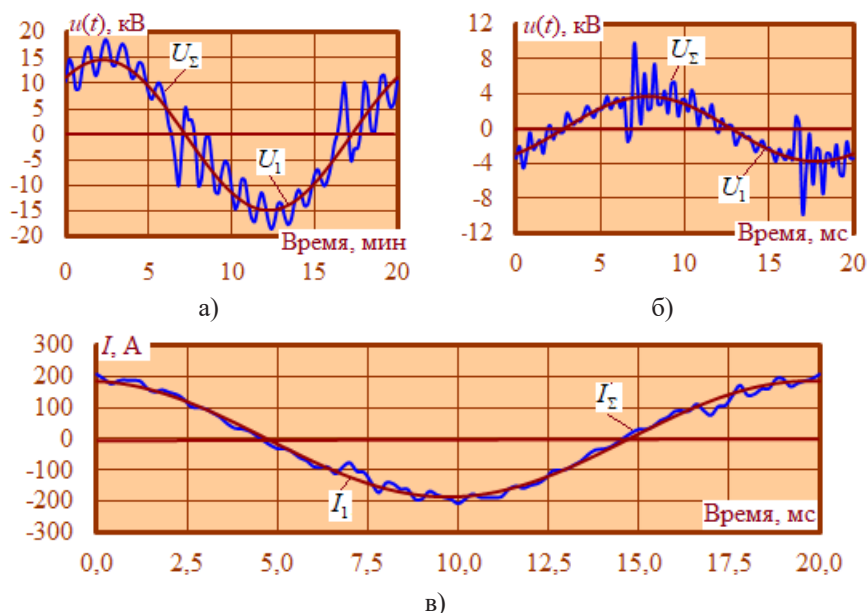


Рис. 12. Формы кривых напряжений фаз А (а) и С (б), а также токов замыкания фазы В (в) в узлах, отвечающих координате $x = 50$ км, на 47-й минуте моделирования

На рис. 15 показана динамика изменений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Кривые соответствуют замыканию фазы В при $x = 10$ км и фазы С в точке $x = 20$ км.

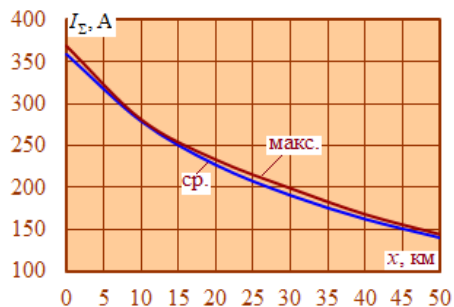


Рис. 13. Зависимости тока замыкания фазы С от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 0$

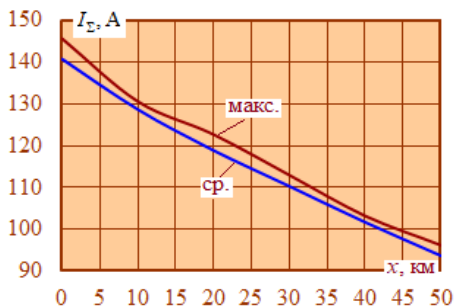


Рис. 14. Зависимости тока фазы С от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 50$ км

На рис. 16 представлены зависимости коэффициентов k_{2U} , k_{0U} от координаты x . Из рис. 15, 16 следует, что в режимах ДЗЗ возникают существенные уровни несимметрии, особенно это заметно для k_{0U} .

