

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

УДК 621.311

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006

Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта

Крюков Андрей Васильевич^{1,2}, Овечкин Илья Сергеевич¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ), позволяющих адекватно определять режимы однофазных замыканий (ОЗЗ) на землю в линиях электропередачи (ЛЭП) 6-10 кВ, расположенных в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей. Для их реализации применялся программный продукт Fazonord, версия 5.3.3.0-2024, дающий возможность рассчитывать режимы ЛЭП при различных способах соединения нейтралей трансформаторов с землей: изолированная нейтраль, а также заземленная через резисторы с малым и значительным сопротивлением. Моделирование ОЗЗ осуществлялось в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.3.0-2024, для СТЭ, включающей следующие элементы: три линии электропередачи (ЛЭП) 110 кВ, две подстанции с трансформаторами 40000 кВ·А, тяговую сеть 25 кВ с двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити и линию 10 кВ, смонтированную на опорах тяговой сети с полевой стороны. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3192 т в нечетном направлении и такого же числа составов массой 4192 т – в четном. Представленные в статье компьютерные модели дают возможность адекватно определять режимы однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта. Методика применима для ЛЭП и тяговых сетей любой конструкции и может использоваться на практике для настройки устройств защиты от ОЗЗ, создании средств их идентификации и локализации, а также при выборе наиболее эффективного типа заземления нейтрали.

Ключевые слова: технологические ЛЭП железнодорожного транспорта, способы заземления нейтралей, режимы однофазных замыканий, компьютерные модели

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта / А.В. Крюков, И.С. Овечкин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 53-67. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006.

Введение. В электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью часто возникают однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. Относительно малые токи ОЗЗ затрудняют идентификацию и локализацию этих повреждений. При большой длительности они могут переходить в двойные замыкания с протеканием значительных токов. Для решения проблемы ОЗЗ предлагаются другие способы заземления нейтралей трансформаторов: резистивные или через дугогасящий реактор [2].

Изучению процессов ОЗЗ посвящено большое число работ, часть из которых представлена в списке использованной литературы. Так, например, в [3, 4] описаны методы защиты от ОЗЗ. Анализ работы автоматических регуляторов катушек Петерсона, установленных в сетях 6-35 кВ с нестабильной проводимостью изоляции относительно земли, выполнен в [5]. Особенности установившихся режимов кабелей при различных заземлениях нейтрали и однофазных замыканиях на землю описаны в [6]. Подходы к ограничению перенапряжений при ОЗЗ проанализированы в [7]. Интеллектуальная система компенсации тока однофазного замыкания на землю представлена в [8]. Результаты экспериментальных исследований и расчетов ОЗЗ при различных режимах нейтралей описаны в [9]. Возможность использования комбинированной компенсационной катушки – резистора – рассмотрена в [10].

Методы заземления нейтрали силового трансформатора описаны в [11]. Анализ переходных процессов при ОЗЗ в сети 20 кВ проведен в [12]. Защиты от ОЗЗ рассмотрены в [13]. Способ обнаружения ОЗЗ в линии, обеспечивающей выдачу мощности ветровой электростанции и основанный на использовании критерия переходного фазного тока, предложен в [14]. Модель прерывистого дугового ОЗЗ представлена в [15]. Результаты исследования метода определения места ОЗЗ в резонансно-заземленной сети приведены в [16]. Способы обнаружения ОЗЗ методом локации предложены в [17, 18]. Новый вейвлет-пакетный метод идентификации линии с ОЗЗ описан в [19]. Вопросы математического моделирования режимов ОЗЗ на основе системы MatLab рассмотрены в [20-22]. В [23] представлен обзор способов локализации повреждений в сетях среднего напряжения с помощью глубокого обучения. Задача идентификации ОЗЗ на основе искусственных нейронных сетей решена в [24-26]. В [27] при поиске ОЗЗ в сетях с резонансным заземлением предлагается применять кластеризацию признаков и разложения по сингулярным значениям. Для выявления аварийного фидера в [28, 29] используются анализ установившихся и переходных параметров и преобразование Фурье. В [30-32] показано, что диагностирование неисправностей распределительных сетей можно эффективно осуществлять на основе вейвлет-коэффициентов.

Анализ перечисленных публикаций показывает, что в них рассмотрены важные аспекты ОЗЗ, однако вопросы моделирования таких режимов в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта, находящихся в зонах значительного электромагнитного влияния тяговых сетей, изучены недостаточно [33], поэтому возникает необходимость дополнительных исследований, которые на современном этапе должны проводиться на основе цифровых технологий. Для их реализации можно эффективно использовать методы, обеспечивающие адекватное моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) на основе фазных координат, реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC [34, 35], характеристики которого приведены на рис. 1.

Основное назначение	Моделирование нормальных, аварийных, неполнофазных, сложносимметричных, несинусоидальных и предельных режимов ЭЭС и СЭЖД, включающих сегменты переменного и постоянного тока
Методы и алгоритмы	Определение режимов ЭЭС и СЭЖД на основе фазных координат и решетчатых схем замещения с полнографовой топологией
Моделируемые элементы ЭЭС и СЭЖД	Многопроводные линии электропередачи, тяговые сети, трансформаторы и автотрансформаторы различной конструкции, асинхронные двигатели, выпрямители и инверторы, активные элементы smart grid: управляемые источники реактивной мощности, кондиционеры гармоник, симметрирующие устройства
Дополнительные задачи	Параметрическая идентификация ЛЭП, трансформаторов и тяговых сетей; определение нагревов проводов и трансформаторов; моделирование режимов плавки гололеда; расчеты напряженностей электромагнитных полей; вычисление наведенных напряжений на смежных ЛЭП и трубопроводах

Рис. 1. Характеристики промышленного программного комплекса Fazonord AC-DC

Рассматриваемая работа продолжает исследования, описанные в [33], и направлена на решение задач моделирования режимов ОЗЗ с учетом способов заземления нейтрали трансформаторов.

1. Изолированная нейтраль. Определение параметров ОЗЗ осуществлялось в программном комплексе Fazonord AC-DC – версия 5.3.4.11-2024 для системы

электропитания (рис. 2) участка железной дороги на основной частоте и на частотах высших гармоник.

