



МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Крюков^{1,2} А.В., Овечкин¹ И.С., Суслов^{2,3} К.В.

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, and_kryukov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, iliaov2015@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, dr.souslov@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка цифровых моделей для определения режимов двойных замыканий на землю (ДЗЗ) в воздушных линиях 6-10 кВ, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки (ВЛ СЦБ). *МЕТОДЫ.* Для создания моделей использовались методы мультифазного моделирования электроэнергетических систем. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработанные модели обеспечивают корректный учет факторов, влияющих на режимы ДЗЗ, включая трехфазно-однофазную структуру рассматриваемой системы электроснабжения и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. В отличие от известных подходов осуществляется моделирование динамики изменений этих влияний, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложенный подход к определению режимов ДЗЗ является универсальным и может применяться для типовых систем электроснабжения, а также перспективных тяговых сетей повышенного напряжения. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ с целью обнаружения ДЗЗ и принятия мер по их устранению. Кроме того, представленная в статье методика моделирования может быть полезной при выборе мероприятий по повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ, обеспечивающих безопасность движения поездов, а также для разработки методов и алгоритмов локализации двойных замыканий на землю в воздушных линиях электропередачи, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки.

Ключевые слова: двойные замыкания на землю; воздушные линии автоблокировки; электромагнитные влияния тяговых сетей; моделирование.

Благодарности: Работа, по результатам которой подготовлена статья, выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Для цитирования: Крюков А.В., Овечкин И.С., Суслов К.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 138-148. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.

MODELING OF DOUBLE GROUND FAULT MODES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF NON-TRACTION CONSUMERS OF RAILWAY TRANSPORT

Kryukov^{1,2} A.V., Ovechkin¹ I.S., Suslov^{2,3} K.V.

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³ National Research University "MEI", Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, and kryukov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, iliaov2015@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, dr.souslov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of digital models to determine the modes of double ground faults in 6-10 kV overhead signaling lines supplying signaling, centralization and automatic blocking facilities. *METHODS.* To create the models, methods of multiphase modeling of electric power systems were used, based on the use of lattice equivalent circuits from RLC-elements connected according to complete graph circuits. For modeling, the industrial software package Fazonord, developed at the Irkutsk State Transport University, was used. *RESULTS.* The developed models provide correct accounting of all factors influencing the modes of double ground faults, including increased electromagnetic influences of the traction network. In contrast to known approaches, the dynamics of changes in these influences caused by variations in traction loads during train movement are modeled. *CONCLUSION.* The proposed approach to modeling double ground fault modes is universal and can be used for standard traction power supply systems, as well as promising high-voltage traction networks. The results obtained can be used in practice to configure relay protection devices for overhead signaling lines in order to reliably detect double ground fault modes and take measures to eliminate them. In addition, the modeling methodology presented in the article can be used when selecting measures to improve the reliability of power supply to signaling and automatic blocking facilities that ensure the safety of train traffic, as well as to develop methods and algorithms for determining distances to places of double ground faults in overhead power lines feeding signaling facilities, centralization and auto-blocking. The presented results confirmed the effectiveness of the proposed approach for modeling double ground fault modes.

Keywords: double ground faults; overhead signaling lines; electromagnetic influences of traction networks; modeling.

For citation: Kryukov A.V., Ovechkin I.S., Suslov K.V. Modeling of double ground fault modes in power supply systems of non-traction consumers of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 138-148. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.

Введение (Introduction)

Вдоль трасс магистральных железных дорог (ЖД) расположены объекты сигнализации, централизации и автоблокировки, обеспечивающие безопасность движения поездов. По степени надежности электроснабжения большая часть из них относится к потребителям первой категории, а также ее особой группы. Для их подключения сооружаются специальные линии электропередачи напряжением 6-10 кВ. Основное питание осуществляется от воздушных линий (ВЛ СЦБ), проложенных параллельно трассе дороги. Для резервирования используются ЛЭП продольного электроснабжения, расположенные на опорах контактной сети. В целях снижения влияний на рельсовые цепи железнодорожной автоматики ВЛ СЦБ подключается к шинам собственных нужд через повышающие трансформаторы 6-10/0,4 кВ с соединением обмоток звезда с нулевым выводом – треугольник. Для корректного моделирования режимов таких ЛЭП требуется учитывать целый ряд факторов, существенно усложняющих решение этой 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 двойные замыкания на землю (ДЗЗ) [1–3], которые являются, как правило, результатом развития однофазных замыканий (ОЗЗ). Эти повреждения не относятся к категории аварийных и не отключаются 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).

