

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-94-100

Моделирование режимов обрыва нулевого провода в электрических сетях 0,4 кВ, питающихся от тяговых подстанций

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, И.С. Овечкин^{2c}, А.Д. Степанов^{2d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru, ^d irkutsk-energo@yandex.ru,^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-8140-0056>

Статья поступила 20.01.2025, принята 10.03.2025.

Представлены исследования, цель которых состояла в разработке цифровых моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ), позволяющих адекватно определять параметры аварийного режима, вызванного обрывом нулевого провода на линии 0,4 кВ. Рассматривалось два варианта ее подключения к источнику электроэнергии (ЭЭ). В первом она присоединялась к шинам подстанции (ПС), получающей питание от ЛЭП «два провода-рельс» (ДПР) 27,5 кВ, а во втором – от ЛЭП 6 кВ, предназначенной для электроснабжения устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Провода ЛЭП ДПР монтировались на опорах контактной сети (КС), а для линии СЦБ использовались отдельные опоры. При реализации моделей применялся программный продукт Fazonord, версия 5.3.3.0-2024. Кроме обозначенных ЛЭП моделируемая СТЭ включала следующие элементы: тринадцать ЛЭП 220 кВ, пять тяговых подстанций (ТП) с трансформаторами 40000 кВ·А, КС 25 кВ с двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити. Нагрузки создавались движением двух поездов массой 3192 т в нечетном направлении и такого же числа составов весом 4192 т – в четном. Разработанные цифровые модели обеспечивали корректный учет факторов, влияющих на режимы, включая трехфазно-однофазную структуру СТЭ и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети (ТС). В отличие от известных подходов осуществлялось моделирование динамики изменений этих влияний, вызванных вариациями нагрузок при движении поездов. Показано, что представленная методика позволила адекватно определять режимы обрыва нулевого провода в ЛЭП 0,4 кВ и разрабатывать мероприятия для повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей. Она применима для ЛЭП и ТС любой конструкции и может использоваться на практике при определении аварийных режимов и настройке устройств защиты от этих видов повреждений.

Ключевые слова: технологические ЛЭП железнодорожного транспорта; обрыв нулевого провода; цифровые модели; моделирование.

Modeling of zero wire breakage modes in electric networks powered by traction substations

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, I.S. Ovechkin^{2c}, A.D. Stepanov^{2d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru, ^d irkutsk-energo@yandex.ru,^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-8140-0056>

Received 20.01.2025, accepted 10.03. 2025.

The article presents studies aimed at developing digital models of traction power supply systems that allow adequately determining the parameters of an emergency mode caused by a break in the neutral wire on a 0.4 kV line. Two options for connecting it to a power source are considered. In the first case, it is connected to the substation buses powered by a 27.5 kV two-wire-rail power line, and in the second case, by a 6 kV power line designed to supply power to signaling, centralization, and blocking devices (SCB). The wires of the first power line are mounted on contact network supports, and separate supports are used for the second line. The Fazonord software product, version 5.3.3.0-2024, is used to implement the models. In addition to the designated power transmission lines, the simulated system includes the following elements: thirteen 220 kV power transmission lines, five traction substations with 40,000 kVA transformers, a 25 kV cable system with two contact suspensions, and four rail threads. The loads are created by the movement of two 3,192-ton trains in the odd direction and the same number of 4,192-ton trains in the even direction. The developed digital models provide for the correct consideration of the factors influencing the modes, including the three-phase-single-phase structure of the power supply system

and increased electromagnetic influences of the traction network. Unlike known approaches, the dynamics of changes in these influences caused by load variations during train movement is simulated. It is shown that the presented methodology makes it possible to adequately determine the neutral wire break modes in 0.4 kV power transmission lines and develop measures to improve the reliability of power supply to critical consumers. It is applicable to power transmission lines and traction networks of any design and can be used in practice to determine emergency modes and configure protection devices against these types of damage.

Keywords: technological power transmission lines of railway transport; breakage of neutral wire; digital models; modeling.

Введение. Обрыв нулевого проводника в распределительных сетях низкого напряжения может создавать серьезные проблемы для электроприемников и обслуживающего персонала. Поэтому разработка методов их решения имеет повышенную актуальность [1–5].