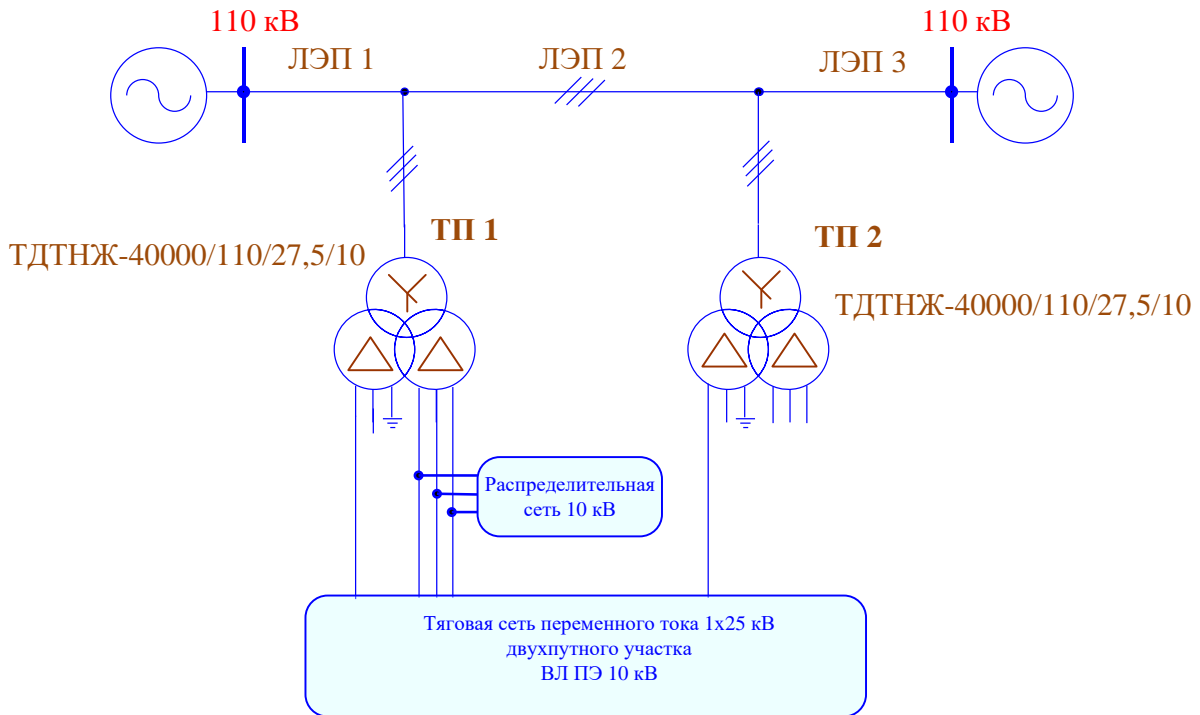


Рис. 2. Схема системы электропитания

В модели представлены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; трансформаторы ТДТНЖ-40000-110/27,5; участок тяговой сети (ТС) протяженностью 50 км с двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити и линия продольного электропитания (ВЛ ПЭ) 10 кВ, смонтированная на опорах ТС с полевой стороны. Поперечное сечение системы токоведущих частей показано на рис. 3. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3192 т в нечетном направлении и составов такого же числа весом 4192 т – в четном.



Рис. 3. Расположение токоведущих частей

Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 4–8. Исходный, доаварийный режим представлен на рис. 4, 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. 4г показаны графики, иллюстрирующие сравнение $U_1 = U_1(t)$ и $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$.

Напряжения фиксировались в точке, отвечающей расстоянию в 10 км от подстанции ТП 1. Полученные результаты показали, что из-за влияния тяговой сети (ТС) наблюдаются колебания фазных напряжений основной частоты; при этом по фазе А коэффициент вариации достигал семи процентов, а размах равнялся 1670 В.

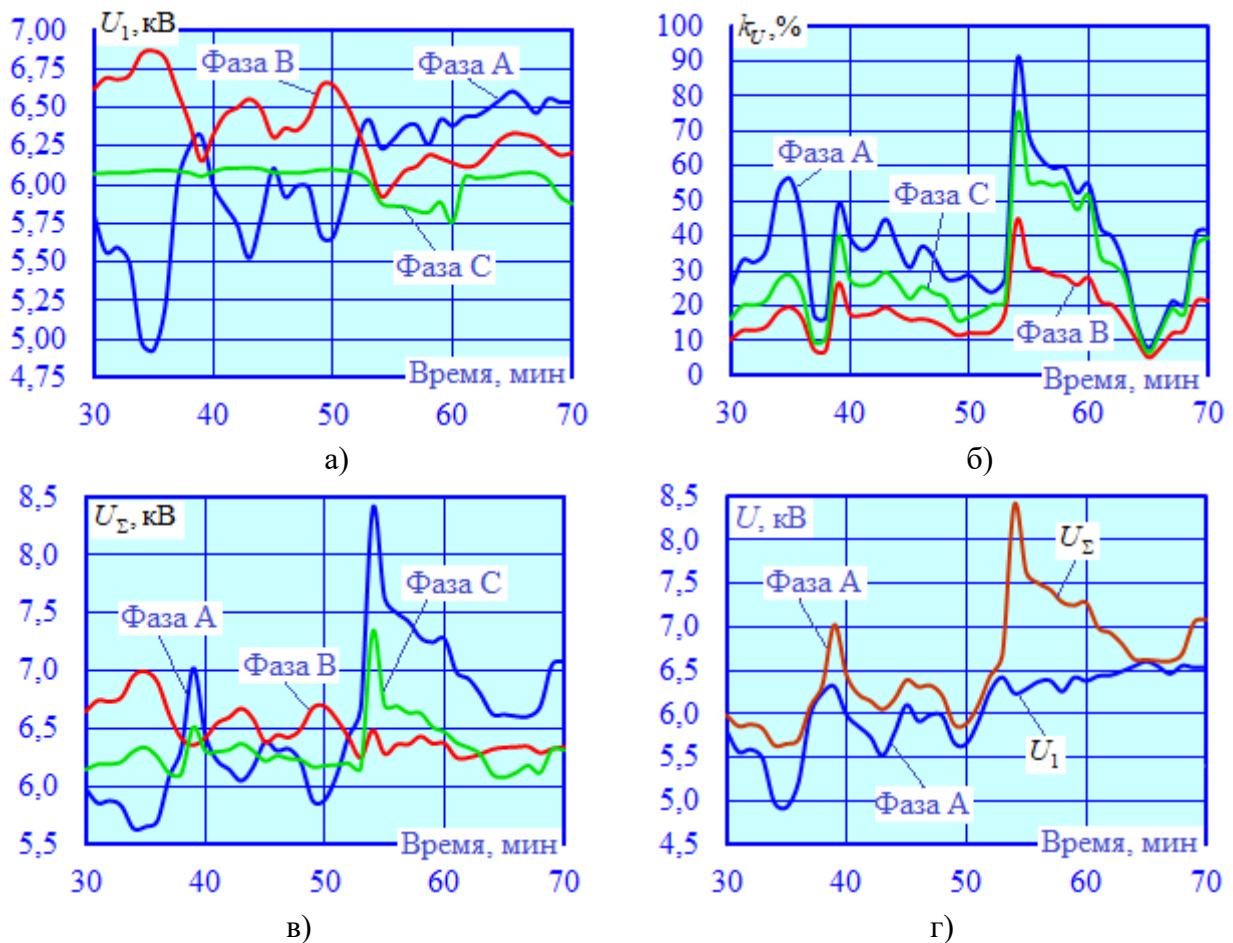


Рис. 4. Исходный, доаварийный режим: напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г):

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

Возникла существенная несимметрия напряжений U_Σ фаз линии относительно земли (рис. 4а), которая приводила к различию токов I_Σ при ОЗЗ разных фаз. Электровозы вызвали значительную несинусоидальность в ТС. За счет этого имели место заметные гармонические искажения U_Σ ВЛ СЦБ: максимум коэффициента k_U по фазе А достигал 92 %, а по фазам В и С – 45 и 77 % соответственно. На рис. 5 представлены результаты моделирования режимов ОЗЗ фазы А в точке, находящейся на расстоянии 10 км от подстанции ТП1. Напряжения неповрежденных фаз увеличивались до линейных значений. Потенциал фазы В в точке ОЗЗ снижался до нуля. Максимальные величины коэффициентов k_U фаз А и С уменьшались до 41 % и 49 % соответственно. На рис. 6 показан характер изменения токов ОЗЗ. На рис. 7 представлены формы кривых U_Σ и I_Σ при ОЗЗ.