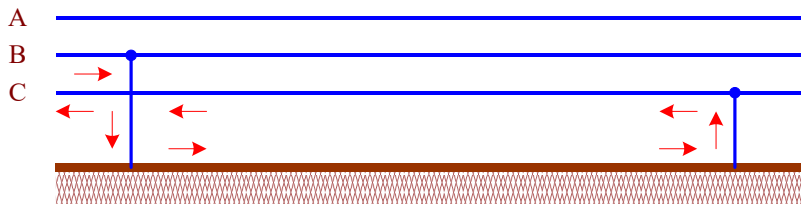


Рис. 1. Схема режима ДЗЗ

Fig. 1. Diagram of double earth faults

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

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 работах [5–7] для ее решения применяется фиксирующий орган сопротивления ЛЭП. В статьях [8–10] для определения мест ДЗЗ используются методы, основанные на алгоритмических моделях и энергетическом критерии. В [11] описан способ локализации двойных замыканий на землю. Эффективные алгоритмы и итерационные процедуры для нахождения мест ДЗЗ предложены в [12–16]. Вопросы моделирования работоспособности электрооборудования электрических сетей рассмотрены в [17, 18]. Новый метод обнаружения ДЗЗ представлен в [19]. Подход к фиксации ДЗЗ, основанный на применении гибридного профиля тока, предложен в [20]. Опыт поиска ДЗЗ в компенсированных сетях с использованием технологии бегущей волны описан в [21].

Отдельным, но важным аспектам режимов ДЗЗ, посвящены работы [22–25]. Результаты анализа режимов ДЗЗ с использованием реальных данных осциллографии приведены в [22]. Вопросы защиты от замыканий на землю рассмотрены в [23]. Способ повышения эффективности функционирования сетей 6–10 кВ, основанный на автоматическом переводе двойных замыканий на землю в ОЗЗ, предложен в [24]. Задача определения термической стойкости металлических оболочек кабелей при ДЗЗ в сетях среднего напряжения решена в [25].

Анализ представленных выше публикаций показывает, что несмотря на большое число работ, посвященных ДЗЗ, задачи моделирования таких режимов в линиях 6–10 кВ, работающих в составе систем электроснабжения железных дорог и расположенных в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей, остаются не решёнными. По мнению авторов, это связано с тем, что для определения режимов ДЗЗ в большинстве из проанализированных выше источников 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 эффективный путь их преодоления состоит в применении фазных координат [26].

Ниже представлены результаты моделирования и анализа режимов ДЗЗ в системах электроснабжения железных дорог. Цель исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения ДЗЗ в воздушных линиях 6–10 кВ, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки. Научная новизна полученных результатов определяется тем, что предложенные модели позволяют корректно учитывать трехфазно-однофазную структуру систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ, разработки методов и алгоритмов определения расстояний до мест ДЗЗ, а также при выборе мероприятий по повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ.

Материалы и результаты (Materials and results)

Для моделирования режимов ДЗЗ использовались методы мультифазного представления электроэнергетических систем (ЭЭС), предложенные в работе [26] и реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord. На их основе возможно определение режимов ЭЭС и СЭЖД на основной частоте и частотах высших гармоник. При расчетах СЭЖД тяговые нагрузки формируются на основе имитационного моделирования движения поездов по магистрали с реальным профилем пути. Кроме вычисления 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 осуществлялись для схемы СЭЖД, показанной на рисунке 2. В модели, реализованной в ПК Fazonord, были учтены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; силовые трансформаторы; участок тяговой сети (ТС) протяженностью 50 км, включающий контактные подвески, рельсовые нити и линию ВЛ СЦБ напряжением 6 кВ, которая была расположена параллельно трассе ЖД и смонтирована на железобетонных опорах. Тяговые нагрузки создавались движением поездов массой 3192 и 4192 т. При моделировании ДЗЗ учитывалось сопротивление самозаземления опор ВЛ СЦБ, принятое равным 15 Ом [27].

Рассматривалось замыкание на землю фаз В и С. Для возможности варьирования мест ДЗЗ модель ТС, включающая линию ВЛ СЦБ, была разбита на участки протяженностью в десять километров. Координаты x точек замыкания на землю задавались в двух вариантах: в первом – величина x для фазы В принималась фиксированной и равной нулю, а для фазы С варьировалась в диапазоне 0...50 км с шагом в десять километров; во втором – значение x для фазы В задавалось равным 50 км, а координата x для фазы С изменялась в таком же диапазоне. Результаты моделирования представлены на рис. 3–6. В качестве примера на рисунке 3 проиллюстрирована динамика изменений параметров режима в узлах ВЛ СЦБ, при следующих местах ДЗЗ: фаз В при $x=0$ км и фаз С в точке $x=50$ км.