Так, например, в [6] предложен комплексный метод идентификации аварийных режимов, базирующийся на использовании токов и напряжений последовательности и применимый в задачах эксплуатации электрических сетей. В [7] решена важная задача повышения безопасности персонала при обрывах фазного и нулевого проводов (НП) воздушных линий (ВЛ) 380 В. Микропроцессорный счетчик электроэнергии, размещенный в конце ВЛ, дополняется функциями, позволяющими определять обрывы и формировать команды на срабатывание автоматического выключателя, установленного в начале ЛЭП. В [8] предлагается применить детальный учет нелинейных вольт-амперных характеристик для анализа несимметричных и несинусоидальных режимов внешней электрической сети. Показано, что требуется производить учет высших гармоник (ВГ) тока нулевой последовательности. Также разработан алгоритм расчета ВГ тока НП для определения температуры нагрева. В [9] представлена методология поиска обрывов НП на основе искусственного интеллекта. Предложено множество устройств, защищенных патентами, для обнаружения обрыва нейтрали [10]. Они могут устанавливаться в конце фидера или на клеммах нагрузки. Однако такие решения требуют значительных затрат из-за необходимости размещения средств защиты на каждой ЛЭП 0,4 кВ. В [10] предлагают использовать одно устройство, расположенное в головной части сети. Его работа основана на оценке тока 3-й гармоники, которая существенно изменяется при возникновении обрыва нейтрали. Это предложение было проверено экспериментально в [11]. В [12] приведены логические признаки, которые можно использовать для выявления повреждений НП в ВЛ и определения значения информационных параметров.

Задача идентификации обрывов НП тесно связана с определением несимметричных и несинусоидальных режимов. Методы решения этих задач описаны в [13–16]. Проблемы качества ЭЭ в железнодорожных электросетях рассмотрены в [17–20]. В [21] экспериментально изучено влияние несинусоидальных напряжений и токов на работоспособность реле пониженной частоты и максимального тока. В [22] представлен новый метод измерения спектра периодических сигналов, основанный на дискретном преобразовании Фурье, который может быть использован при исследовании качества ЭЭ. Применять метод конечных элементов для анализа скачков напряжения предложено в [23]. В [24] представлен нечеткий подход к оптимальному размещению стационарных конденсаторных батарей, обеспечивающих подавление ВГ напряжения и тока. В [25] описаны эффективные методы анализа гармонических взаимодействий в электрических сетях.

Анализ рассмотренных публикаций дает возможность сделать вывод о том, что в них описаны подходы к решению задач, связанных с определением параметров режимов, возникающих при обрывах НП в низковольтных электрических сетях. Однако проблема моделирования таких режимов для ЛЭП, питающихся от железнодорожных подстанций, подключенных к ВЛ, расположенных в зонах повышенного электромагнитного влияния ТС, остается нерешенной. Для ее решения можно использовать подход, предложенный в [26, 27] и реализованный в промышленном комплексе программ Fazonord AC-DC.

Линия ДПР. Моделируемая система электроснабжения (рис. 1) участка железной дороги содержит следующие элементы: двухцепные ЛЭП 220 кВ, выполненные проводами марки АС-400; пять ТП и четыре участка ТС. Помимо этого, в первой межподстанционной зоне учтены технологические ЛЭП ДПР 27,5 кВ и ВЛ СЦБ 6 кВ, обеспечивающие электроснабжение нетяговых потребителей.

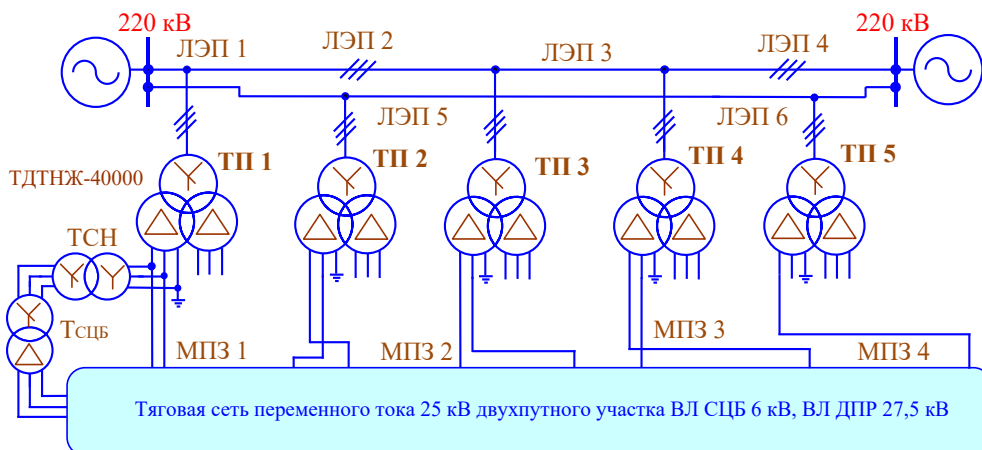


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Два провода линии ДПР марки АС-35 располагались на опорах КС с полевой стороны. В качестве третьей токоведущей части использовались рельсы. Линия СЦБ предполагалась смонтированной на опорах, расположенных в полосе землеотвода для железной дороги.