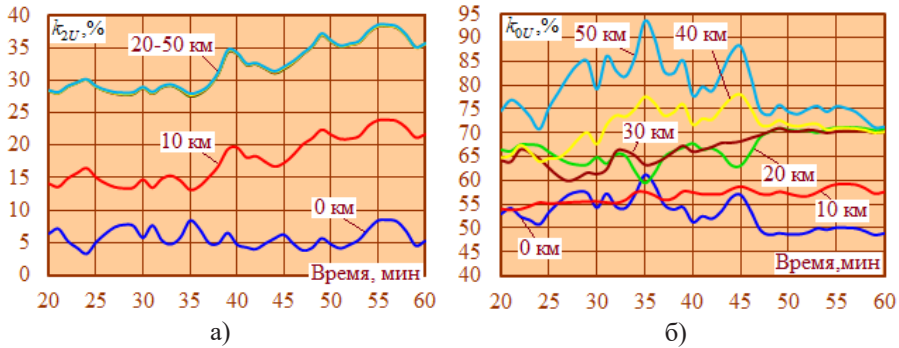


Рис. 15. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от времени

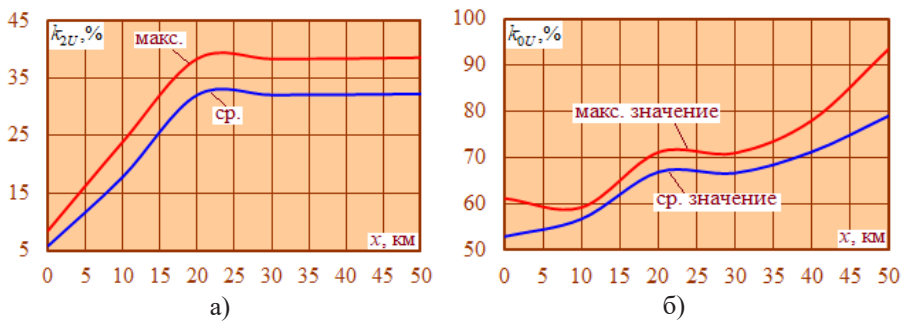


Рис. 16. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от координаты x при фиксированном замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 10$ км, а фазы С — в точке $x = 20$ км

Заключение

Разработаны цифровые модели для определения режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения железных дорог. Они учитывают все основные факторы, влияющие на ДЗЗ, включая трехфазно-однофазную структуру СЭЖД и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. В отличие от существующих подходов, разработанные модели учитывают изменения параметров режима системы, вызванные вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. Разработанные методика и цифровые модели могут использоваться на практике при разработке средств идентификации ДЗЗ и локализации мест их возникновения.

Исследования выполнены по программе государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Список использованной литературы

1. Спиричев М.А. О необходимости отключать двойные замыкания на землю без выдержки времени / М.А. Спиричев, Н.М. Попов, Д.М. Олин. — EDN XWDTGX // Вестник КрасГАУ. — 2018. — № 4 (139). — С. 133–137.
2. Олин Д.М. Устройства для защиты воздушных линий 6–35 кВ от двойных замыканий на землю / Д.М. Олин, М.А. Спиричев. — EDN YNTBLB // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе : материалы 68-й междунар. науч.-практ. конф. — Караваево, 2017. — Т. 2. — С. 233–238.
3. Koepl G.S. Double Earth Faults in Power Stations / G.S. Koepl, D. Braun, M. Lakner. — DOI 10.1109/TPWRD.2014.2350033 // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2015. — Vol. 30, iss. 3. — P.1338–1343.
4. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system / Yao Zhang, Qingchao Zhang, Wennan Song, Yuxin Yu. — DOI 10.1109/61.852978 // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2000. — Vol. 15, iss. 2. — P. 520–524.
5. Хакимзянов Э.Ф. Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Мустафин, А.И. Федотов. — EDN RXQCGE // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2015. — № 3–4. — С. 132–137.
6. Определение поврежденного участка распределительной сети в режиме "двойное замыкание на землю" / Э.Ф. Хакимзянов, А.И. Федотов, Р.Г. Мустафин, Р.У. Галеева. — EDN XHXWKT // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2016. — № 7–8. — С. 3–8.
7. Хакимзянов Э.Ф. Определение мест повреждений в распределительных сетях среднего напряжения при двойных замыканиях на землю / Э.Ф. Хакимзянов, С.В. Куксов. — EDN ZLIXJR // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : материалы докладов X науч.-практ. конф., Казань, 28–30 окт. 2015 г. / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. — Казань, 2017. — С. 21–26.
8. Определение мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов. — EDN QOQREX // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 05 июня 2020 г. — Чебоксары, 2020. — С. 407–413.
9. Определение мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью / М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов [и др.]. — EDN TEOEEQ // Релейная защита и автоматизация. — 2021. — № 4 (45). — С. 40–46.
10. Ubaseva M. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutral / M. Ubaseva, V. Petrov, V. Antonov. — DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216306. — EDN YRUUVD // International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Chelyabinsk, September 22–24, 2020. — Chelyabinsk, 2020. — P. 394–399.
11. Белянин А.А. Определение мест двойных замыканий на землю методом локализации / А.А. Белянин. — EDN YMXEPS // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2017. — № 7. — С. 52–56.