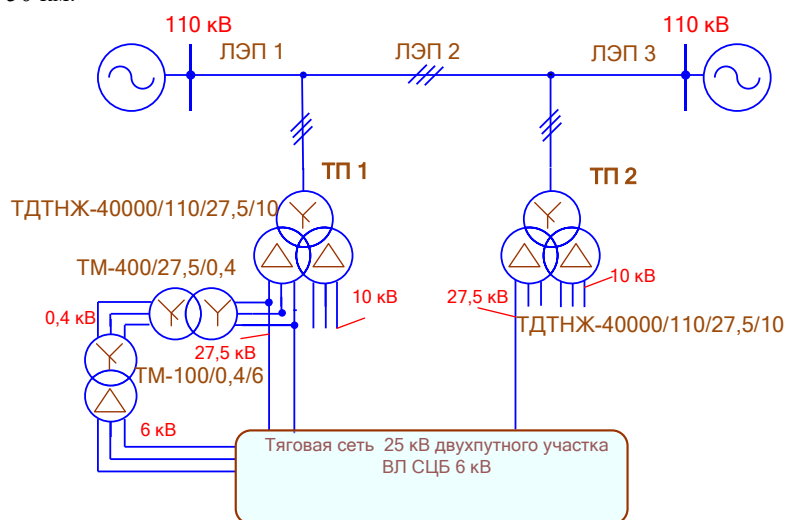


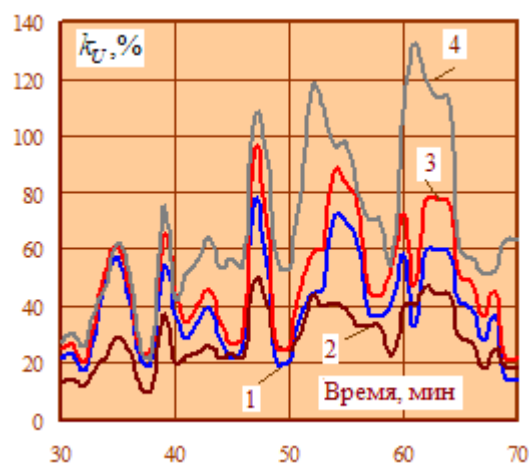
Рис. 2. Схема системы электроснабжения

Fig. 2. Schematic diagram of the power supply system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



а)



б)

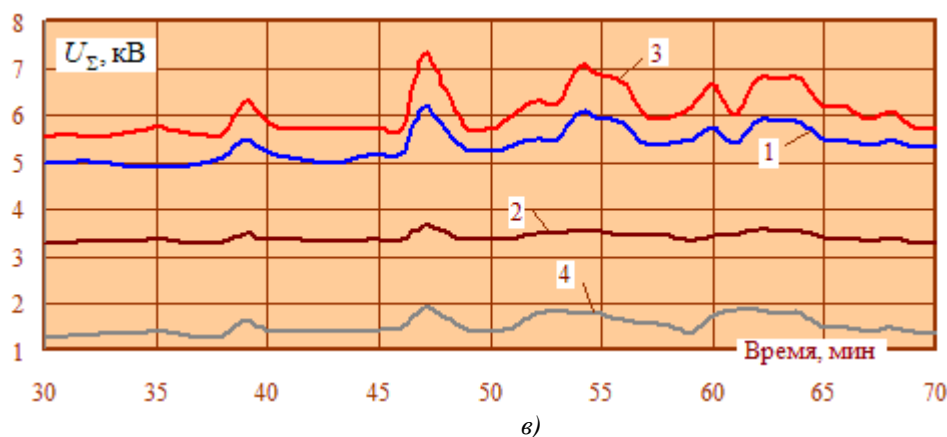


Рис. 3. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б) и эффективные напряжения с учетом ВГ (в): 1, 3 – неповрежденной фазы А при $x = 0$ и 50 км, 2 – фазы С при $x = 0$ км, 4 – фазы В при $x = 50$ км; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$; k_U – суммарный коэффициент гармоник напряжения