Моделировалось движение грузовых составов весом 3192 и 4192 т. На 20 км располагался трансформатор

марки ТМ-250/27,5/0,4. От него питалась линия 0,4 кВ, в конце которой подключались нагрузки 12 кВт на фазы А и С, а на фазу В – 6 кВт. Поперечное сечение ТС показано на рис. 2. Результаты вычислений представлены на рис. 3, 4.



Рис. 2. Расположение токоведущих частей

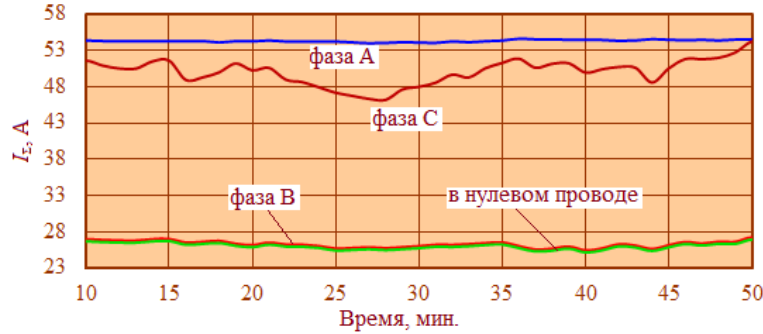


Рис. 3. Эффективные токи для исходного режима: $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_i / 100)^2}$, k_i – суммарный коэффициент гармоник тока

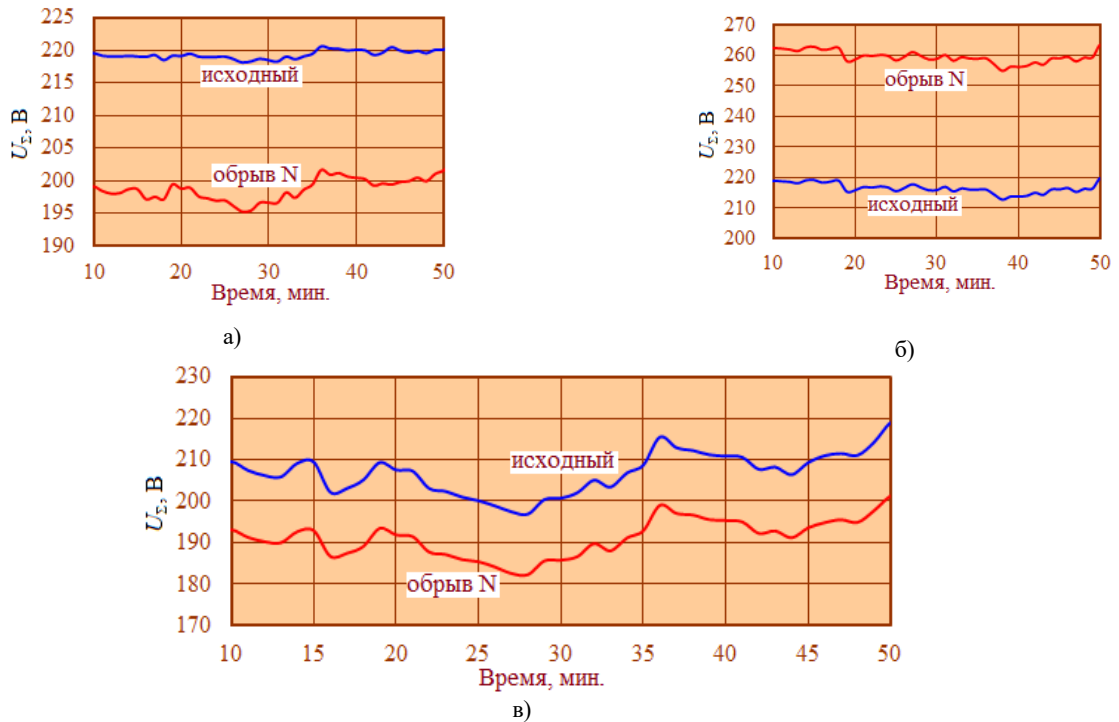


Рис. 4. Эффективные напряжения исходного режима и обрыва НП для фазы А (а), В (б) и С (в): $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$, k_U – суммарный коэффициент гармоник напряжения