12. Способы определения расстояний до мест двойных замыканий на землю / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, М.Д. Обалин, Т.Р. Шарафеев. — EDN UUKЕВО // Актуальные проблемы электроэнергетики : IV Всерос. (XXXVII регион.) науч.-техн. конф., Нижний Новгород, 21 дек. 2018 г. — Нижний Новгород, 2018. — С. 196–201.
13. Применение имитационного моделирования ЛЭП 6-35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.Ю. Осокин, Т.Р. Шарафеев. — DOI 10.17588/2072-2672.2018.1.040-049. — EDN YPMNNC // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2018. — № 1. — С. 40–49.
14. Куликов А.Л. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения ЛЭП 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с помощью введения итерационных процедур / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, М.Д. Обалин. — EDN ZBXMPZ // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2019. — № 1 (52). — С. 78–83.
15. Куликов А.Л. Сокращение времени восстановления поврежденной линии электропередачи 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с применением итерационных процедур определения места повреждения / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.Ю. Осокин. — EDN YDLMVM // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. — Иркутск, 2018. — Вып. 69, кн. 1. — С. 106–115.
16. Kulikov A.L. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault / A.L. Kulikov, V.Ju. Osokin, M.D. Obalin. — DOI 10.1109/ICIEAM.2018.8728607. — EDN PGYMCG // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, May 15–18, 2018. — Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2018. — P. 8728607.
17. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults / Rong-jin Zheng, Xiangning Lin, Feng Zhao, Zhiqian Bo. — DOI 10.1109/PES.2011.6039005 // IEEE Power and Energy Society General Meeting. — Detroit, 2011.
18. Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach / A. Dubey, H. Sun, D. Nikovski [et al.]. — DOI 10.1109/ISGT.2015.7131882 // IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). — Washington, 2015.
19. Dzienis C. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology / C. Dzienis, W. Leitner, H. Eberhardt. — DOI 10.1109/MEPS46793.2019.9395048 // Modern Electric Power Systems (MEPS). — Wroclaw, 2019. — P. 1–6.
20. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data / W.R. Heringer, M.A.M. Cordeiro, J.C.H. Paye [et al.]. — DOI 10.1109/TDLA47668.2020.9326209 // IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition. — Montevideo, 2020.
21. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System / Qi Jia, Xinzhou Dong, Shenxing Shi, Xin He. — DOI 10.1109/PESGM.2018.8586136 // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). — Portland, 2018.
22. Качанов А.Н. Автоматический перевод двойных замыканий на землю в однофазные как способ повышения эффективности функционирования сетей 6–10 кВ / А.Н. Качанов, В.А. Чернышов, Т.Г. Королева. — EDN KMUKVZ // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Казань, 19 апр. 2023 г. / отв. ред. В.В. Максимов. — Казань, 2023. — С. 23–30.
23. Budahs M. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks / M. Budahs, J. Rozenkrons, A. Staltmanis. — DOI 10.1109/PTC.2005.4524581 // IEEE Russia Power Tech. — Saint Petersburg, 2005.

24. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — EDN PTVITA. — Иркутск : Изд-во ИРГУПС, 2005. — 273 с.