Fig. 3. Main frequency voltages (a), harmonic coefficients (b) and effective voltages taking into account HV (c): 1, 3 - intact phase A at $x = 0$ and 50 km, 2 - phase C at $x = 0$ km, 4 - phase B at $x = 50$ km; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$ k_U - total voltage harmonic coefficient

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунке 3 видно, что влияние резкопеременной и нелинейной тяговой нагрузки приводит к вариациям параметров, характеризующих ДЗЗ ВЛ СЦБ: напряжений основной частоты, коэффициентов гармоник и эффективных напряжений U_{Σ} . По сравнению с исходным режимом напряжения U_1 и U_{Σ} здоровой фазы А увеличивается на 30...40 %, а поврежденных фаз В и С уменьшается на 60 и 5 % соответственно. Особенно заметно изменяются U_{Σ} , фазы А и коэффициенты гармоник. Этот фактор необходимо учитывать при проектировании устройств защиты от ДЗЗ и разработке алгоритмов определения мест их возникновения.

На рисунке 4 представлена динамика изменений токов ДЗЗ, стекающих в землю, при замыкании фазы В при $x = 0$ и фазы С при $x = 50$ км. Из него видно, что токи фаз В и С практически не различаются.

Формы кривых напряжений U_{Σ} и тока I_{Σ} фазы В для первого варианта моделирования приведены на рисунке 5. Он соответствует замыканию этой фазы в точке с координатой $x = 0$ и показывает, что графики $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ заметно отличаются от синусоиды. Степень искажения зависимости $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$ существенно меньше, что объясняется относительно небольшими значениями коэффициентов гармоник k_I : для фазы В его максимальное значение равно 8,5 %, а для фазы С – 8,4 %.

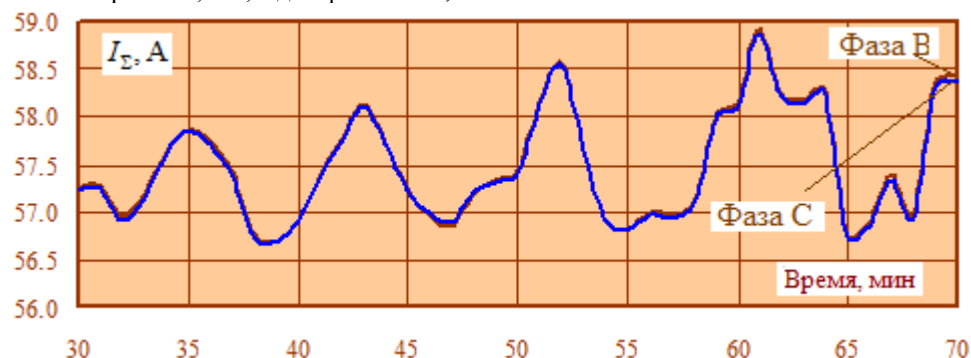


Рис. 4. Сравнение эффективных токов ДЗЗ:

Fig. 4. Comparison of effective double earth fault

currents : $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}$; k_I – суммарный коэффициент гармоник тока

$I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}$ k_I ; - total current harmonic coefficient

