

Моделирование режимов однофазных замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей

А.В. Крюков^{1,2}, И.С. Овечкин¹✉

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉iliaov2015@mail.ru

Резюме

Ежегодно из-за аварий на сетях, обеспечивающих электропитание сигнальных точек, возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов. Значительная доля от общего числа отказов приходится на однофазные замыкания на землю. Особенность данного вида неисправностей заключается в небольших токах, что серьезно усложняет обнаружение мест их возникновения. Поврежденные линии электрических передач не отключаются релейной защитой, при этом в длительных режимах однофазных замыканий на землю может происходить разрушение структуры железобетонных опор при протекании через них тока однофазных замыканий на землю. Кроме этого, увеличение напряжения здоровых фаз относительно земли до линейных значений может приводить к пробое изоляции и возникновению двухфазных замыканий. Режимы однофазных замыканий на землю в сетях общего назначения подробно рассмотрены во многих отечественных и зарубежных публикациях. Однако задача определения таких режимов в технологических линиях электрических передач на железнодорожном транспорте, находящихся в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей, остается актуальной. Для ее решения могут эффективно использоваться методы моделирования режимов систем электроснабжения железнодорожного транспорта, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения и реализованные в программном комплексе Fazonord. В статье описана модель системы объектов железнодорожного транспорта, включающая воздушную линию продольного электроснабжения, смонтированную на опорах контактной сети, представлены результаты определения режимов однофазных замыканий на землю, сделаны выводы о влиянии тяговой сети на токи замыканий. Цифровые модели, описанные в работе, позволяют получить полную информацию о режимах однофазных замыканий на землю на основной частоте и на частотах высших гармоник. Данные модели могут найти практическое применение при решении задач настройки устройств, обеспечивающих идентификацию однофазных замыканий на землю, а также для разработки методов локализации мест их возникновения в сетях, подверженных электромагнитным влияниям.

Ключевые слова

однофазные замыкания на землю, системы электроснабжения объектов железнодорожного транспорта, линии электрических передач, программный вычислительный комплекс Fazonord, моделирование

Для цитирования

Крюков А.В. Моделирование режимов однофазных замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей / А.В. Крюков, И.С. Овечкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 10–23. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).10-23.

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.03.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.03.2024 г.; принята к публикации: 21.03.2024 г.

Благодарность

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».

Modeling of single-phase fault modes in power supply systems of non-traction consumers

A.V. Kryukov^{1,2}, I.S. Ovechkin¹✉

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉iliaov2015@mail.ru

Abstract

Every year, due to accidents in the networks providing power supply to signal points, delays occur in the movement of several thousand trains. A significant proportion of the total number of failures are single-phase ground faults. The peculiarity of this

type of malfunction consists in small currents, which greatly complicates the detection of their occurrence. Damaged electric transmission lines are not switched off by relay protection, while in long-term modes of single-phase ground faults, the structure of reinforced concrete supports may be destroyed when a single-phase ground fault current flows through them. In addition, an increase in the voltage of healthy phases relative to the ground to linear values may result in insulation breakdown and the occurrence of two-phase short circuits. The modes of single-phase ground faults in general-purpose networks are considered in detail in a large number of domestic and foreign publications. However, the task of determining such modes in technological lines of electric transmissions on railway transport located in areas of increased electromagnetic influences of traction networks remains unresolved in full. To solve it, it is possible to effectively use methods of modeling modes of railway power supply systems developed at the Irkutsk State Transport University and implemented in the Fazonord software package. The article describes a model of a system of railway transport facilities, including an overhead line of longitudinal power supply mounted on supports of a contact network. The results of determining the modes of single-phase ground faults are presented. Conclusions are drawn about the influence of the power grid on short-circuit currents. The digital models described in the article allow to obtain complete information about the modes of single-phase ground faults at the fundamental frequency and at higher harmonic frequencies and can find practical application in solving problems of configuring devices that identify single-phase ground faults, as well as for developing methods for localizing their occurrence in networks subject to electromagnetic influences.

Keywords

single-phase ground faults, power supply systems for railway transport facilities, electric transmission lines, Fazonord software package, modeling

For citation

Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov odnofaznykh замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей [Modeling of single-phase short circuits in the power supply system of non-traction consumers]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 10–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).10-23.

Article Info

Received: March 13, 2024; Revised: March 20, 2024; Accepted: March 21, 2024.

Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of methods, algorithms and software for modeling modes of traction power supply systems of direct current railways».

Введение

Среди нетяговых потребителей железных дорог наибольшее внимание уделяется устройствам сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), обеспечивающим безопасность движения поездов. Ежегодно из-за отказов в сетях электропитания сигнальных точек возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов [1]. Значительная доля от общего числа неисправностей приходится на однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Особенность данного вида неисправностей заключается в сравнительно небольших токах, что очень затрудняет обнаружение мест их возникновения. Поврежденные линии электрических передач (ЛЭП) не отключаются релейной защитой, при этом в длительных режимах ОЗЗ может происходить разрушение структуры железобетонных опор при протекании через них тока ОЗЗ. Кроме этого, увеличение напряжения здоровых фаз относительно земли до линейных значений может приводить к пробое изоляции и возникновению двухфазных замыканий.

Режимы ОЗЗ в сетях общего назначения подробно рассмотрены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Так, например, в [2] предложена методика оценки распределения токов ОЗЗ при помощи программного комплекса RastrWin. Алгоритм обнаружения ОЗЗ на основе критерия фазовой асимметрии описан в [3]. Метод определения токов ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью представлен в [4, 5]. Результаты разработки алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов ЛЭП приведены в [6]. Задача обнаружения ОЗЗ с анализом параметров в системах электроснабжения (СЭС) с непрямым заземлением решена в [7]. Метод идентификации слабых повреждений в распределительных сетях с высоким импедансом, основанный на использовании изменений асимметрии, описан в [8]. Дополнительный критерий выбора неисправного фидера при ОЗЗ в распределительных сетях предложен в [9]. Обзор методов поиска неисправностей СЭС среднего напряжения, использующих глубокое обучение, выполнен в [10]. Способы обнаруже-

ния ОЗЗ в распределенных сетях на основе искусственных нейронных сетей описаны в [11, 12]. Алгоритм локализации ОЗЗ в СЭС с резонансным заземлением на основе концепции объединения функций предложен в [13]. Способ поиска ОЗЗ с использованием сверточной нейронной сети и декомпозиции задач рассмотрен в [14]. Технология обнаружения ОЗЗ, основанная на применении кластеризации признаков и разложения по сингулярным значениям в сетях с резонансным заземлением, описана в [15]. Метод выделения неисправного фидера, базирующийся на анализе установившихся и переходных параметров и обратном преобразовании Фурье, представлен в [16]. Способ определения поврежденного фидера с ОЗЗ, использующий быстрое преобразование Фурье и коэффициент корреляции Пирсона, рассмотрен в [17]. Алгоритм диагностики неисправностей распределительной ЛЭП на основе энтропии энергии вейвлета предложен в [18]. Способ обнаружения переходных процессов, вызванных повреждениями, на основе анализа энергии вейвлет-коэффициента в реальном времени рассмотрен в [19].

Цель представленных в статье исследований заключается в разработке методов и цифровых моделей для определения режимов однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения железнодорожного транспорта (ЖДТ).

Анализ указанных публикаций [2–19] позволяет сделать вывод, что в них рассмотрены важные вопросы, связанные с определением режимов ОЗЗ и поиском мест их возникновения в сетях общего назначения. Однако задача моделирования ОЗЗ в сетях, питающих объекты ЖДТ, остается не решенной. Она отличается повышенной сложностью из-за следующих факторов: разнородная структура СЭС ЖДТ, включающих трехфазные и однофазные сегменты; перемещение электровозов в пространстве; значительные электромагнитные влияния тяговых сетей (ТС) на смежные ЛЭП и др. [20, 21].

Далее представлены результаты моделирования ОЗЗ в СЭС ЖДТ и выполнен анализ изменений ее параметров при движении поездов.

Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord (версия 5.3.4.1–

2024 г. для СЭС ЖДТ) (рис. 1). Фрагмент внешнего вида расчетной модели приведен на рис. 2, а. В ней представлены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000-110/27,5; участок ТС протяженностью 50 км, включающий контактные подвески, рельсовые нити, линии 6 и 10 кВ. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3 192 т в нечетном направлении и двух составов массой 4 192 т – в четном (рис. 2, б). Зависимости потребляемых поездами токов от пикетов показаны на рис. 2, в и г. Поперечное сечение ТС приведено на рис. 3. Результаты моделирования представлены на рис. 4–8. Результаты определения исходного, доаварийного режима проиллюстрированы на рис. 4, на котором показаны графики зависимостей от времени t следующих параметров: напряжений основной частоты $U_1 = U_1(t)$; коэффициентов высших гармоник (ВГ) $k_U = k_U(t)$ и эффективных напряжений с учетом ВГ $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$. Напряжения фиксировались в точке, отвечающей расстоянию 10 км от подстанции ТП 1.

Полученные результаты показывают, что из-за влияния ТС наблюдаются колебания фазных напряжений основной частоты. При этом по фазе А коэффициент вариации достигает 7 %, а размах колебаний равен 1,7 кВ. Имеет место существенная несимметрия фазных напряжений (рис. 4, а), которая приводит к различию токов ОЗЗ разных фаз. Электровозы создают значительные уровни несинусоидальности токов и напряжений в ТС. За счет этого имеют место сильные гармонические искажения напряжений воздушных линий СЦБ: максимум коэффициента гармоник по фазе А равен 92 %, а по фазам В и С – 45 и 77 % соответственно.

Результаты моделирования режимов ОЗЗ фазы В для точки, расположенной на расстоянии 10 км от подстанции ТП 1, представлены на рис. 5. Напряжения неповрежденных фаз возрастают до линейных значений. Напряжение фазы В для точки ОЗЗ снижается до нуля. Максимумы коэффициентов k_{2U} фаз А и С уменьшаются до 41 и 49 % соответственно. Характер изменения токов ОЗЗ показан на рис. 6. На рис. 7 приведены формы кривых напряжений неповрежденных фаз, а также тока ОЗЗ. Коэффициент гармоник тока ОЗЗ в некоторые моменты времени достигает сотен процентов, что приводит к значительным отличиям его формы кривой от синусоиды (рис. 7).

В спектральном составе тока ОЗЗ (рис. 8) наблюдается значительный вклад таких высших гармоник, как 3, 5, 7, 13 и 15. Коэффици-

ент данных ВГ лежит в диапазоне 30–37 %, для остальных ВГ он находится в пределах 2–10 %.

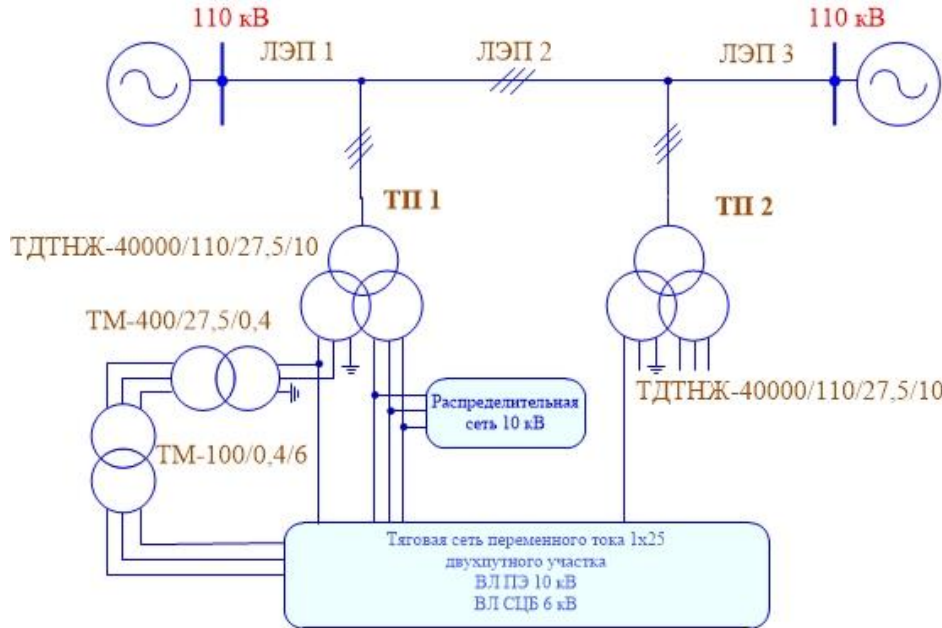


Рис. 1. Схема системы электроснабжения железнодорожного транспорта
Fig. 1. Diagram of the railway transport power supply system

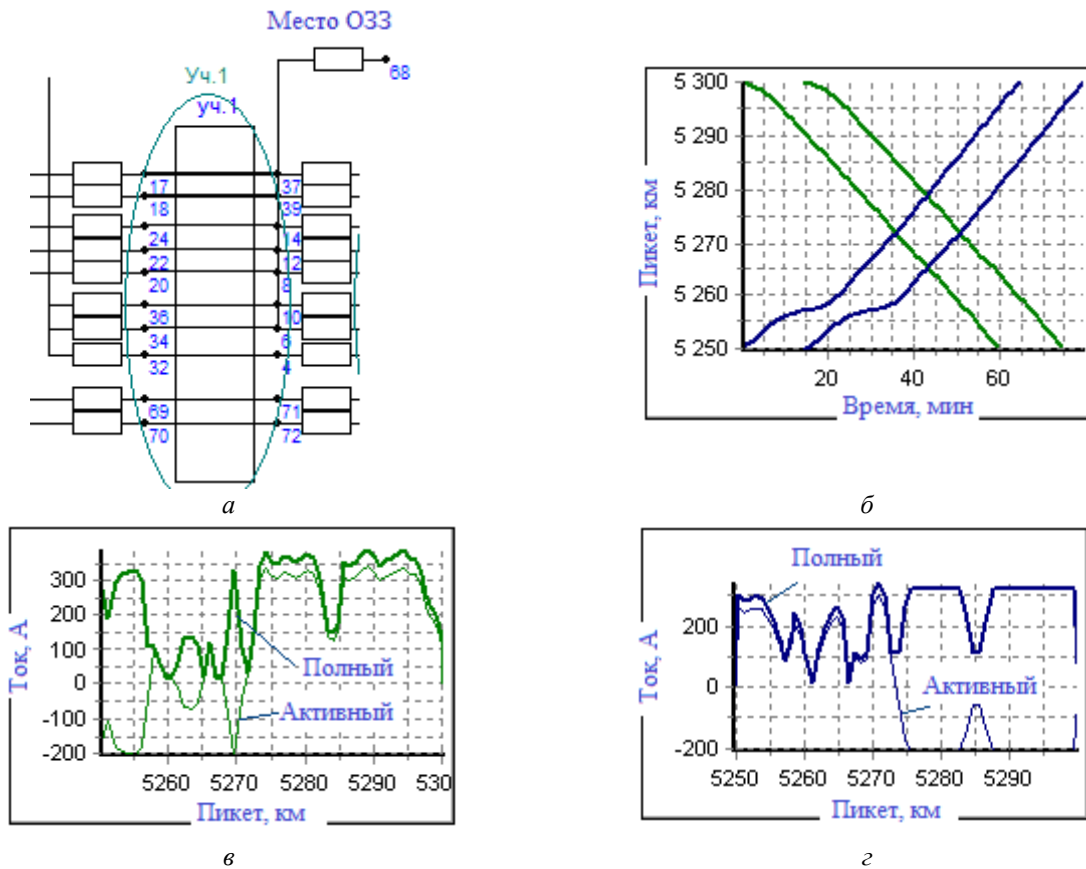


Рис. 2. Фрагмент расчетной схемы (а), график движения (б) и токовые профили поездов (в, г)
Fig. 2. Fragment of the calculation diagram (a), traffic graph (b) and current profiles of trains (c, d)