Коэффициент гармоник тока ОЗЗ в некоторые моменты времени достигал сотен процентов, что приводило к заметным отличиям формы его кривой от синусоиды (рис. 7). В спектральном составе тока ОЗЗ (рис. 8) наблюдался значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15. Их величины лежали в диапазоне 28...30 % от основной. Для остальных гармоник он составлял 5 ...12 %.

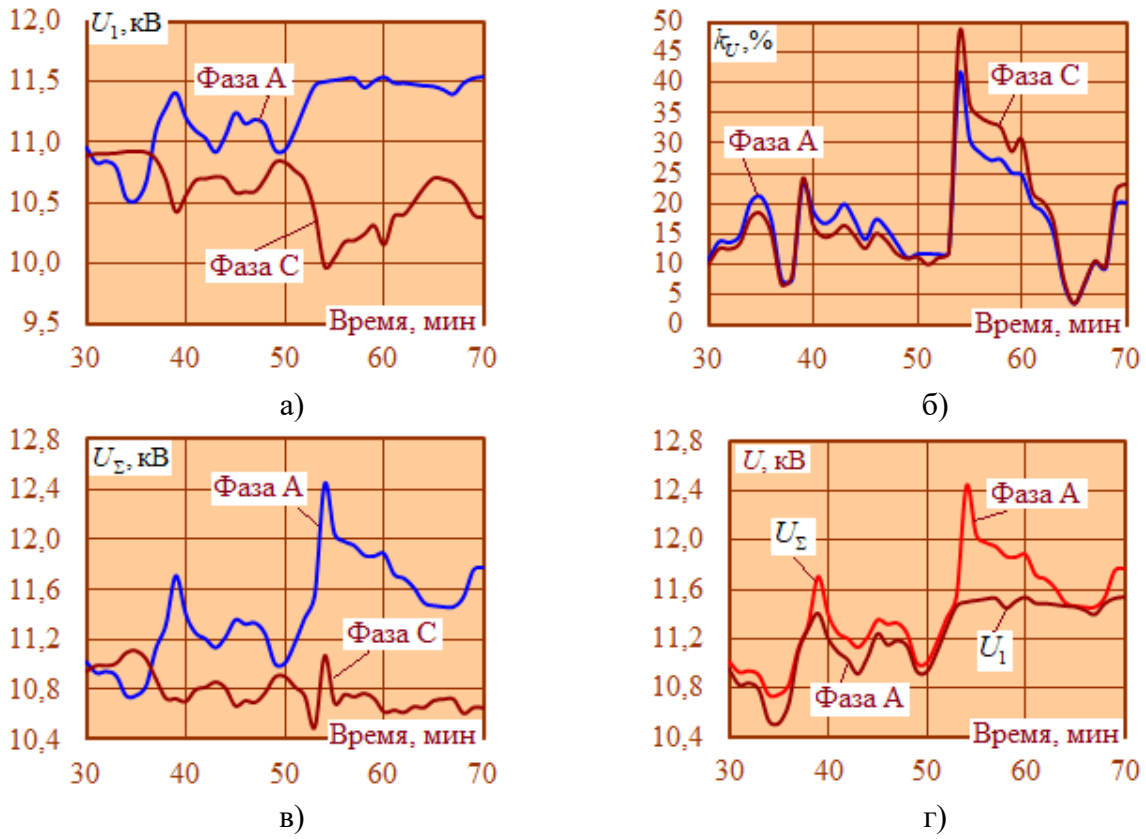


Рис. 5. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г)

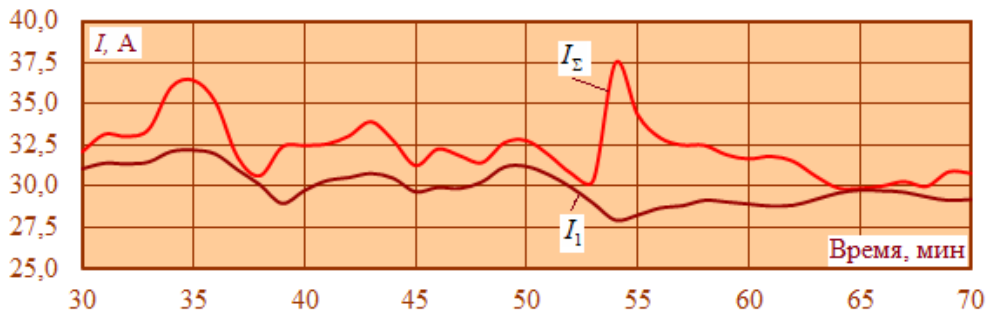
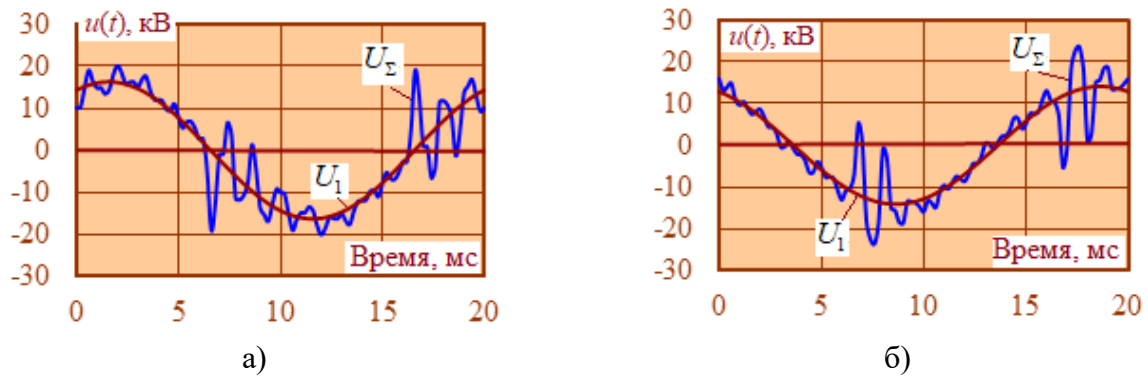


Рис. 6. Токи ОЗЗ: $I_\Sigma = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$