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

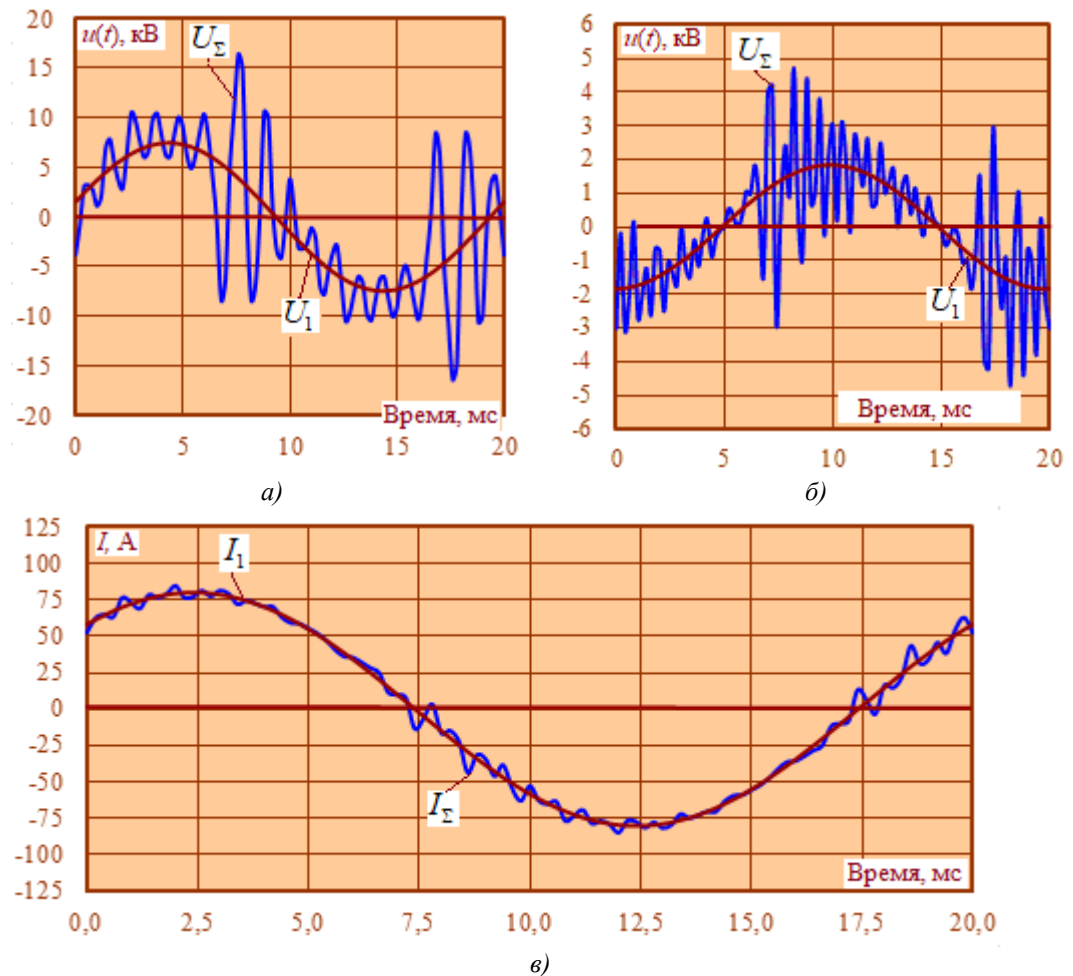


Рис. 5. Формы кривых напряжений фаз А (а) и С (б), а также токов замыкания фазы В (в) в узлах, отвечающих координате $x = 0$ км, на 47-й минуте моделирования

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлены зависимости тока фазы С от координаты x , при фиксированном замыкании фазы В при $x = 0$ км (рис. 6, а) и $x = 50$ км (рис. 6, б). Из этих рисунков видно, что с увеличением расстояния между точками замыканий токи уменьшаются.

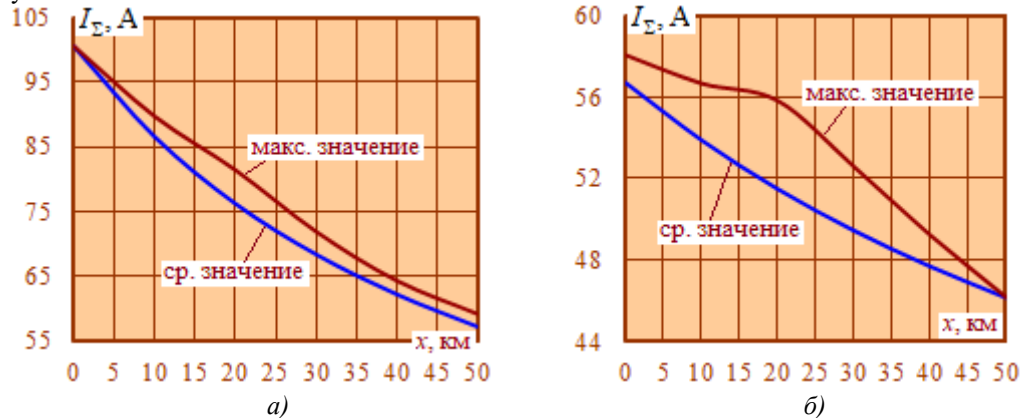


Рис. 6. Зависимости тока замыкания фазы С от координаты x : а – при фиксированном замыкании фазы В в точке отвечающей $x = 0$; б – при фиксированном замыкании фазы В в точке отвечающей $x = 50$ км

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Зависимость максимальных значений тока от координаты x для первого варианта расчетов близка к линейной. Аналогичным свойством обладает график средних значений от x для второго варианта. На рисунке 7 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.