На рис. 3 изображены зависимости $I_{\Sigma}(t)$ для исходного режима. Из них видно, что из-за одинаковых нагрузок токи фаз А и С близки по величине и максимально отличаются на 9 ампер вследствие разных потенциалов (рис. 4). Ток в фазе В практически совпадает с аналогичным параметром для НП.

Для исходного режима коэффициент вариации эффективной величины U_{Σ} фазы А с учетом ВГ равен 0,34 %, размах колебаний – 3 В. При обрыве НП наибольшее значение U_{Σ} фаз А и С снижается до 203 и 204 В соответственно, а для фазы В увеличивается до 265 В, что может привести к повреждению подключенного оборудования. В результате влияния ТС в исходном режиме имели место заметные колебания U_{Σ} ; при этом по фазе С коэффициент вариации достигает

$\gamma = 34 \%$, а размах $\kappa = 24$ В. Зафиксированы гармонические искажения напряжений в узлах присоединения нагрузок: $\max(k_U)$ по фазе А равен 4,7 %, а по фазам В и С – 30 и 34 % соответственно. При обрыве НП k_U уменьшается незначительно.

Воздушная линия СЦБ. Результаты моделирования исходного и аварийного режимов при питании нетяговых потребителей по ВЛ СЦБ приведены на рис. 5, 6. На 20 км к ВЛ СЦБ подключался трансформатор ТМ-63/6/0,4. К шинам 0,4 кВ КТП присоединялась ВЛ с нагрузкой 9 кВт на фазы А, С и 4,5 кВт на фазу В. Особенностью данного варианта питания нетяговых потребителей является то, что токоведущая часть, отвечающая фазе С КТП, которая в случае ЛЭП ДПР подключалась к рельсам, присоединяется к третьему проводу ВЛ СЦБ.