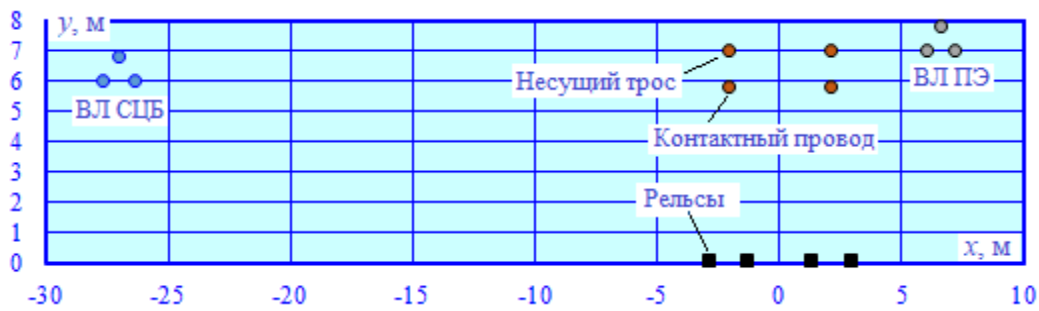


Рис. 3. Расположение токоведущих частей

Fig. 3. Location of live parts

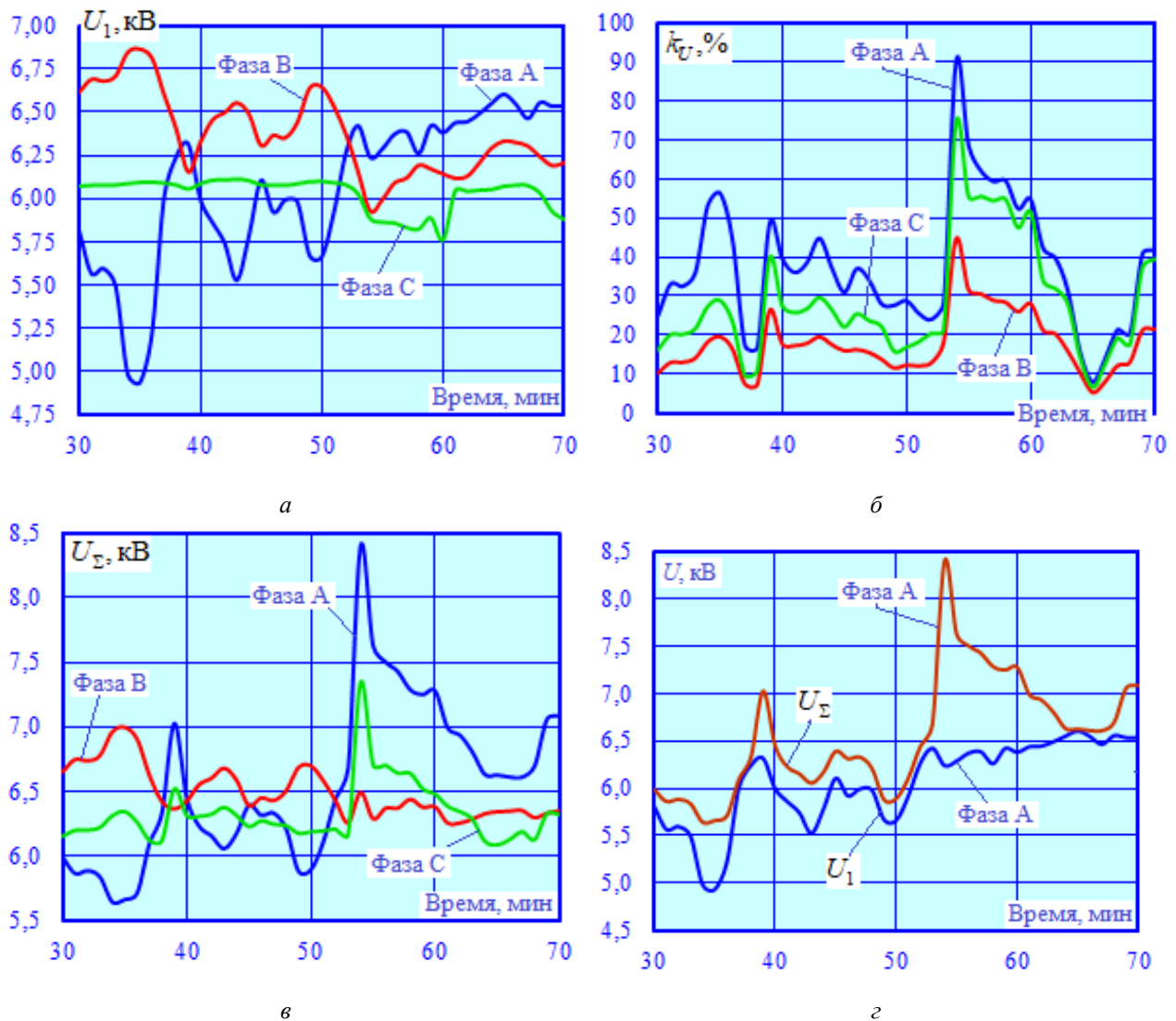


Рис. 4. Исходный (доаварийный) режим:

a – напряжения основной частоты; *б* – коэффициенты гармоник;
в – эффективные напряжения с учетом высших гармоник; *г* – сравнение U_1 и U_Σ

Fig. 4. Initial (pre-emergency) mode:

a – fundamental frequency voltage; *b* – harmonic coefficients;
c – effective voltages taking into account higher harmonics; *d* – comparison of U_1 and U_Σ