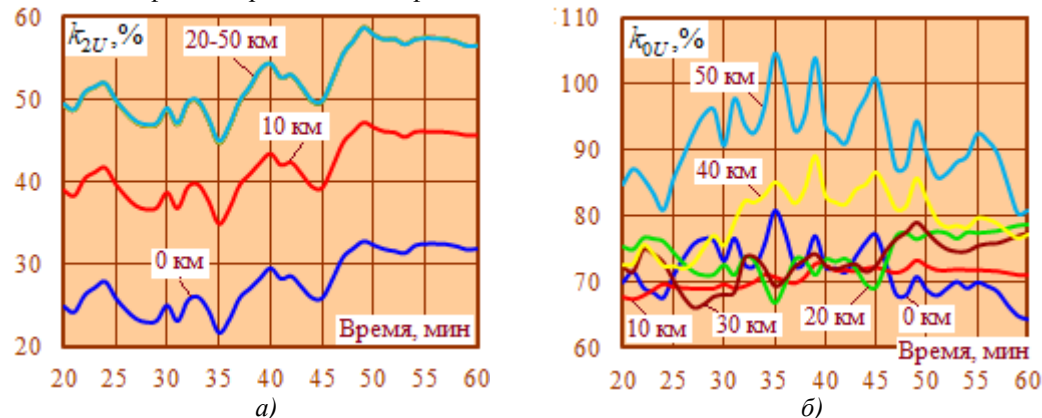


Рис. 7. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от времени

Fig. 7. Time dependences of voltage asymmetry coefficients in reverse (a) and zero (b) sequences

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 7 видно, что с увеличением расстояния от ТП1 коэффициент несимметрии по обратной последовательности возрастает до 58 % (47 минута), а начиная с 20 км и до конца линии (50 км), не изменяется. На рис. 8 представлены зависимости коэффициентов несимметрии от координаты x .

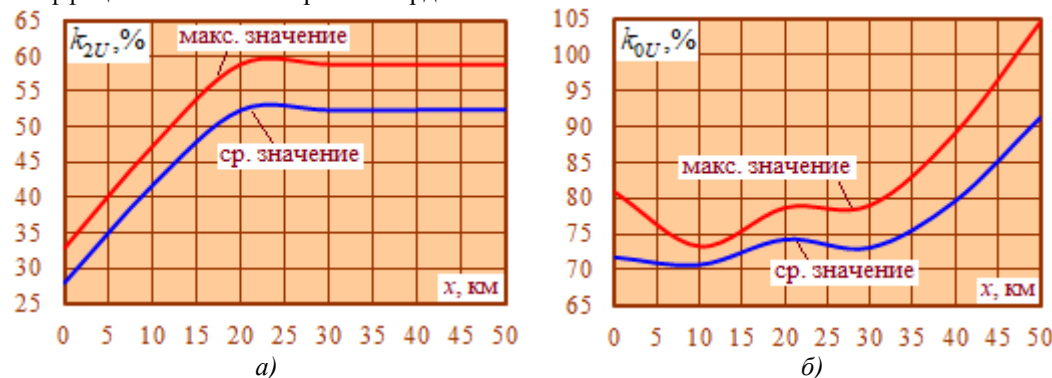


Рис. 8. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям от координаты x при замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 10$ км, а фазы С – в точке $x = 20$ км

Fig. 8. Dependences of the voltage asymmetry coefficients in reverse and zero sequences on the coordinate x when phase В is shorted at the point corresponding to $x = 10$ km, and phase С - at the point $x = 20$ km

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленные на рисунке 8 графики показывают, что при ДЗЗ возникают существенные уровни несимметрии, особенно по нулевой последовательности (105 % при $x = 50$ км). При этом k_{2U} имеет экстремум (60 %) при $x = 23$ км от ТП1.

Закключение (Conclusions)

Разработаны цифровые модели для определения токов и напряжений при двойных замыканиях на землю в системах электроснабжения железных дорог, обеспечивающие корректный учет всех основных факторов, влияющих на режимы ДЗЗ, включая трехфазно-однофазную структуру СЭЖД и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. В отличие от известных подходов осуществляется моделирование динамики изменений этих влияний, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. Предложенный подход является универсальным и может применяться как для типовых систем электроснабжения, так и для перспективных тяговых сетей повышенного напряжения. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ с целью обнаружения режимов ДЗЗ и принятия мер по их устранению. Представленная методика может применяться при выборе мероприятий по

повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ, обеспечивающих безопасность движения поездов, а также для разработки методов и алгоритмов определения расстояний до мест двойных замыканий на землю в воздушных линиях электропередачи.