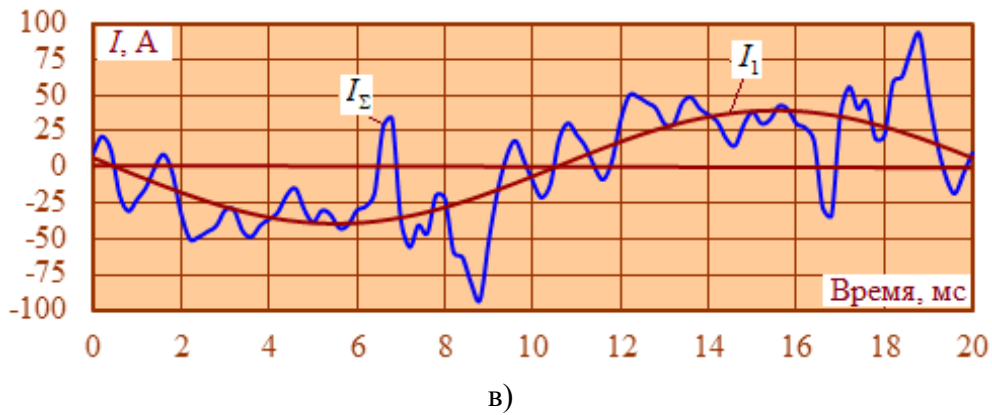


Рис. 7. Формы кривых напряжений неповрежденных фаз А (а) и С (б) в месте замыкания, а также токов ОЗЗ (в) на 54-й минуте моделирования

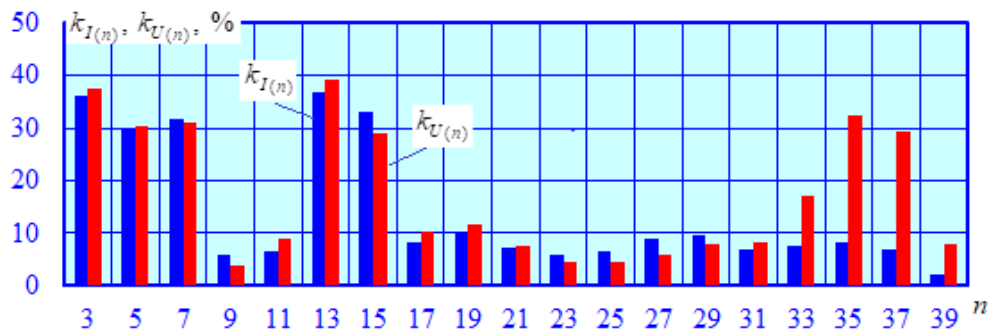


Рис. 8. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

2. Заземление нейтрали через низкоомное сопротивление. Такой способ используется в случаях, когда ОЗЗ необходимо селективно отключить в течение минимального интервала времени [9]. Для этого ток должен иметь достаточную величину для срабатывания релейной защиты (РЗ). Достоинства низкоомного заземления нейтрали состоят в следующем:

- повышается надежность работы РЗ;
- обеспечивается быстрое отключение поврежденного участка;
- в 1,5...2 раза снижаются уровни перенапряжений и уменьшается время их воздействия до нескольких секунд;
- за счет исключения возможности феррорезонансов возрастает надежность работы измерительных трансформаторов;
- снижается вероятность поражения персонала шаговыми напряжениями.

При наличии на районной обмотке схемы соединений «треугольник» для заземления нейтрали используется силовой фильтр нулевой последовательности (нейтраллер) типа ФМЗО (рис. 9), включающий следующие элементы:

- трансформатор вывода нейтрали с сухой изоляцией и соединением обмоток в зигзаг с выведенным нулем;
- высоковольтный резистор, рассчитанный на 6 или 10 кВ;
- трансформатор тока.

ФМЗО компактно по габаритам и может монтироваться в ячейку комплектного распределительного устройства.

Величина низкоомного сопротивления R_N была принята равной 10 Ом. Результаты моделирования представлены на рис. 10 – 13.

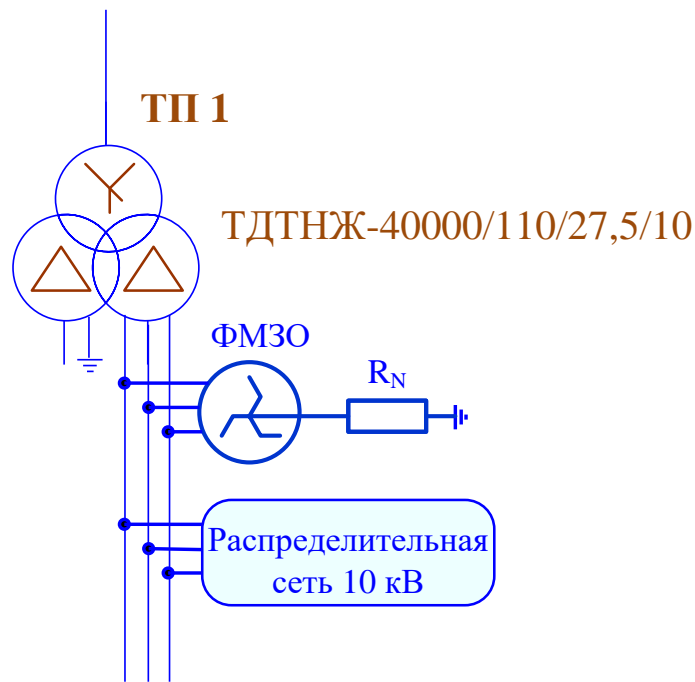


Рис. 9. Измененная часть схемы системы электроснабжения

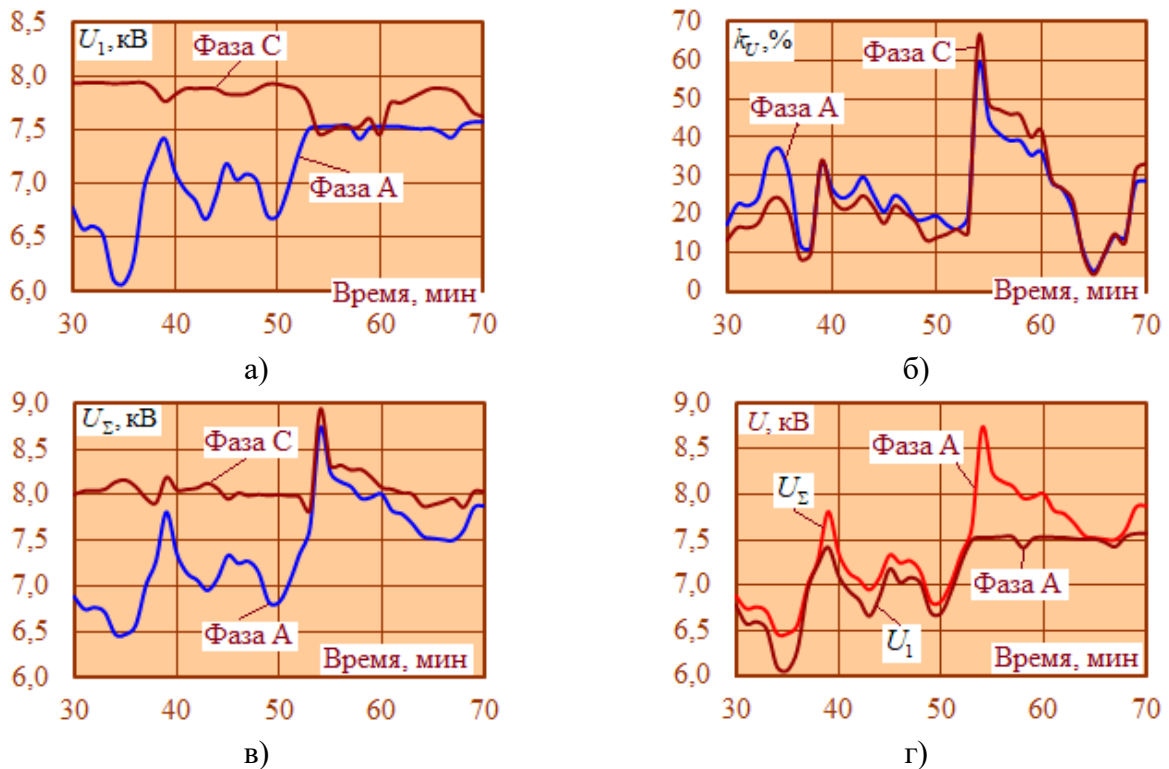


Рис. 10. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г)