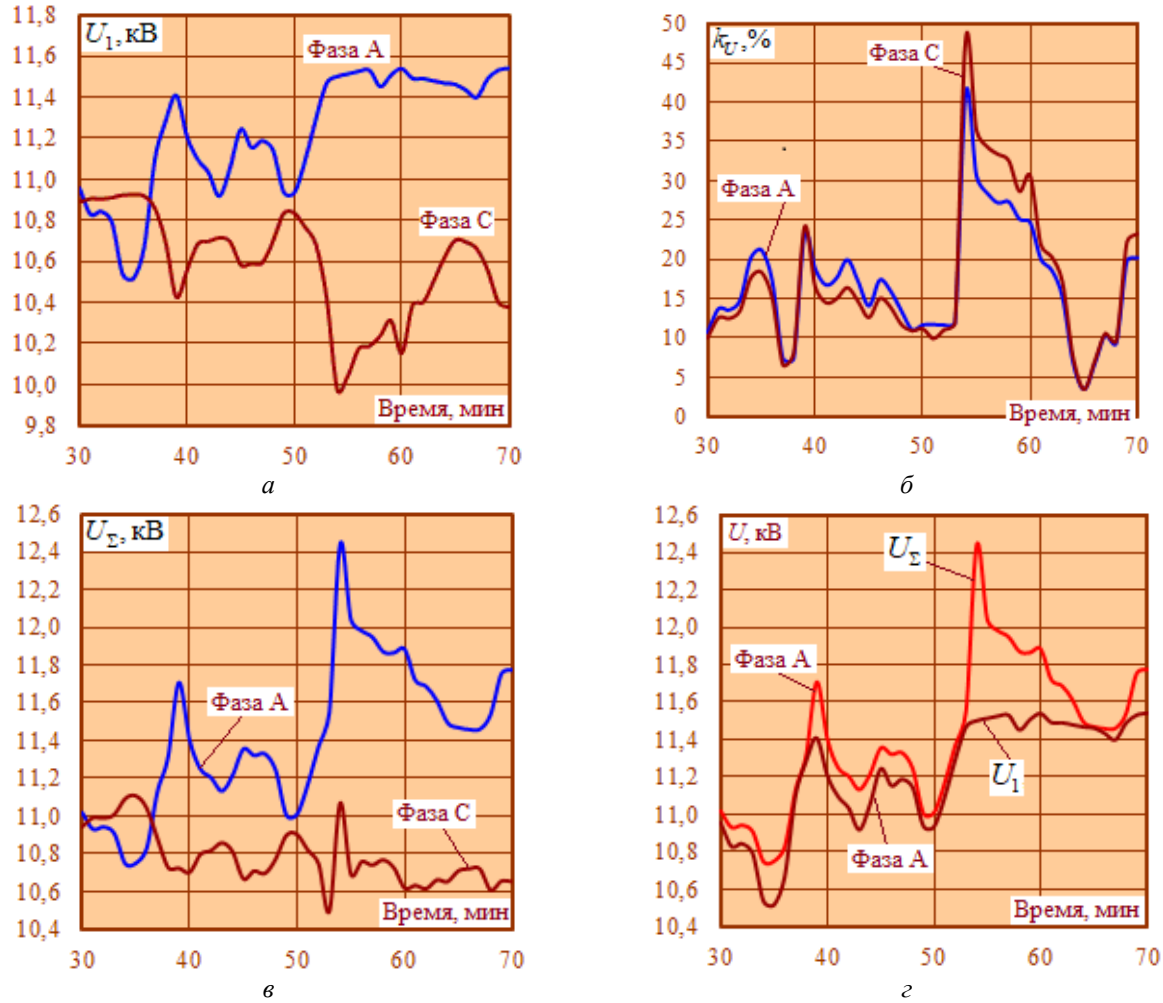


Рис. 5. Режим однофазных замыканий на землю:
 а – напряжения основной частоты; б – коэффициенты гармоник;
 в – эффективные напряжения с учетом высших гармоник; г – сравнение U_1 и U_Σ

Fig. 5. Single-phase earth fault mode:
 a – fundamental frequency voltage; b – harmonic coefficients;
 c – effective voltages taking into account higher harmonics; d – comparison of U_1 and U_Σ

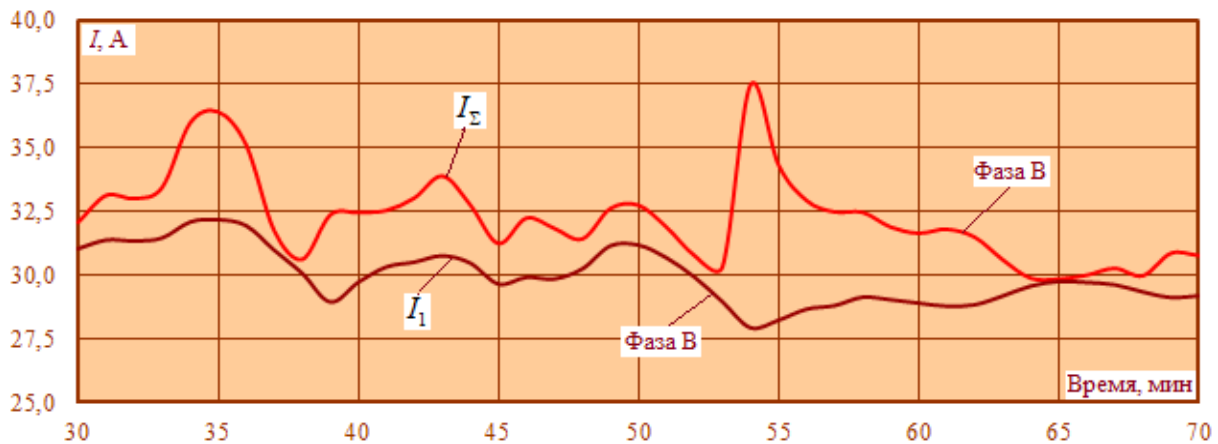


Рис. 6. Токи однофазных замыканий на землю
Fig. 6. Single-phase ground fault currents

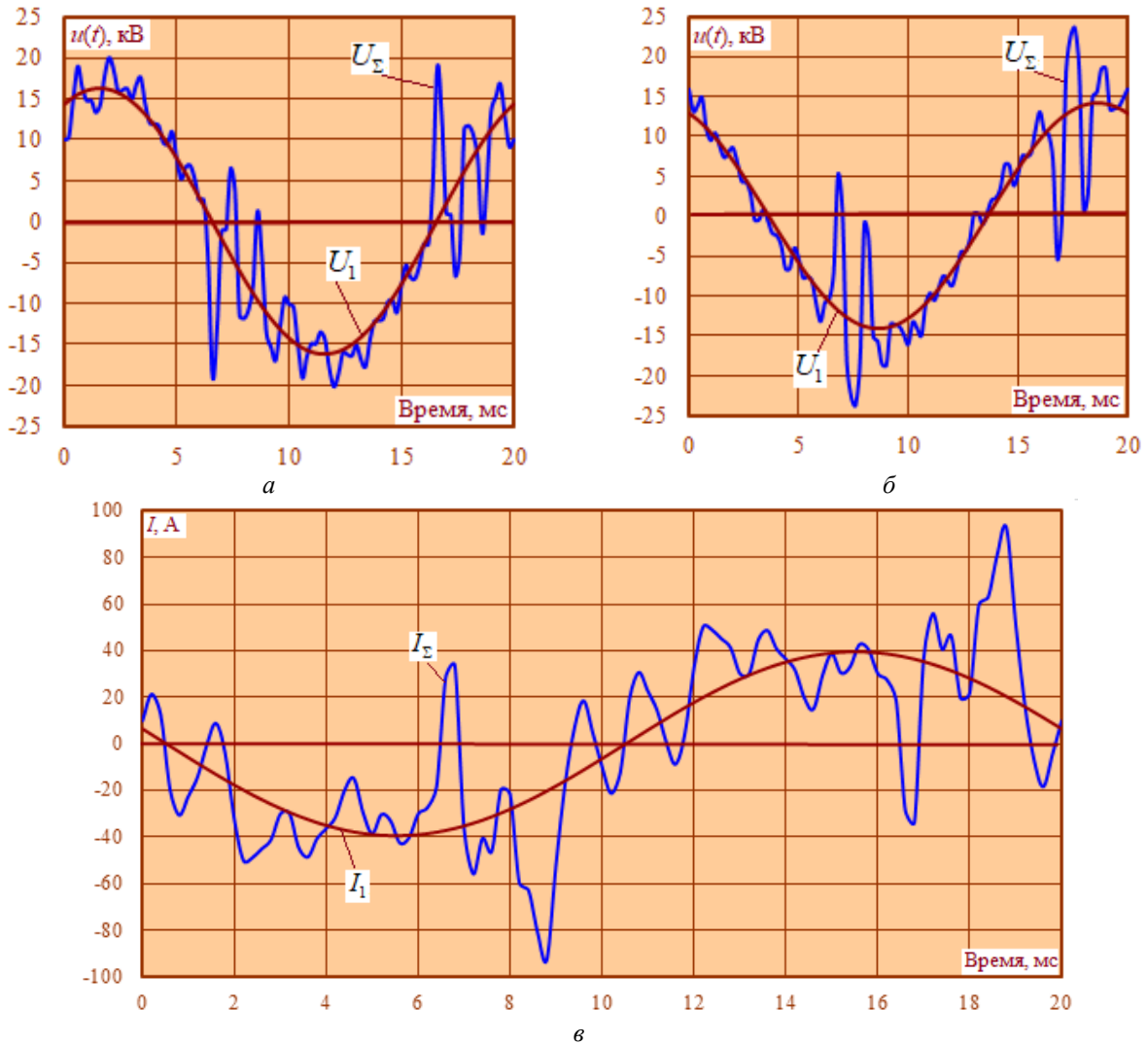


Рис. 7. Формы кривых напряжений неповрежденных фаз A (a) и C (b) в месте замыкания, токов однофазных замыканий на землю (c) на 54-й минуте моделирования

Fig. 7. Shapes of voltage curves of undamaged phases A (a) and C (b) at the fault point, single-phase ground fault currents (c) at the 54th minute of simulation