Литература

1. Спиричев М. А., Попов Н. М., Олин Д. М. О необходимости отключать двойные замыкания на землю без выдержки времени // Вестник КрасГАУ. № 4 (139). 2018. С. 133-137.
2. Koepl G. S., Braun D., Lakner M. Double Earth Faults in Power Stations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol.30, Issue: 3.
3. Олин Д. М., Спиричев М. А. Устройства для защиты воздушных линий 6-35 кВ от двойных замыканий на землю // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Караваяев, 2017. С. 233-238.
4. Zhang Y., Zhang Q., Song W., Yu Y., Li X. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol.15, Issue: 2..
5. Хакимянов Э. Ф., Мустафин Р. Г., Федотов А. И. Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. № 3-4. 2015. С. 132-137.
6. Определение поврежденного участка распределительной сети в режиме "двойное замыкание на землю" / Э. Ф. Хакимянов, А. И. Федотов, Р. Г. Мустафин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. № 7-8. 2016. С. 3-8.
7. Хакимянов Э. Ф., Куксов С. В. Определение мест повреждений в распределительных сетях среднего напряжения при двойных замыканиях на землю // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. 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 [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. 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.] // Релейная защита и автоматизация. № 4 (45). 2021. С. 40-46.
10. Ubaseva M., Petrov V., Antonov V. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutra // Proc. of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020.
11. Белянин А. А. Определение мест двойных замыканий на землю методом локализации // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 7. 2017. С. 52-56.
12. Способы определения расстояний до мест двойных замыканий на землю // А.Л. Куликов, В. Ю. Осокин, М. Д. Обалин, [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. 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 [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. № 1. 2018. С. 40-49.
14. Куликов А. Л., Осокин В. Ю., Обалин М. Д. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения лэп 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с помощью введения итерационных процедур // Электроэнергия. Передача и распределение. № 1 (52). 2019. С. 78-83.
15. Куликов А. Л., Обалин М. Д., Осокин В. Ю. Сокращение времени восстановления поврежденной линии электропередачи 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с применением итерационных процедур определения места повреждения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Иркутск, 2018. С. 106-115.
16. Kulikov A. L., Osokin V. Ju., Obalin M. D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault // Proc. of 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018
17. Грачева Е.И., Тошходжаева М.И. Моделирование работоспособности электрооборудования систем электроснабжения и электрических сетей - Казань, 2021.
18. Юсупова А.А., Грачева Е.И. Повышение эффективности и надежности эксплуатации кабельных линий // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Сборник материалов III Поволжской научно-практической конференции, 2017. С. 180-181.
19. Zheng R., Lin X., Zhao F., Bo Z. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults // Proc. of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011.

20. Dubey A., Sun H., Nikovski D., Takano T., Kojima Y., Ohno T. Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach. Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2015 Publisher: IEEE.
21. Dzienis C., Leitner W., Eberhardt H.. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology // Proc. of 2019 Modern Electric Power Systems (MEPS). 2019. Publisher: IEEE.
22. Heringer W. R., Cordeiro M. A. M., Paye J. C. H., Sousa A. L., Leão A. P., Vieira J. P. A., Santos M. C., Cardoso G., de Moraes A. P., Wontroba A., Farias P. E. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data // Proc. of 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA). 2020.
23. Jia Q., Dong X., Shi S., He X. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System // Proc. of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018.
24. Качанов А. Н., Чернышов В. А., Королева Т. Г. Автоматический перевод двойных замыканий на землю в однофазные как способ повышения эффективности функционирования сетей 6-10 кВ // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты. Казань, 2023. С. 23-30.
25. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A.. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks // Proc. of 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005.
26. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
27. 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.] // Фундаментальные исследования. № 6-3. 2014. С. 472-475.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Овечкин Илья Сергеевич – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения.

Суслов Константин Витальевич – д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ).

References

1. Spirichev M. A., Popov N. M., Olin D. M. On the need to disconnect double ground faults without a time delay // Bulletin of KrasGAU. No. 4 (139). 2018. pp. 133-137.
2. Koepl G. S., Braun D., Lakner M. Double Earth Faults in Power Stations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol.30, Issue: 3.
3. Olin D. M., Spirichev M. A. Devices for protecting 6-35 kV overhead lines from double ground faults // Current problems of science in the agro-industrial complex. Karavaevo, 2017. pp. 233-238.
4. Zhang Y., Zhang Q., Song W., Yu Y., Li X. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol.15, Issue: 2.
5. Khakimzyanov E.F., Mustafin R.G., Fedotov A.I. Determination of distances to places of double ground faults on the power line of a medium voltage distribution network // News of higher educational institutions. Energy problems. No. 3-4. 2015. pp. 132-137.
6. Determination of the damaged section of the distribution network in the “double ground fault” mode / E. F. Khakimzyanov, A. I. Fedotov, R. G. Mustafin [et al.] // News of higher educational institutions. Energy problems. No. 7-8. 2016. pp. 3-8.
7. Khakimzyanov E. F., Kuksov S. V. Determination of fault locations in medium voltage distribution networks during double ground faults // Dispatch and management in the electric power industry. Kazan, 2017. pp. 21-26.
8. Determination of double ground fault locations in a network with an isolated neutral / M.V.