Анализ рис. 10 позволяет заключить, что напряжение основной частоты увеличилось до значений, достигающих 7,9 кВ. По сравнению с изолированной нейтралью коэффициенты гармоник для фаз А и С возросли на 20 и 15 % соответственно. Максимальное значение эффективного напряжения уменьшилось с 12 кВ до 9 кВ.

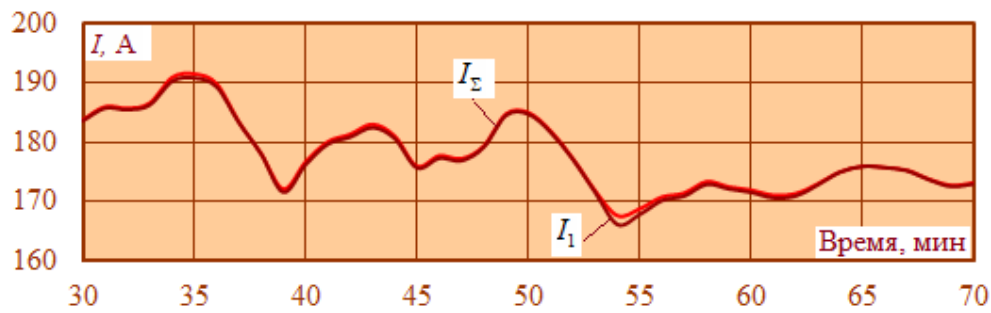


Рис. 11. Токи ОЗЗ: $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$

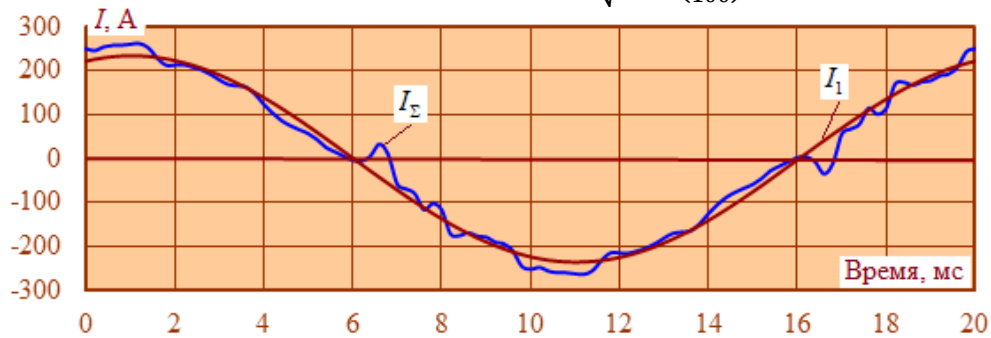


Рис. 12. Формы токов ОЗЗ (в) на 54-й минуте моделирования

Из анализа рис. 12 можно заключить, что степень искажения формы тока ОЗЗ существенно снизилась по сравнению с режимом, когда нейтраль ВЛ ПЭ была изолирована.

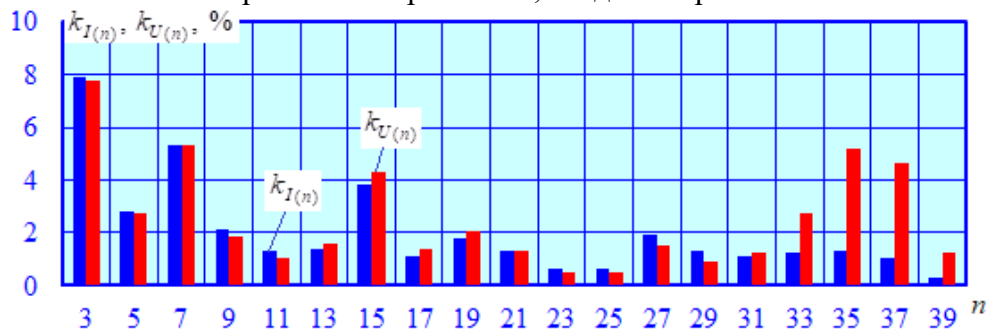


Рис. 13. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

Величины $k_{U(n)}$ по сравнению с режимом, когда нейтраль изолирована, существенно уменьшились (рис. 13). Для гармоник под номерами 3, 7 и 15 коэффициенты $k_{I(n)}$ лежали в диапазоне 2,5...5,6 % от основной.

3. Заземление нейтрали через высокоомное сопротивление. Такой способ применяется в тех случаях, когда необходима длительная работа сети в режиме ОЗЗ с целью ограничения времени перерывов в электроснабжении. Данный подход характеризуется снижением уровня перенапряжений до допустимых значений и возможностью организации защиты от ОЗЗ с действием на сигнал.

К недостаткам этого режима нейтрали можно отнести следующие факторы:

- при металлическом ОЗЗ напряжение на неповрежденных фазах повышается до линейного, что требует усиления фазной изоляции со значительными затратами в кабельных сетях;
- при длительных ОЗЗ увеличивается вероятность их перехода в двухфазные и трехфазные замыкания;
- повышается опасность поражения людей и животных шаговым напряжением;

– определение поврежденного присоединения производится по активной составляющей тока ОЗЗ, которая имеет достаточно малую величину, что ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты.

Моделирование проведено при $R_N=1100$ Ом. Результаты приведены на рис. 14 – 17.