25. Обеспечение чувствительности дистанционных защит фидеров контактной сети переменного тока на участках с разземленными опорами / И.А. Кремлев, Ю.В. Кондратьев, В.А. Кващук [и др.]. — EDN SWOCUX // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 6–3. — С. 472–475.

References

1. Spirichev M.A., Popov D.M., Olin D.M. About the Need to Disconnect Double Earth Faults without Time Delay. *Vestnik KRASGAU = The Bulletin of KrasGAU*, 2018, no. 4, pp. 133–137. (In Russian). EDN: XWDTGX.

2. Olin D.M., Spirichev M.A. The Devices for the Protecting of Overhead 6–35 kV Power Lines from Double Phase Earth Faults. *Current Problems of Science in the Agro-Industrial Complex. Materials of the 68th International Scientific and Practical Conference*. Karavaevo, 2017. Vol. 2, pp. 233–238. (In Russian). EDN: YNTBLB.

3. Koeppel G.S., Braun D., Lakner M. Double Earth Faults in Power Stations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, iss. 3, pp. 1338–1343. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2350033.

4. Yao Zhang, Qingchao Zhang, Wennan Song, Yixin Yu. Transmission Line Fault Location for Double Phase-to-earth Fault on Non-direct-Ground Neutral System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, iss. 2, pp. 520–524. DOI: 10.1109/61.852978.

5. Khakimzyanov E.H., Mustafin R.G., Fedotov A.I. Determination of the Distances to the Double Earth Faults on the Power Line of Medium Voltage Distribution Network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2015, no. 3–4, pp. 132–137. (In Russian). EDN: RXQCGE.

6. Khakimzyanov E.H., Fedotov A.I., Mustafin R.G., Galeeva R.U. Determination of the damaged section of the distribution network in the “double ground fault” mode.

7. Determination of the damaged section of the distribution network in the “double ground fault” mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2016, no. 7–8, pp. 3–8. (In Russian). EDN: XHXWKT.

8. Khakimzyanov E.H., Kuksov S.V. Determination of fault locations in medium voltage distribution networks during double earth faults. In Abdullazyanov E.H. Yu. (ed.). Dispatch and management in the electric power industry. *Materials of the Reports of the X Scientific and Practical Conference, Kazan, October 28–30, 2015*. Kazan, 2017, pp. 21–26. (In Russian). EDN: ZLIXJR.

9. Ubaseva M.V., Petrov V.S., Naumov V.A., Antonov V.I. Determination of double ground fault locations in a network with an isolated neutral. Information technologies in electrical engineering and electrical power engineering. *Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference, Cheboksary, June 05, 2020*. Cheboksary, 2020, pp. 407–413. (In Russian). EDN: QOQREX.

10. Ubaseva M.V., Petrov V.S., Naumov V.A., Antonov V.I., Fedorov A.O. Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated neutral. *releynaya zashchita i avtomatizatsiya = Relay Protection and Automation*, 2021, no. 4, pp. 40–46. (In Russian). EDN: TEOEEQ.

11. Ubaseva M., Petrov V., Antonov V. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutral. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Chelyabinsk, September 22–24, 2020*. Chelyabinsk, 2020, pp. 394–399. EDN: YRUUVD. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216306.

12. Belyanin A.A. Determination of Double Ground Fault Points by Method of Localization. *Ehlektooborudovanie: ehkspluatatsiya i remont = Electrical Equipment: Operation and Repair*, 2017, no. 7, p. 52–56. (In Russian). EDN: YMXEPS.

13. Kulikov A.L., Osokin V.Yu., Obalin M.D., Sharafiev T.R. Methods for determining distances to double ground faults. Current problems of the electric power industry. *IV All-Russian (XXXVII Regional) Scientific and Technical Conference, Nizhny Novgorod, December 21, 2018*. Nizhny Novgorod, 2018, pp. 196–201. (In Russian). EDN: UUKBO.