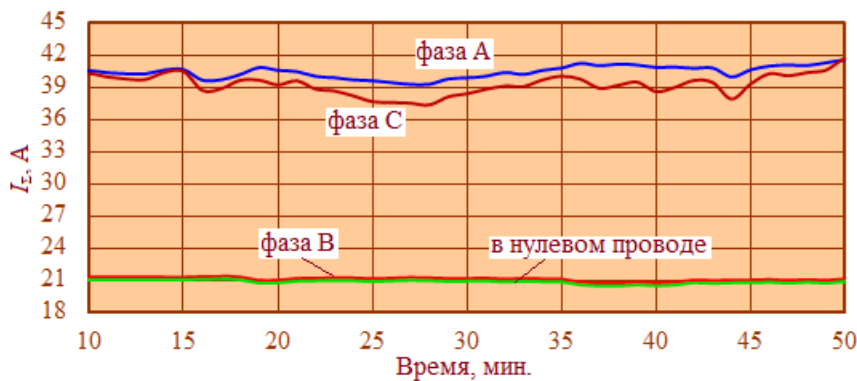


Рис. 5. Эффективные токи исходного режима

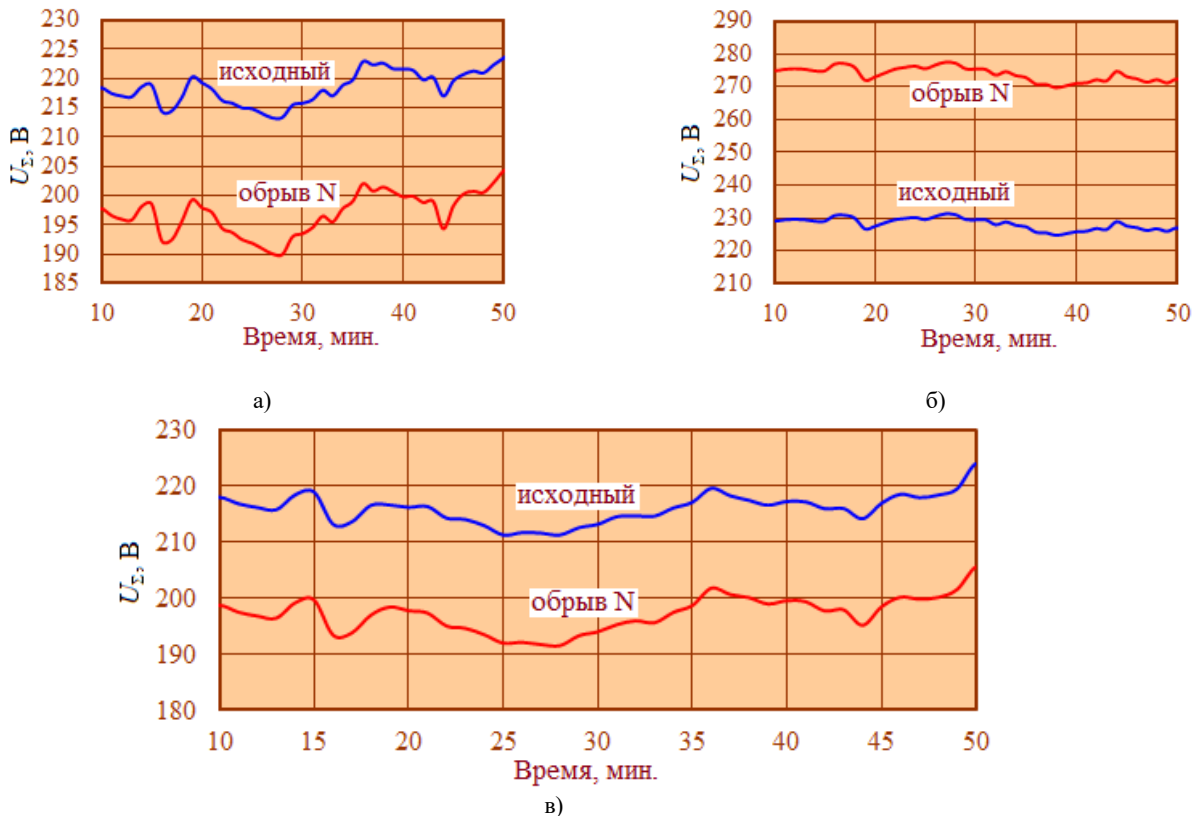


Рис. 6. Эффективные напряжения исходного и аварийного режимов для фазы А (а), В (б) и С (в)

Полученные результаты показывают, что для исходного состояния системы коэффициент вариации эффективной величины напряжения фазы А с учетом ВГ $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ достигает 1,5 %, размах колебаний – 12 В. Для аварийного режима имеют место заметные колебания $U_{\Sigma}(t)$; по фазе А $\gamma = 2,2$ %, а $\kappa = 16$ В.

На рис. 5 изображены зависимости эффективного значения I_{Σ} с учетом ВГ для исходного режима. Из них видно, что токи фазы В и НП практически не отличаются. Ток в нулевом проводе в 1,8...2 раз меньше, чем токи фаз А и С. При обрыве НП максимальная величина k_U для фаз А, В и С снижается и принимает значения 14; 17 и 33 % соответственно. Из рис. 5 видно, что при обрыве НП эффективное напряжение отличается резкопеременным характером; при этом имеют место заметные по-

вышения $U_{\Sigma}(t)$, которые достигают 278 В по фазе В, по фазам А и С снижение до 205 и 204 В.

На рис. 7 представлена временная зависимость эффективного значения напряжения смещения нейтрали для аварийного режима, при питании нагрузки от КТП СЦБ и КТП ДПР. Зависимость $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ при питании от КТП СЦБ достигает максимального значения 46 В и имеет размах 1,4 В. Наибольшее отличие $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ первого и второго варианта питания нагрузки составляет 3,8 В. При этом для ВЛ СЦБ размах равен 1,6 В.

На рис. 8 и 9 представлены зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям для двух рассматриваемых режимов.