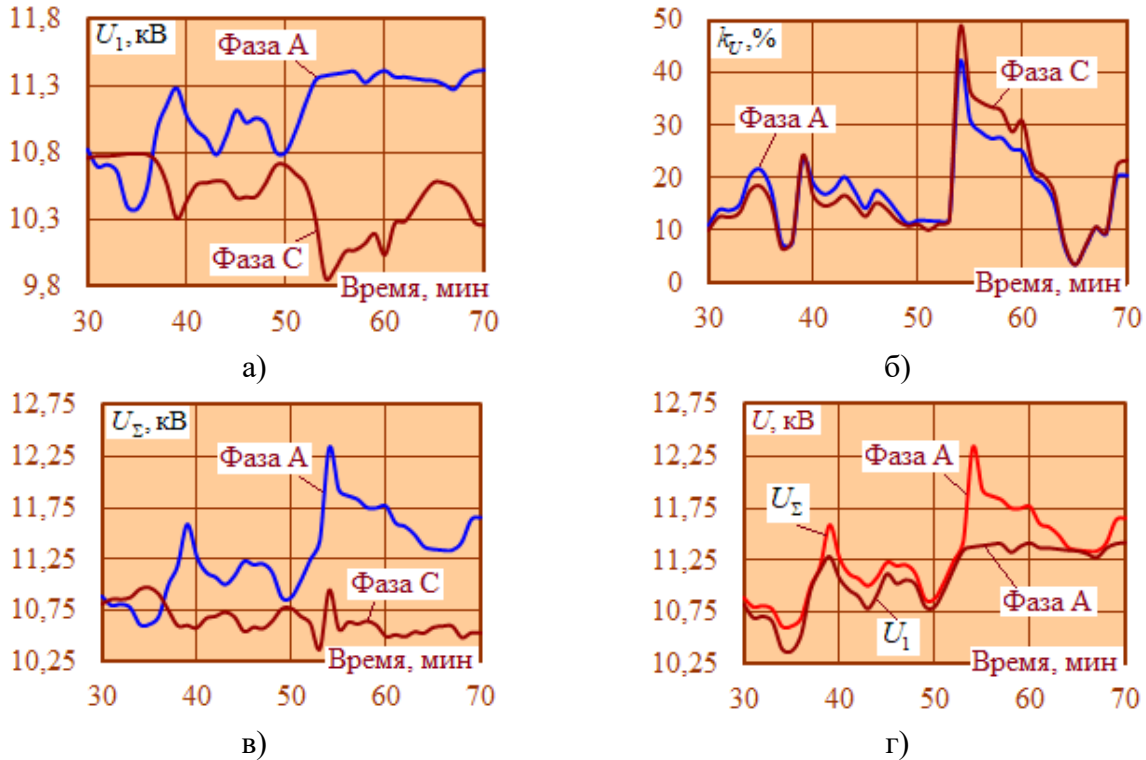


Рис. 14. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_{Σ} (г)

Напряжение основной частоты достигало 11,4 кВ, что близко к результатам, полученным при изолированной нейтрали. По сравнению с низкоомным заземлением этот параметр увеличивался. Коэффициенты $k_{U(n)}$ остаются такими же, как при $R_N = \infty$.

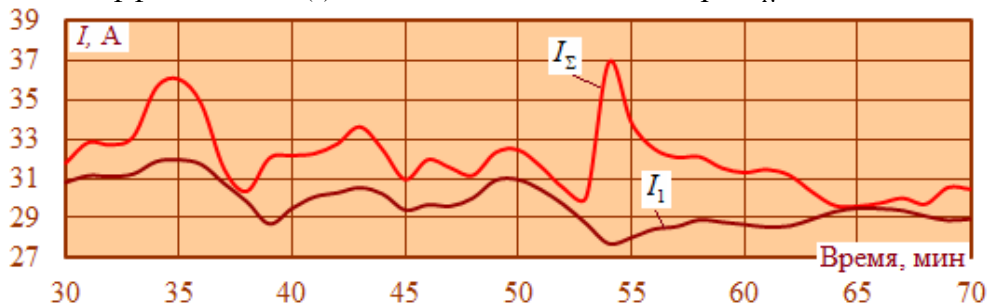


Рис. 15. Токи ОЗЗ

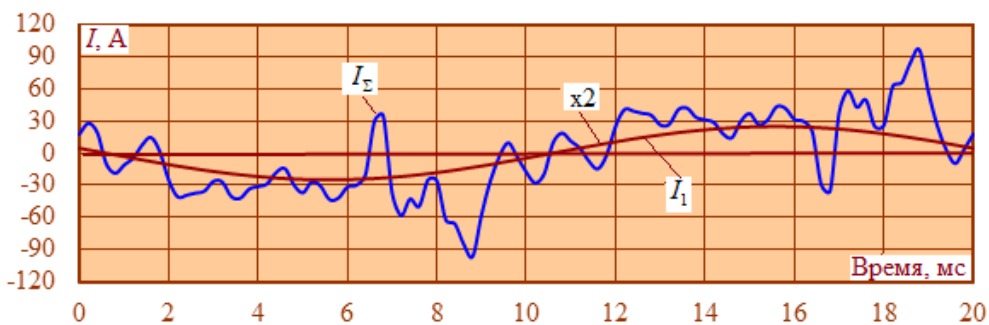


Рис. 16. Формы токов ОЗЗ на 54-й минуте моделирования

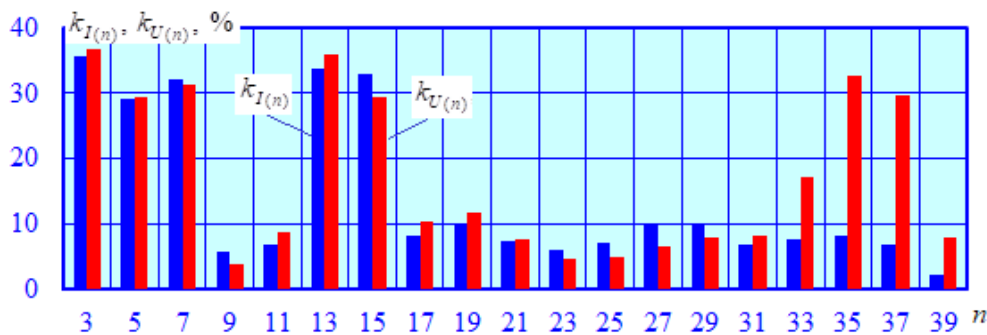


Рис. 17. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

По сравнению с изолированной нейтралью спектральный состав тока ОЗЗ (рис. 16) не изменился.

Заключение. Представленные в статье компьютерные модели, реализованные в программном комплексе Fazonord AC-DC, дают возможность адекватно определять режимы однофазных замыканий на землю в ВЛ ПЭ 10 кВ при разных способах заземления нейтрали. Они позволяют корректно оценить электромагнитное влияние контактной сети на ВЛ ПЭ с учетом высших гармоник. Методика является универсальной и применима для ЛЭП и ТС любой конструкции.

Кроме расчетов режимов ОЗЗ, представленные в статье разработки могут использоваться на практике для настройки устройств защиты от этих видов повреждений, а также при создании методов и средств идентификации ОЗЗ, определении мест их дислокации и выборе наиболее эффективного способа заземления нейтрали.

Работа 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».

Список источников

1. Кузьмин С.В. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2020. – № 1. – С. 113-123.
2. Шалин А.И. Анализ характеристик направленных защит от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / А.И. Шалин, Е.Н. Политов // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Томск, 2002. – Т. 2. – С. 35–39.
3. Шуин В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков М.: НТФ Энергопрогресс, 2001. – 104 с.
4. Кузьмин С.В. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2020. – № 1. – С. 113-123.
5. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество, 1998. – №12. – С. 8-23.
6. Yunusov E.M., Kuznetsov A.A., Kuchumov L.A., et al. Analysis of the operation of automatic regulators of peterson coil installed in 6-35 Kv networks with unstable capacitive insulation conductivity to ground. 2021 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, 2021, Publisher: IEEE, DOI:10.1109/EIConRus51938.2021.9396087.
7. Bosneaga V., Suslov V., Stratan I., et al. The peculiarities of the steady state modes of medium voltage cables grid at various neutral grounding and single-phase to ground failure. 2022 International Conference and exposition on electrical and power engineering (EPE). IEEE, 2022, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959817.
8. Shuin V.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T.Yu. About approach to solution of problem of protection against Earth faults in 6-10 kV cable networks with different neutral grounding modes. 2019 2nd International youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RPA). IEEE, 2019, DOI:10.1109/RPA47751.2019.8958328.