14. Kulikov A.L., Osokin V.YU., Obalin M.D., Sharafiev T.R. Application of simulation modeling of 6–35 kV power lines to improve the accuracy of determining the distance to double ground faults. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State University of Energetics*, 2018, no. 1, pp. 40–49. (In Russian). EDN: YPMNC. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.040-049.

15. Kulikov A.L., Osokin V.Yu., Obalin M.D. Accuracy Improving the Fault Location Algorithms of 6–35 kV Transmission Lines for Double Earth Faults with Applying the Iteration Methods. *Ehlektoehnergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and Distribution*, 2019, no. 1, pp. 78–83. (In Russian). EDN: ZBXPZ.

16. Kulikov A.L., Obalin M.D., Osokin V.Yu. Reducing the recovery time of a damaged 6–35 kV power transmission line with double ground faults using iterative procedures for determining the location of the fault. In Voropai N.I. (ed.). *Methodological issues in studying the reliability of large energy systems*. Irkutsk, 2018. Iss. 69, bk. 1, pp. 106–115. (In Russian). EDN: YDLMVM.

17. Kulikov A.L., Osokin V.Ju., Obalin M.D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, May 15–18, 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 8728607. EDN: PGYMCG. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728607.

18. Rong-jin Zheng, Xiangning Lin, Feng Zhao, Zhiqian Bo. A Novel Single-ended Fault Location Method for Locating Double-phase to Earth Faults. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit, 2011. DOI: 10.1109/PES.2011.6039005.

19. Dubey A., Sun H., Nikovski D., Takano T., Kojima Ya., Ohno T. Locating Double-line-to-ground Faults Using Hybrid Current Profile Approach. *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Washington, 2015. DOI: 10.1109/ISGT.2015.7131882.

20. Dzienis C., Leitner W., Eberhardt H. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology. *Modern Electric Power Systems (MEPS)*. Wroclaw, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEPS46793.2019.9395048.

21. Heringer W.R., Cordeiro M.A.M., Paye J.C.H., Sousa A.L. [et al.]. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data. *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition*. Montevideo, 2020. DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326209.

22. Qi Jia, Xinzhou Dong, Shenxing Shi, Xin He. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Portland, 2018. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586136.

23. Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Koroleva T.G. Automatic Conversion of Double Earth Fault into Single-phase Ones as a Way to Increase the Efficiency of the Functioning of 6–10 kV Networks. In Maksimov V.V. (ed.). *Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects. Materials of the III International Scientific and Practical Conference, Kazan, April 19, 2023*. Kazan, 2023, pp. 23–30. (In Russian). EDN: KMUKVZ.

24. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A. Thermal Stability of Cables Metallic Covers in the Case of Double Earth Faults in Middle Voltage Networks. *IEEE Russia Power Tech.* Saint Petersburg, 2005. DOI: 10.1109/PTC.2005.4524581.

25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi asymmetric Modes of Electrical Systems.* Irkutsk State Transport University Publ., 2005. 273 p. EDN: PTVITA.

26. Kremlev I.A., Kondratev Y.V., Kvaschuk V.A., Kuznetsov A.A., Terekhin I.A. Ensuring the Sensitivity of Remote Protection of Feeders of the Contact Alternating Current Main on the Plot with not Grounded Supports. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*, 2014, no. 6–3, pp. 472–475. (In Russian). EDN: SWOCUX.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич — доктор технических наук, профессор, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Овечкин Илья Сергеевич — аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

Information about the Authors

Andrey V. Kryukov — D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Irkutsk State Transport University; Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Ilya S. Ovechkin — PhD Student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Крюков А.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения железных дорог / А.В. Крюков, И.С. Овечкин. — DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(2).221-236. — EDN MCNUZV // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2024. — Т. 6, № 2. — С. 221–236.

For Citation

Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modeling of Double Ground Fault Modes in Railway Power Supply Systems. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 221–236. (In Russian). EDN: MCNUZV. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(2).221-236.