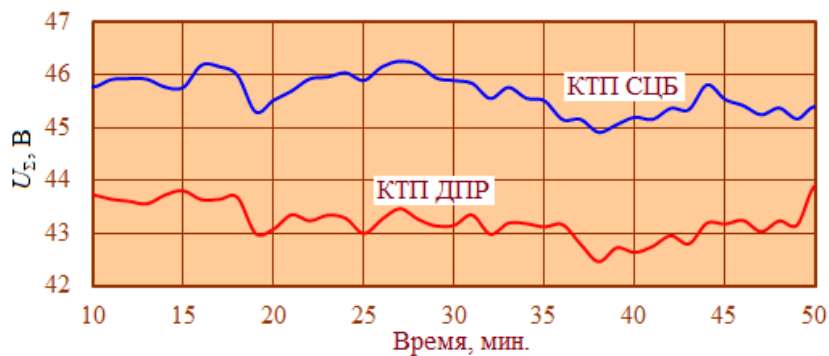


Рис. 7. Эффективные напряжения смещения нейтрали для аварийного режима

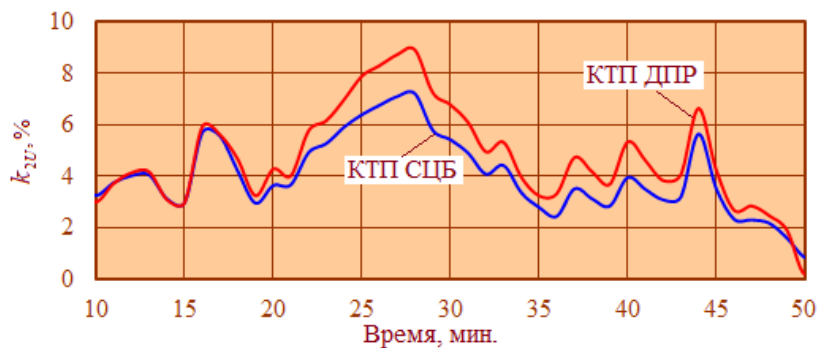


Рис. 8. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности для исходного режима

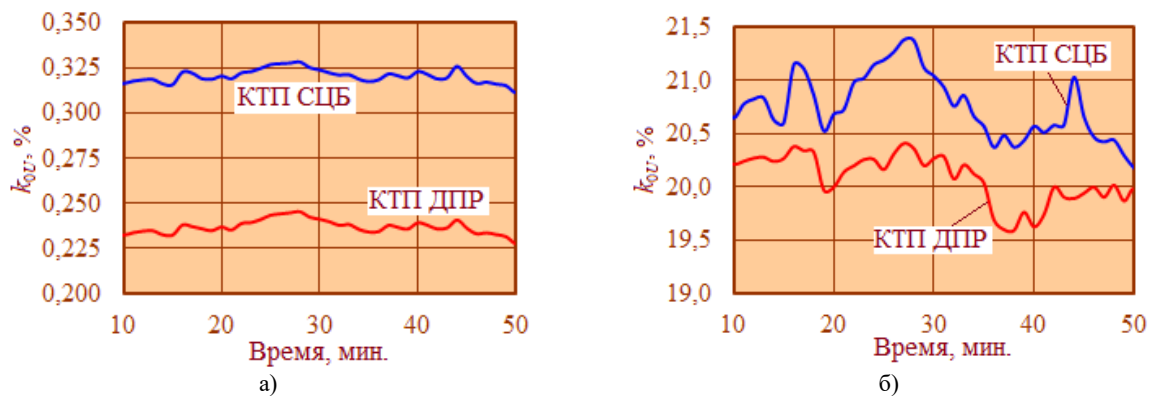


Рис. 9. Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности: а – исходный режим; б – обрыв нулевого провода

При обрыве НП на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ и ДПР, значение k_{2U} не изменяется. Максимум k_{0U} КТП СЦБ при обрыве НП увеличивается в 65 раз (с 0,33 до 21 %), вариация k_{0U} равна 1,75 %. Для КТП ДПР максимальное значение k_{0U} увеличивается в 83 раза до 20 %, а коэффициент вариации k_{0U} равен 1,1 %.

Заключение. В статье приведена методика, на основании которой разработаны компьютерные модели, позволяющие корректно определять нормальные и аварийные режимы ЛЭП 0,4 кВ, а также адекватно учитывать электромагнитное влияние ТС с учетом высших

гармоник и находить величины перенапряжений в месте подключения потребителей.