9. Kuzmin A. Development of the intelligent single phase-to-ground-fault current compensation system for 6–35 kV networks. 2016 11th International forum on strategic technology (IFOST). IEEE, 2016, DOI:10.1109/IFOST.2016.7884244.
10. Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin. A. Experimental investigations and calculations in 6–35 kV networks with various neutral conditions. Proceedings of the 2010 electric power quality and supply reliability conference, IEEE, 2010, DOI:10.1109/PQ.2010.5549997.
11. Dobrea I. The opportunity to treat the neutral through the resistor or combined compensation coil – resistor. International conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), IEEE, 2019, DOI:10.1109/SIELMEN.2019.8905891.
12. Helać V., Smaka S., Grebović S., et al. Power transformer neutral point grounding methods: analysis of fault characteristics. Innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe), IEEE, 2022, DOI:10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960344.
13. Zhou Y., Zhao X., Cui X., et al. Transient analysis and simulation of a single-phase grounding fault in 20kV small resistance grounding system. IEEE 3rd International electrical and energy conference (CIEEC), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019409.
14. El-Sherif N. Ground-fault protection: all you need to know. IEEE Transactions on industry applications, IEEE. 2017, vol. 53, iss. 6, DOI: 10.1109/TIA.2017.2746558.
15. Zhang B.H.; Guo D.Y.; Huang R.M.; Wu W.M. Single-phase-to-ground fault detection in wind farm collector line using transient phase current criterion. 2013 IEEE International conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), IEEE, 2013, DOI:10.1109/TENCON.2013.6718460.
16. Dekhtiar S., Filippenko E., Chusovitn P., et al. Intermittent arc fault model for distribution network. 2023 Belarusian-Ural-Siberian smart energy conference (BUSSEC), IEEE, 2023., DOI: 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296457
17. Qi Zheng, Zheng Zhao, Yang Yihan. Study on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system. 2010 5th International conference on critical infrastructure (CRIS), IEEE, 2010, DOI:10.1109/CRIS.2010.5617537.
18. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and experimental detection of single phase-to-earth faults of overhead conductors in 6–10 Kv distribution circuits by a location method. 2020 International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), IEEE, 2020, DOI:1109/UralCon49858.2020.9216267.
19. Leng Hua, Tang Haiguo, Gong Hanyang, Zhang Zhidan. A new method to locate single-phase-earth fault in neutral ineffectively grounded systems. 2017 10th International conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA). IEEE, 2017, DOI:10.1109/ICICTA.2017.46.
20. Утегулов Б.Б. Математическое моделирование устройства автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-10 кВ / Б.Б. Утегулов, А.М. Шинтемиров // Наука и техника Казахстана, 2003. – № 2. – С. 174-181.
21. Андреев А.А. Моделирование переходного процесса в распределительной сети 10 КВ при однофазном замыкании на землю / А. А. Андреев // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 5-12.
22. Сорокин А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью / А. Сорокин, В.А. Шабанов // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 52-62.
23. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P. et al. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. Energies, 2022, vol. 15, iss. 18, DOI: 10.3390/en15186762.
24. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. Journal of engineering research, 2021, DOI:10.36909/jer.13627.
25. Guo M.F., Zeng X.D., Chen D.Yu. et al. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems. IEEE Sensors journal, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 1291-1300, DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
26. Ying D., Qingzhu S., Yadong L. et al. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems. 2018 Condition monitoring and diagnosis (CMD), Perth, 2018, DOI:10.1109/CMD.2018.8535600.
27. Guo M.F., Yang N.C. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. International journal of electrical power & energy systems. 2017, vol. 93, pp. 97-108, DOI:10.1016/j.ijepes.2017.05.014.

28. Xiaowei W., Xiangxiang W., Dechang Y. et al. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, vol. 114, DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105391.
29. Wei K., Zhang J., He Y. et al. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 18, DOI:10.3390/en13184724.
30. Rui L., Nanhua Y., Ming G. et al. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy. 2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC). Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
31. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on power delivery*, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 140-153, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
32. Gong Jing, Luan Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison. 2009 International conference on electrical machines and systems, IEEE, 2009, DOI:10.1109/ICEMS.2009.5382649.
33. Крюков А.В. Моделирование режимов однофазных замыканий на землю в линиях 6-10 кВ с учетом повышенных электромагнитных влияний / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, И.А. Любченко // *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*, 2022. – № 1.– С. 14-23.
34. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 2005. – 273 с.
35. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.

Крюков Андрей Васильевич. Доктор технических наук, профессор, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and_kryukov@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Овечкин Илья Сергеевич. Аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1147730, SPIN: 8011-0164, ORCID: 0009-0006-4639-1504, iliaov2015@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.311

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006

Modeling modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport

Andrey V. Kryukov^{1,2}, Ilya S. Ovechkin²

¹Irkutsk state transport university,
Russia, Irkutsk

²Irkutsk national research technical university,
Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. The purpose of the research presented in the article was to develop digital models of traction power supply systems that make it possible to adequately determine the modes of single-phase ground faults in 6-10 kV power lines located in areas of increased electromagnetic influences of traction networks. For their implementation, the Fazonord software product, version 5.3.3.0-2024, was used, which makes it possible to determine power transmission line modes for various methods of connecting transformer neutrals to the ground: isolated neutral, as well as grounding through resistors with low and significant resistance. Simulation of single-phase faults was carried out in the Fazonord software package, version 5.3.3.0-2024, for a system including the following elements: three 110 kV power lines, two substations with 40,000 kV·A transformers, a 25 kV traction network with two contact pendants, four rail threads and a 10 kV line mounted on contact network supports on the

field side. Traction loads were created by the movement of two trains weighing 3192 tons in an odd direction and the same number of trains weighing 4192 tons in an even direction. The methodology presented in the article and the computer models developed on its basis make it possible to adequately determine the modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport. The technique is applicable to power lines and traction networks of any design and can be used in practice to determine single-phase fault modes, configure protection devices against these types of damage, create means of their identification and localization, and select the most effective method of neutral grounding.