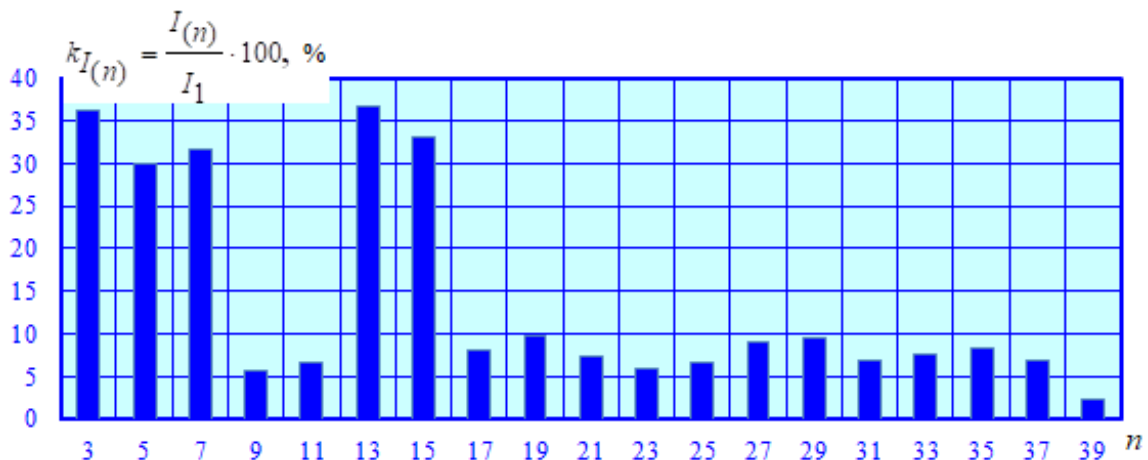


Рис. 8. Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения

Fig. 8. Spectral composition of single-phase ground fault current at the damage location

Влияние массы поезда на режим однофазных замыканий на землю

Для расчетной схемы (см. рис. 1) проведено моделирование движения четырех поездов при изменении массы от 6 300 до 14 200 т. Интервал попутного следования принимался рав-

ным 10 мин. Рассматривалось ОЗЗ фазы *B* для точки воздушной линии электроснабжения, расположенной на расстоянии 10 км от ТП1. Результаты расчетов приведены на рис. 9–12.

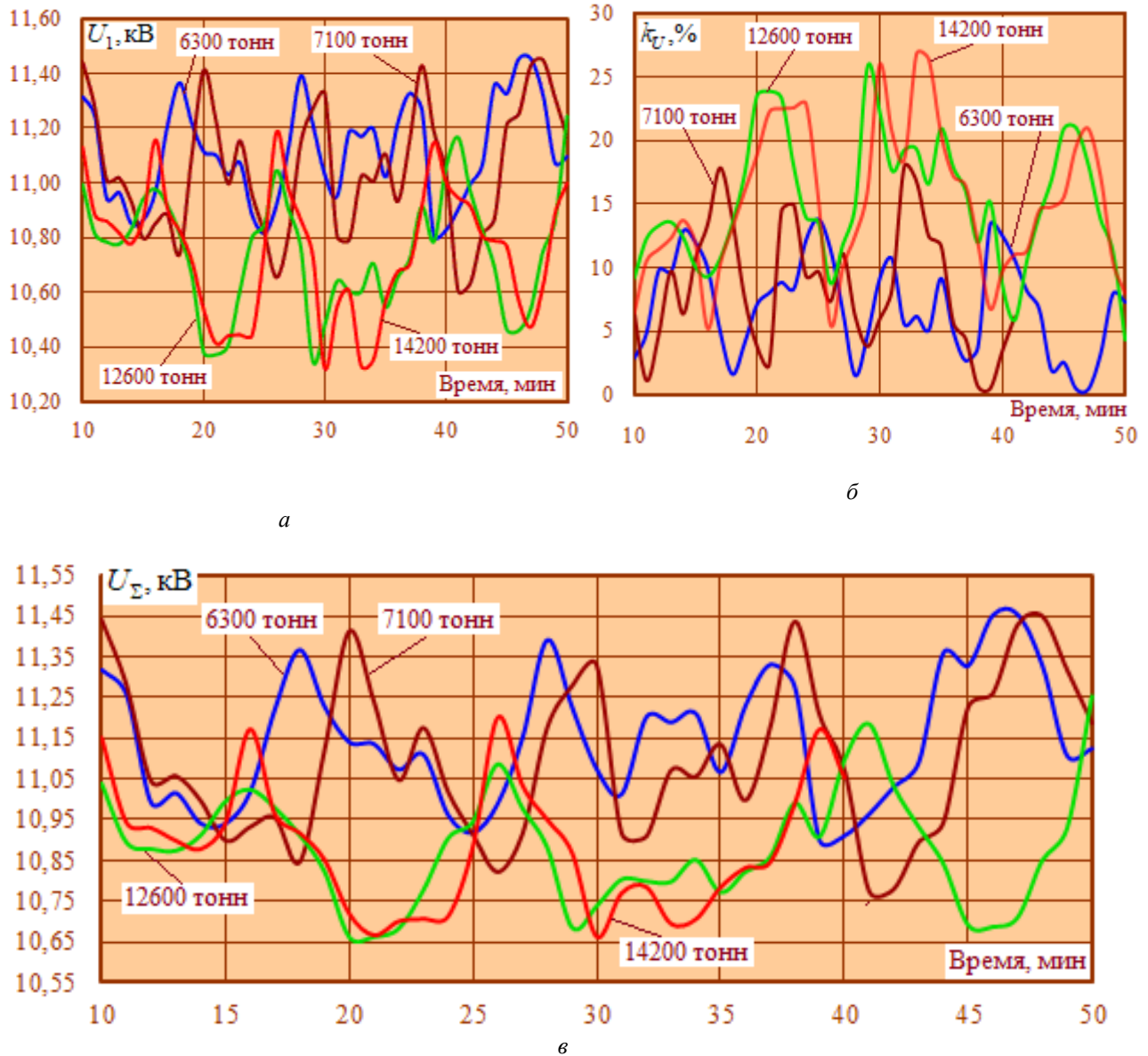


Рис. 9. Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник для фазы *A* при разных массах (в)

Fig. 9. Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (a), harmonic coefficients (b)

and effective voltages taking into account higher harmonics for phase *A* at different masses (c)