Представленная методика универсальна и применима для ТС любой конструкции. Разработки, описанные в статье, могут быть использованы на практике для проведения расчетов режимов, настройки устройств релейной защиты и автоматики.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

- Mashangu H. Xivambu, Impact of floating neutral in distribution systems // 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 21-24, May 2007.
- Halevidis C.D., Koufakis E.I. Power flow in PME distribution systems during an open neutral condition // IEEE Trans. Power Syst. 2013. Vol. 28, № 2. P. 1083-1092.
- Syllas Frantzeskakis, et al. Loss of neutral in low voltage electrical installation with connected DG units – consequences and solutions, in: 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Madrid, 3-6 June 2019. P. 833.
- Wang J., Yang Q., Sima W., Yuan T., Zahn M. A smart over-voltage online monitoring and identification system. Energies. 2011. № 4. P. 599–615.
- Zhang W.B., He J.L. Power System Over-Voltage Protection and Insulation Coordination. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2002. P. 213–217.
- Chen L., Yang Q., Wang J., Sima W., Yuan T. Classification of fundamental ferroresonance, single phase-to-ground and wire breakage over-voltages in isolated neutral networks // Energies. 2011. Т. 4, № 9. С. 1301-1320.
- Ershov A.M., Filatov O.V., Mlotok A.V. System for Protecting 380 V Power Grid From Overhead Line Breaks // Power Technol Eng. 2016. № 50. P. 442–446.
- Dzhuraev S., Berjozkina S., Kamolov M., Safaraliev M., Zicmane I., Nazirov K., Sulonov S. Computation of the Zero-Wire Current under an Asymmetric Nonlinear Load in a Distribution Network // Energy Reports. 2022. Vol. 8, № 8. P. 563-573. ISSN 2352-4847.
- Carmona-Pardo R., Rodríguez del Nozal A. Esther Romero-Ramos A neural network-based classifier for identifying and locating neutral wire breaks in low voltage distribution networks // Electric Power Systems. Research. 2024. Vol. 234. P. 110707.
- Yong J., Zhou C., Yang B., Wang X. A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems, in: 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012. P. 53-58.
- Jiang L., Yong J. Validation of the harmonic-based method for detecting open-neutral fault in low-voltage systems // IEEE Trans. Ind. Appl. 2018. Vol. 54, № 4. P. 3145-3152.
- Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Logical signs characterizing modes breaks phase and neutrals wires of overhead line of 380 V electrical network // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). P. 1-6
- Jenkins N. Voltage quality in electrical power systems // Power Engineering Journ. 2002. Vol. 16, № 5. P. 239-239.
- Kusko A., Thompson M.T. Power quality in electrical systems. New York: McGraw-Hill Education, 2007. С. 223.
- Bollen M., Beyer Y., Styvactakis E., Trhulj J., Vailati R., Friedl W. A European benchmarking of voltage quality regulation // Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 15th International Conference on. IEEE. 2012. С. 45-52.
- Mousavi S.M., Masoum A.S., Fuchs E.F. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines: Second Edition. 2015. 1123 p.
- Mousavi S.M., Gazafrudi A., Tabakhpour Langerudy E., Fuchs F., Al-Haddad K. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62, № 5. P. 3081-3090.
- Pande N., Ohnishi W., Koseki T.. Analysis of voltage unbalance and mitigation of circulating power in bilateral co-phase traction system // Electric Power Systems Research. 2024. Vol. 228. P. 110048.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Качество электроэнергии в линиях ДПР // Наука и техника транспорта. 2008. № 3. С. 60-64.
- Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиену. Уменьшение несимметрии и гармонических искажений на подстанциях, подключенных к линиям электропередачи 25 кВ, использующим рельсы в качестве тоководущей части // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 58-65.
- Fuller J.F., Fuchs E.F., Roesler D.J. Influence of harmonics on power system distribution protection // IEEE Trans Power Deliv. 1988. Vol. PWRD-3(2). P. 546-54.
- Asnin L., Backmutsky V. A new numeric technique of accurate frequency and harmonics estimation for power system protection and power quality applications // 10th Internat. Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings. 2002. Vol.1, cat. № 02EX630. P. 82-85.
- Zhang J.H., Shi Y.H., Liu G.X., Hogg B.W. Simulation of transmission line galloping using finite element method // 1993 2nd Internat. Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93. 1993. Vol. 2. P. 644-648.
- Masoum A.S., Jafarian A., Ladjevardi M., Fuchs E.F., Grady W.M. Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19, № 2. P. 822-829.
- Arrillaga J., Smith B.C, Watson N.R, Wood A.R. Power systems harmonic analysis. Hoboken: John Wiley & Sons, 1997. P. 384.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2005. 273 с.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.

References

- Mashangu H. Xivambu, Impact of floating neutral in distribution systems // 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 21-24, May 2007.