Ubaseva, V.S. Petrov, V. A. Naumov [etc.] // Information technologies in electrical engineering and power engineering. Cheboksary, 2020. pp. 407-413.

9. Determination of double ground fault locations in networks with an isolated neutral // M. V. Ubaseva, V. S. Petrov, V. A. Naumov [etc.] // Relay protection and automation. No. 4 (45). 2021. pp. 40-46.

10. Ubaseva M., Petrov V., Antonov V. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutra // Proc. of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020.

11. Belyanin A. A. Determination of locations of double ground faults using the localization method // Electrical equipment: operation and repair. No. 7. 2017. pp. 52-56.

12. Methods for determining distances to places of double ground faults // A.L. Kulikov, V. Yu. Osokin, M. D. Obalin, [etc.] // Current problems of electric power industry. Nizhny Novgorod, 2018. pp. 196-201.

13. Application of simulation modeling of 6-35 kV power lines to improve the accuracy of determining the distance to double ground faults / A. L. Kulikov, M. D. Obalin, V. Yu. Osokin [etc.] // Bulletin of Ivanovo State Energy University . No. 1. 2018. pp. 40-49.

14. Kulikov A. L., Osokin V. Yu., Obalin M. D. Increasing the accuracy of algorithms for determining the location of damage to 6-35 kV power lines during double ground faults by introducing iterative procedures // Electricity. Transmission and distribution. No. 1 (52). 2019. pp. 78-83.

15. Kulikov A. L., Obalin M. D., Osokin V. Yu. Reducing the restoration time of a damaged 6-35 kV power line with double ground faults using iterative procedures for determining the location of the damage // Methodological issues in studying the reliability of large energy systems . Irkutsk, 2018. pp. 106-115.

16. Kulikov A. L., Osokin V. Ju., Obalin M. D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018

17. Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I. Modeling the performance of electrical equipment of power supply systems and electrical networks - Kazan, 2021.

18. Yusupova A.A., Gracheva E.I. Increasing the efficiency and reliability of operation of cable lines. Instrument making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services. Collection of materials of the III Volga Scientific and Practical Conference, 2017. pp. 180-181.

19. Zheng R., Lin X., Zhao F., Bo Z. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults // Proc. of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011.

20. Dubey A., Sun H., Nikovski D., Takano T., Kojima Y., Ohno T. Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach. Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2015 Publisher: IEEE.

21. Dzienis C., Leitner W., Eberhardt H.. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology // Proc. of 2019 Modern Electric Power Systems (MEPS). 2019. Publisher: IEEE.

22. Heringer W. R., Cordeiro M. A. M., Paye J. C. H., Sousa A. L., Leão A. P., Vieira J. P. A., Santos M. C., Cardoso G., de Moraes A. P., Wontroba A., Farias P. E. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data // Proc. of 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA). 2020.

23. Jia Q., Dong X., Shi S., He X. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System // Proc. of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. 2

4. Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Koroleva T. G. Automatic transfer of double ground faults to single-phase ones as a way to increase the efficiency of 6-10 kV networks // Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects . Kazan, 2023. pp. 23-30.

25. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A.. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks // Proc. of 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005.

26. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University, 2005. 273 p.

27. Ensuring the sensitivity of distance protection of AC contact network feeders in areas with ungrounded supports / I. A. Kremlev, Yu. V. Kondratiev, V. A. Kvashchuk [et al.] // Fundamental Research. No. 6-3. 2014. pp. 472-475.

Authors of the publication

Kryukov Andrey Vasilievich - Irkutsk State Transport University Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Ovechkin Ilya Sergeevich – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

Suslov Konstantin Vitalievich – National Research University "MPEI", Moscow; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **29.03.2024 г.**

Отредактировано **14.04.2024 г.**

Принято **23.04.2024 г.**