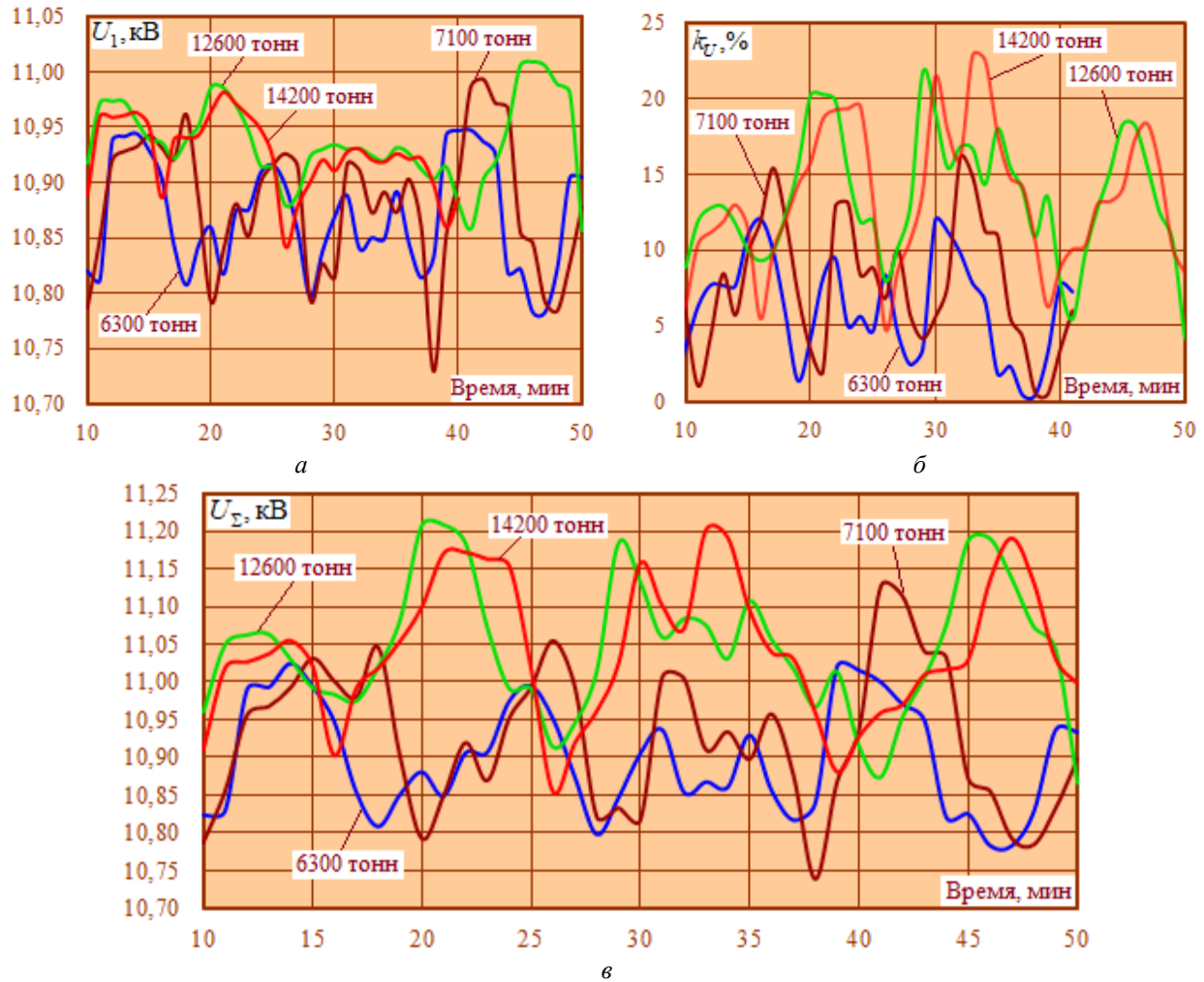


Рис. 10. Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник для фазы С при разных массах (в)

Fig. 10. Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (а), harmonic coefficients (б) and effective voltages taking into account higher harmonics for phase C at different masses (в)

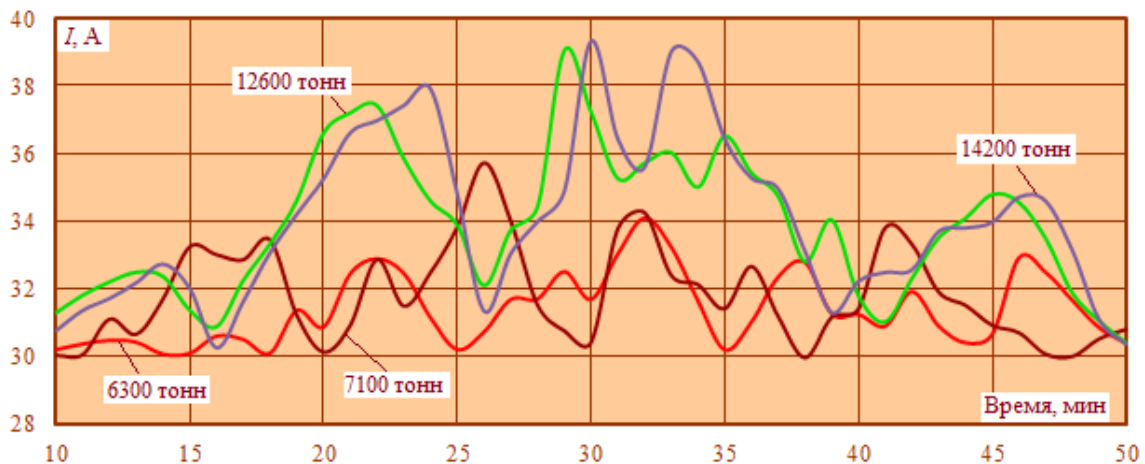


Рис. 11. Сравнение эффективных токов однофазных замыканий на землю при разных массах

Fig. 11. Comparison of effective currents of single-phase earth faults at different masses

С увеличением массы M максимумы коэффициентов k_U повышался с 14 до 27 % для фазы B и с 16 до 23 % – для C . Характер изменения токов ОЗЗ показан на рис. 11. С повышением M эффективный ток увеличивается с 34 до 39 А. На рис. 12. представлен спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения.

Наблюдается значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15, величина $k_{U(n)}$ для которых лежит в диапазоне 15–38 %. С ростом M амплитуда

всех ВГ также увеличивается. Причем наибольшее повышение (в 1,8–2 раза) характерно для гармоник с номерами 3, 5, 7, 13 и 15.

Влияние интервала движения на режим однофазных замыканий на землю

Проведен анализ режима ОЗЗ фазы B на 10 км от ТП 1 при изменении интервала движения t_D поездов с 8 до 20 мин. Результаты расчетов приведены на рис. 13–16.

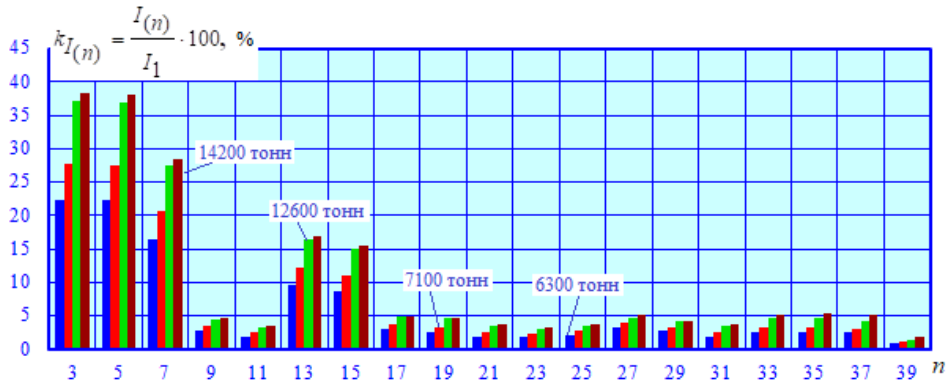


Рис. 12. Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения
Fig. 12. Spectral composition of single-phase ground fault current at the fault location

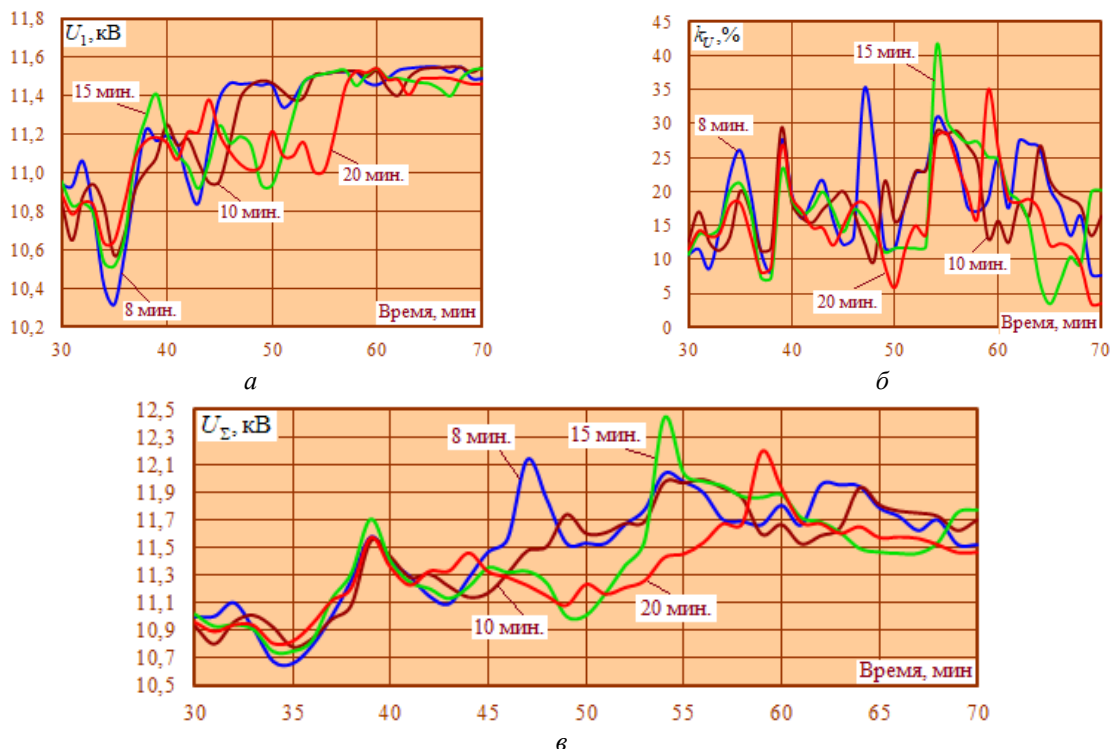


Рис. 13. Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник (в) для фазы А при разных интервалах