Keywords: technological power lines of railway transport, methods of grounding neutrals, single-phase fault modes, computer models

References

1. Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. et al. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Single-phase ground faults in 6-10 kV networks and electrical injuries in coal mines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining magazine], 2020, no. 1. pp. 113-123.
2. Shalin A. I., Politov E.N. Analiz kharakteristik napravlennykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–35 kV [Analysis of the characteristics of directional protection against ground faults in 6–35 kV networks]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'. Tomsk* [Energy: ecology, reliability, safety. Tomsk], 2002. vol. 2, pp. 35-39
3. Shuin V.A., Gusenkov A.V. Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Protection against ground faults in 6–10 kV electrical networks]. M.: NTF Energoprogress, 2001, 104 p.
4. Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. et al. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Single-phase ground faults in 6-10 kV networks and electrical injuries in coal mines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining magazine], 2020, no. 1, pp. 113-123.
5. Evdokunin G.A., Gudilin S.V., Korepanov A.A. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Choice of neutral grounding method in 6-10 kV networks]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1998, no. 12. pp. 8-23.
6. Yunusov E.M., Kuznetsov A.A., Kuchumov L.A, et al. Analysis of the operation of automatic regulators of peterson coil installed in 6-35 Kv networks with unstable capacitive insulation conductivity to ground. 2021 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, 2021, Publisher: IEEE, DOI:10.1109/EIConRus51938.2021.9396087.
7. Bosneaga V., Suslov V., Stratan I., et al. The peculiarities of the steady state modes of medium voltage cables grid at various neutral grounding and single-phase to ground failure. 2022 International Conference and exposition on electrical and power engineering (EPE). IEEE, 2022, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959817.
8. Shuin V.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T.Yu. About approach to solution of problem of protection against Earth faults in 6-10 kV cable networks with different neutral grounding modes. 2019 2nd International youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RPA). IEEE, 2019, DOI:10.1109/RPA47751.2019.8958328.
9. Kuzmin A. Development of the intelligent single phase-to-ground-fault current compensation system for 6–35 kV networks. 2016 11th International forum on strategic technology (IFOST). IEEE, 2016, DOI:10.1109/IFOST.2016.7884244.
10. Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin. A. Experimental investigations and calculations in 6–35 kV networks with various neutral conditions. Proceedings of the 2010 electric power quality and supply reliability conference, IEEE, 2010, DOI:10.1109/PQ.2010.5549997.
11. Dobra I. The opportunity to treat the neutral through the resistor or combined compensation coil – resistor. International conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), IEEE, 2019, DOI:10.1109/SIELMEN.2019.8905891.
12. Helać V., Smaka S., Grebović S., et al. Power transformer neutral point grounding methods: analysis of fault characteristics. Innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe), IEEE, 2022, DOI:10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960344.
13. Zhou Y., Zhao X., Cui X., et al. Transient analysis and simulation of a single-phase grounding fault in 20kV small resistance grounding system. IEEE 3rd International electrical and energy conference (CIEEC), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019409.
14. El-Sherif N. Ground-fault protection: all you need to know. IEEE Transactions on industry applications, IEEE. 2017, vol. 53, iss. 6, DOI: 10.1109/TIA.2017.2746558.

15. Zhang B.H.; Guo D.Y.; Huang R.M.; Wu W.M. Single-phase-to-ground fault detection in wind farm collector line using transient phase current criterion. 2013 IEEE International conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), IEEE, 2013, DOI:10.1109/TENCON.2013.6718460.
16. Dekhtiar S., Filippenko E., Chusovitin P., et al. Intermittent arc fault model for distribution network. 2023 Belarusian-Ural-Siberian smart energy conference (BUSSEC), IEEE, 2023., DOI: 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296457
17. Qi Zheng, Zheng Zhao, Yang Yihan. Study on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system. 2010 5th International conference on critical infrastructure (CRIS), IEEE, 2010, DOI:10.1109/CRIS.2010.5617537.
18. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and experimental detection of single phase-to-earth faults of overhead conductors in 6–10 Kv distribution circuits by a location method. 2020 International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), IEEE, 2020, DOI:1109/UralCon49858.2020.9216267.
19. Leng Hua, Tang Haiguo, Gong Hanyang, Zhang Zhidan. A new method to locate single-phase-earth fault in neutral ineffectively grounded systems. 2017 10th International conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA). IEEE, 2017, DOI:10.1109/ICICTA.2017.46.
20. Utegulov B.B., Shintemirov A.M. Matematicheskoye modelirovaniye ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-10 kV [Mathematical modeling of a device for automatically determining the current of a single-phase earth fault in electrical networks of 6-10 kV]. Nauka i tekhnika Kazakhstana [Science and technology of Kazakhstan], 2003, no. 2, pp. 174-181.
21. Andreev A.A. Modelirovaniye perekhodnogo protsessa v raspredelitel'noy seti 10 KV pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Modeling of the transient process in a 10 KV distribution network with a single-phase earth fault]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy [Electrotechnical and information complexes and systems], 2022, vol. 18, no. 2, pp. 5-12.
22. Sorokin A., Shabanov V.A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Algorithm for determining the damaged phase in single-phase earth fault in networks with isolated neutral]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy [Electrotechnical and information complexes and systems], 2022, vol. 18, no. 2, pp. 52-62.
23. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P. et al. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. Energies, 2022, vol. 15, iss. 18, DOI: 10.3390/en15186762.
24. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. Journal of engineering research, 2021, DOI:10.36909/jer.13627.
25. Guo M.F., Zeng X.D., Chen D.Yu. et al. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems. IEEE Sensors journal, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 1291-1300, DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
26. Ying D., Qingzhu S., Yadong L. et al. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems. 2018 Condition monitoring and diagnosis (CMD), Perth, 2018, DOI:10.1109/CMD.2018.8535600.
27. Guo M.F., Yang N.C. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. International journal of electrical power & energy systems. 2017, vol. 93, pp. 97-108, DOI:10.1016/j.ijepes.2017.05.014.
28. Xiaowei W., Xiangxiang W., Dechang Y. et al. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks. International journal of electrical power & energy systems, 2020, vol. 114, DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105391.
29. Wei K., Zhang J., He Y. et al. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. Energies, 2020, vol. 13, iss. 18, DOI:10.3390/en13184724.
30. Rui L., Nanhua Y., Ming G. et al. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy. 2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC). Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
31. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. IEEE Transactions on power delivery, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 140-153, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
32. Gong Jing, Luan Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison. 2009 International conference on electrical machines and systems, IEEE, 2009, DOI:10.1109/ICEMS.2009.5382649.
33. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Lyubchenko I.A. Modelirovaniye rezhimov odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v liniyakh 6-10 kV s uchedom povyshennykh elektromagnitnykh vliyaniy [Modeling of single-phase earth fault

- modes in 6-10 kV lines taking into account increased electromagnetic influences]. *Operativnoye upravleniye v elektroenergetike: podgotovka personala i podderzhaniye yego kvalifikatsii* [Operational management in the electric power industry: personnel training and maintenance of their qualifications], 2022, no. 1, pp. 14-23.
34. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh system [Complex symmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta [Irkutsk: Publishing house of Irkutsk University], 2005. 273 p.
35. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moskva: Direkt-Media [Moscow: Direct-Media], 2023. 156 p.

Kryukov Andrey Vasilievich. Doctor of technical sciences, professor, professor of the Irkutsk state transport university; professor of Irkutsk national research technical university. AuthorID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and_kryukov@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Ovechkin Ilya Sergeevich. Postgraduate student at Irkutsk state transport university. AuthorID: 1147730. SPIN: 8011-0164, ORCID: 0009-0006-4639-1504, iliaov2015@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 03/12/2024; approved after reviewing 11/27/2024; accepted for publication 02/11/2025.