Fig. 13. Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (а), harmonic coefficients (б) and effective voltages taking into account higher harmonics (в) for phase A at different intervals

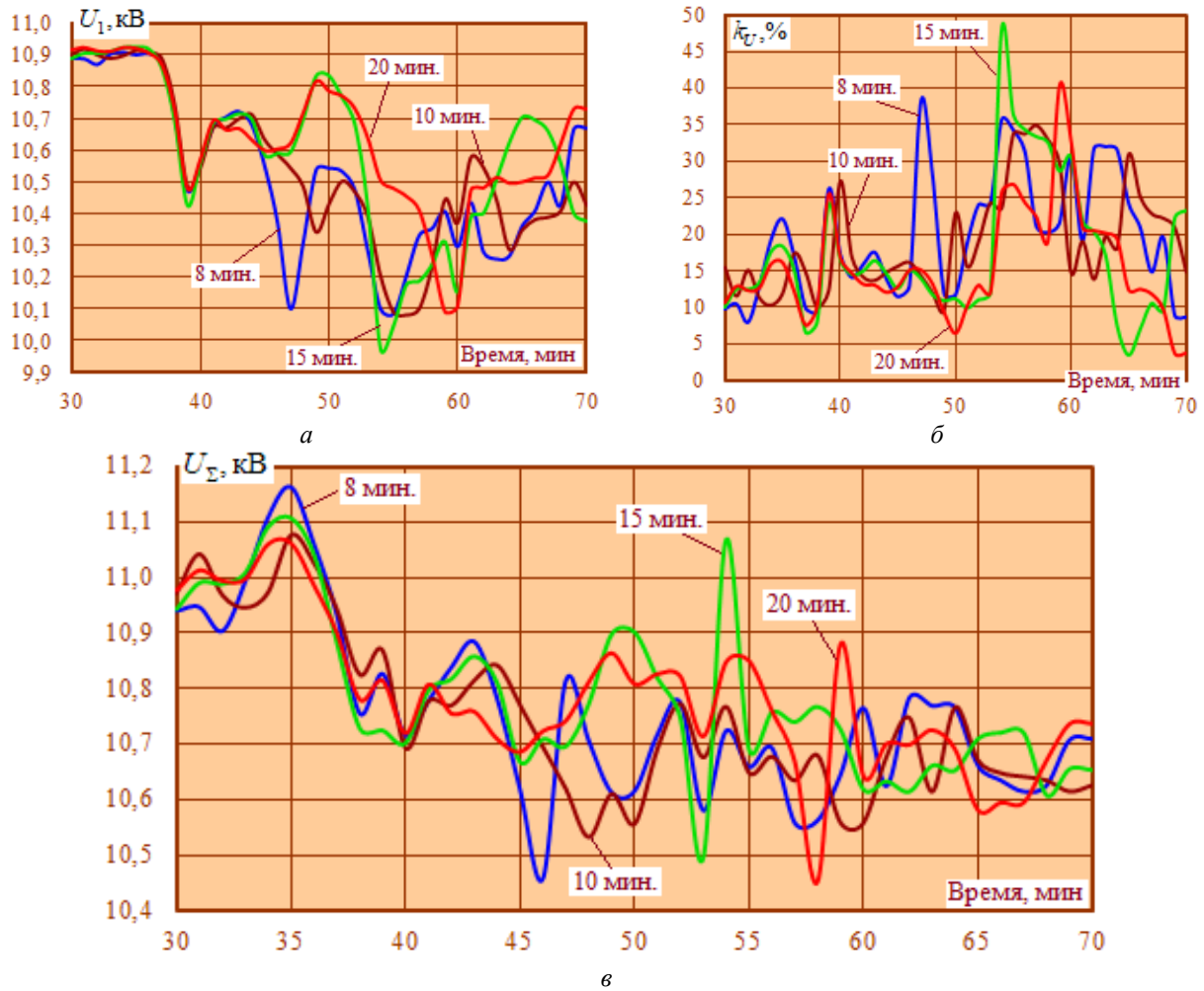


Рис. 14. Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник (в) для фазы С при разных интервалах

Fig. 14. Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (a), harmonic coefficients (b) and effective voltages taking into account higher harmonics (c) for phase C at different intervals

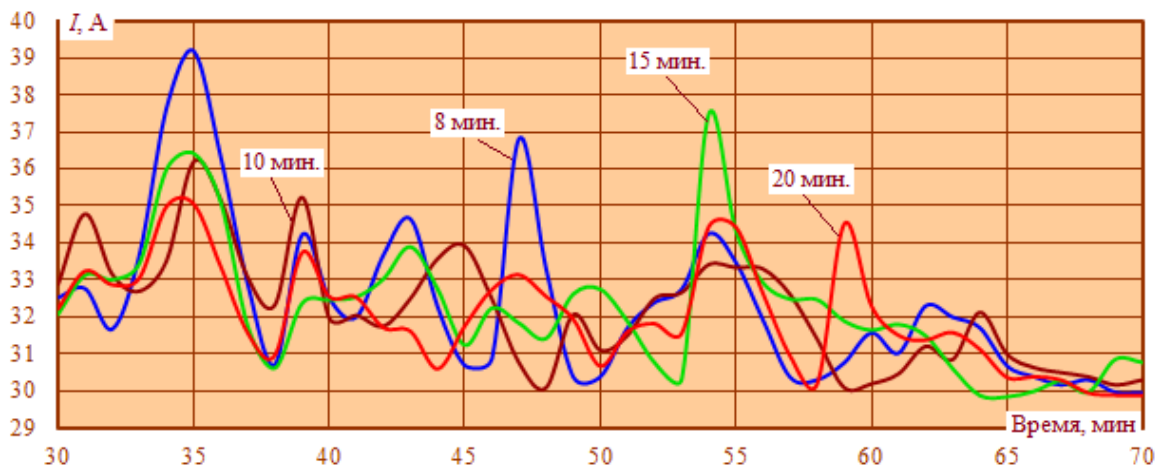


Рис. 15. Сравнение эффективных токов однофазных замыканий на землю при разных интервалах

Fig. 15. Comparison of effective currents of single-phase earth faults at different intervals

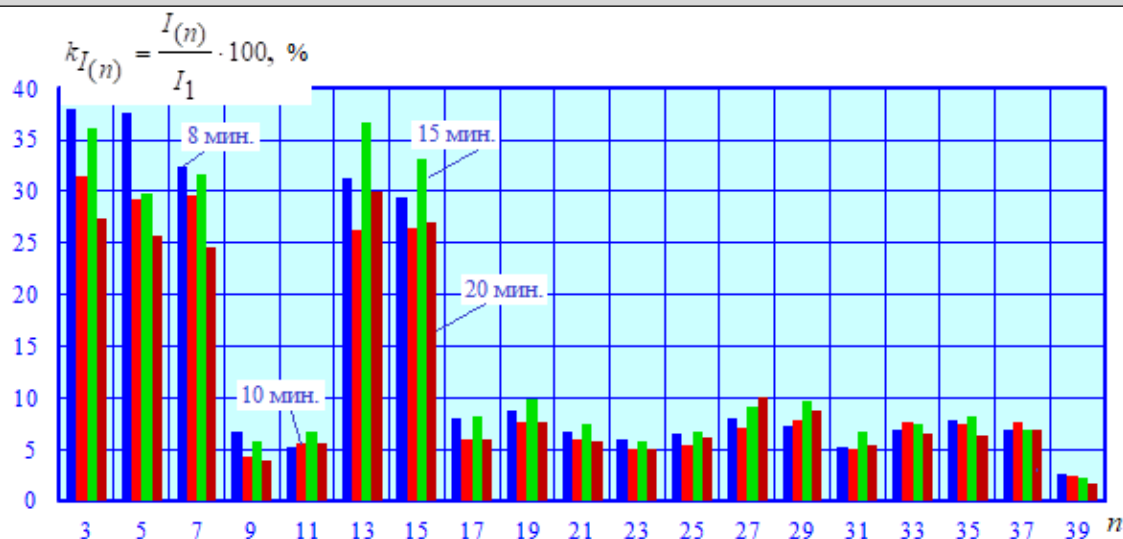


Рис. 16. Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения
 Fig. 16. Spectral composition of single-phase ground fault current at the fault location

Результаты моделирования при изменении интервала движения t_D показывают, что максимальное значение эффективного тока I_Σ (39,2 А) наблюдается при $t_D = 8$ мин. С увеличением t_D до 10 мин I_Σ уменьшается до 36,3 А. Однако при $t_D = 15$ мин I_Σ возрастает до 37,6 А. При $t_D = 20$ мин максимальное значение I_Σ равно 35,2 А.

В спектральном составе тока ОЗЗ (см. рис. 16) наблюдается значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15. Величина $k_{U(n)}$ для данных ВГ находится в пределах 24–38 %. Для ВГ с номерами 3, 5, 7, 9 и 39 $k_{U(n)}$ при $t_D = 8$ мин превышает все остальные значения.

Заключение

Цифровые модели, представленные в статье, позволяют получить полную информацию о режимах ОЗЗ на основной частоте и на частотах ВГ и могут найти практическое применение при решении задач настройки устройств, обеспечивающих идентификацию ОЗЗ, а также при разработке методов локализации мест ОЗЗ на ЛЭП, подверженных электромагнитным влияниям тяговых сетей.

Список литературы

1. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 99 с.
2. Оценка распределения токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью при помощи программного комплекса RASTRWIN / Е.В. Пьрьков, А.А. Цагикян, С.С. Ястребов и др. // Электроэнергетика глазами молодежи-2020 : Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Ставрополь, 2020. Т. 1. С. 287–290.
3. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase ground faults in compensated MV networks / K.J. Sagastabeitia, I. Zamora, A.J. Mazon et al. // IEEE Trans Power Delivery. 2011. Vol. 26, Iss. 4. P. 2251–2258. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2141155.
4. Разработка методов определения токов однофазного замыкания на землю и утечки в несимметричной сети с изолированной нейтралью / Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова и др. // Наука и техника Казахстана. №1. 2010. С. 18–20.
5. Утегулов Б.Б., Шинтемиров А.М. Математическое моделирование устройства автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–10 кВ // Наука и техника Казахстана. 2003. №2. С. 174–181.
6. Осипов Д.С., Долингер С.Ю., Сафонов Д.Г. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов // Омский научный вестник. № 4 (148). 2016. С. 79–84.
7. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems / L. Baowen, M. Hongzhong, X. Honghua et al. // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2019. Vol. 5. Iss. 1. P. 139–147. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.00740.
8. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries / K.J. Sagastabeitia, I. Zamora, A.J. Mazon et al. // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6. Iss. 12. P. 1252–1261. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0195.

9. Pandakov K, Høidalen H.K., Trætteberg S. An additional criterion for faulty feeder selection during ground faults in compensated distribution networks // *IEEE Trans on Power Delivery*. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 2930–2937. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2843528.
10. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning / Y.A.M. Alsumaidae, C.T. Yaw, S.P. Koh et al. // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 18. DOI: 10.3390/en15186762.
11. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach // *Journal of Engg Research on Line First Article*. 2021. DOI: 10.36909/jer.13627.
12. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems / M.-F. Guo, X.-D. Zeng, D.-Yu. Chen et al. // *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18. Iss. 3. P. 1291–1300. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
13. Single line-to-ground faulted line detection of distribution systems with resonant grounding based on feature fusion framework / D. Ying, L. Yadong, S. Qingzhu et al. // *IEEE Trans Power Delivery*. 2019. Vol. 34. Iss. 4. P. 1766–1775. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2922480.
14. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems / D. Ying, S. Qingzhu, L. Yadong et al. // *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. Perth, 2018. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535600.
15. M.-F. Guo, N.-C. Yang. 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. P. 97–108. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.014>.
16. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks / W. Xiaowei, W. Xiangxiang, Y. De-chang et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 114. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105391.
17. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems / K. Wei, J. Zhang, Y. He et al. // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 18. DOI: 10.3390/en13184724.
18. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy / L. Rui, Y. Nan-hua, G. Ming et al. // *2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*. Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
19. 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. P. 140–153. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 160 с.

References

1. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboichenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STsB [Power supply systems for signaling devices]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 99 p.
2. Per'kov E.V., Tsagikyan A.A., Yastrebov S.S., Efanov E.V. Otsenka raspredeleniya tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu pri pomoshchi programmnoogo kompleksa RASTRWIN [Assessment of the distribution of single-phase ground fault currents in networks with an isolated neutral using the RASTRWIN software package]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi-2020»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Electric power industry through the eyes of youth-2020»]. Stavropol', 2020, vol. 1, pp. 287–290.
3. Sagastabeitia K.J, Zamora I., Mazon A.J., Aginako Z., Buigues G. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase ground faults in compensated MV networks. *IEEE Trans Power Delivery*, 2011, vol. 26, iss. 4, pp. 2251–2258. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2141155.
4. Utegulov B.B., Utegulov A.B., Uakhitova A.B., Begentaev B.M. Razrabotka metodov opredeleniya tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu i utechki v nesimmetrichnoi seti s izolirovannoi neutral'yu [Development of methods for determining single-phase ground fault currents and leaks in an asymmetrical network with an isolated neutral]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and technology of Kazakhstan], 2010, no. 1, pp. 18–20.
5. Utegulov B.B., Shintemirov A.M. Matematicheskoe modelirovanie ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Mathematical modeling of a device for automatic detection of single-phase ground fault current in 6-10 kV electrical networks]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan], 2003, no. 2, pp. 174–181.
6. Osipov D.S., Dolinger S.Yu., Safonov D.G. Razrabotka algoritma avtomaticheskoi nastroiки kompensatsii emkostnykh tokov na osnove sushchestvuyushchikh metodov [Development of an algorithm for automatic adjustment of capacitive current compensation based on existing methods]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 4 (148), pp. 79–84.
7. Baowen L., Hongzhong M., Honghua X., Ping J. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 139–147. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.00740.
8. Sagastabeitia K.J, Zamora I., Mazon A.J., Aginako Z., Buigues G. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2012, vol. 6, iss. 12, pp. 1252–1261. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0195.

9. Pandakov K, Høidalen H.K., Trætteberg S. An additional criterion for faulty feeder selection during ground faults in compensated distribution networks. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2018, vol. 33, iss. 6, pp. 2930–2937. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2843528.
10. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P., Tiong S.K., Chen C.P., Kharudin A. 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.
11. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. *Journal of Engg Research on Line First Article*, 2021. DOI: 10.36909/jer.13627.
12. Guo M.-F., Zeng X.-D., Chen D.-Yu., Yang N.-C. 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.
13. Ying D., Yadong L., Qingzhu S., Lingen L., Jindun D., Gehao S. Single line-to-ground faulted line detection of distribution systems with resonant grounding based on feature fusion framework. *IEEE Trans Power Delivery*, 2019, vol. 34, iss. 4, pp. 1766–1775. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2922480.
14. Ying D., Qingzhu S., Yadong L., Gehao S., Xiuchen J. 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.
15. M.-F. Guo, N.-C. Yang. 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: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.014>.
16. Xiaowei W., Xiangxiang W., De-chang Y., Guobing S., Jie G., Yanfang W., Zhihui Z., Wang P. Fault feeder detection method utilizes 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.
17. Wei K, Zhang J, He Y, Yao G, Zhang Y. 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.
18. Rui L., Nan-hua Y., Ming G., Yi-dan S., Bin-bin Zh., Bing-kun X., Chun-xiang L. 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, pp. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
19. 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.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.
21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 160 p.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and_kryukov@mail.ru.
Овечкин Илья Сергеевич, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

Information about the authors

Andrei V. Kryukov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: and_kryukov@mail.ru.
Ilya S. Ovechkin, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: iliaov2015@mail.ru.