2. Halevidis C.D., Koufakis E.I. Power flow in PME distribution systems during an open neutral condition // *IEEE Trans. Power Syst.* 2013. Vol. 28, № 2. P. 1083-1092.
3. Syllas Frantzeskakis, et al. Loss of neutral in low voltage electrical installation with connected DG units – consequences and solutions, in: 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Madrid, 3-6 June 2019. P. 833.
4. Wang J., Yang Q., Sima W., Yuan T., Zahn M. A smart over-voltage online monitoring and identification system. *Energies*. 2011. № 4. P. 599–615.
5. Zhang W.B., He J.L. *Power System Over-Voltage Protection and Insulation Coordination*. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2002. P. 213–217.
6. Chen L., Yang Q., Wang J., Sima W., Yuan T. Classification of fundamental ferroresonance, single phase-to-ground and wire breakage over-voltages in isolated neutral networks // *Energies*. 2011. T. 4, № 9. C. 1301-1320.
7. Ershov A.M., Filatov O.V., Mlotok A.V. System for Protecting 380 V Power Grid From Overhead Line Breaks // *Power Technol Eng*. 2016. № 50. P. 442–446.
8. Dzhuraev S., Berjozkina S., Kamolov M., Safaraliev M., Zicmane I., Nazirov K., Sulstonov S. Computation of the Zero-Wire Current under an Asymmetric Nonlinear Load in a Distribution Network // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, №. 8. P. 563-573. ISSN 2352-4847.
9. Carmona-Pardo R., Rodríguez del Nozal A. Esther Romero-Ramos A neural network-based classifier for identifying and locating neutral wire breaks in low voltage distribution networks // *Electric Power Systems. Research*. 2024. Vol. 234. P. 110707.
10. Yong J., Zhou C., Yang B., Wang X. A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems, in: 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012. P. 53-58.
11. Jiang L., Yong J. Validation of the harmonic-based method for detecting open-neutral fault in low-voltage systems // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018. Vol. 54, № 4. P. 3145-3152.
12. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Logical signs characterizing modes breaks phase and neutrals wires of overhead line of 380 V electrical network // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). P. 1-6
13. Jenkins N. Voltage quality in electrical power systems // *Power Engineering Journ.* 2002. Vol. 16, № 5. P. 239-239.
14. Kusko A., Thompson M.T. *Power quality in electrical systems*. NewYork: McGraw-Hill Education, 2007. C. 223.
15. Bollen M., Beyer Y., Styvactakis E., Trhulj J., Vailati R., Friedl W. A European benchmarking of voltage quality regulation // *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 15th International Conference on. IEEE. 2012. C. 45-52.
16. Mousavi S.M., Masoum A.S., Fuchs E.F. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines: Second Edition*. 2015. 1123 p.
17. Mousavi S.M., Gazafrudi A., Tabakhpour Langerudy E., Fuchs F., Al-Haddad K. *Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective* // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62, № 5. P. 3081-3090.
18. Pande N., Ohnishi W., Koseki T.. Analysis of voltage unbalance and mitigation of circulating power in bilateral co-phase traction system // *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 228. P. 110048.
19. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Electricity quality in the lines Two Wire Rail (TWR) // *Transport Science and Technology*. 2008. № 3. P. 60-64.
20. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Reduction of asymmetry and harmonic distortions at the substations connected to the 25 kV power lines using rails as a current-carrying part // *Systems. Methods. Technologies*. 2022. № 3 (55). P. 58-65.
21. Fuller J.F., Fuchs E.F., Roesler D.J. Influence of harmonics on power system distribution protection // *IEEE Trans Power Deliv.* 1988. Vol. PWRD-3(2). P. 546-54.
22. Asnin L., Backmutsky V. A new numeric technique of accurate frequency and harmonics estimation for power system protection and power quality applications // 10th Internat. Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings. 2002. Vol.1, cat. № 02EX630. P. 82-85.
23. Zhang J.H., Shi Y.H., Liu G.X., Hogg B.W. Simulation of transmission line galloping using finite element method // 1993 2nd Internat. Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93. 1993. Vol. 2. P. 644-648.
24. Masoum A.S., Jafarian A., Ladjevardi M., Fuchs E.F., Grady W.M. Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, № 2. P. 822-829.
25. Arrillaga J., Smith B.C., Watson N.R., Wood A.R. *Power systems harmonic analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1997. P. 384.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex asymmetric modes of electrical systems*. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 2005. 273 p.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems on the basis of phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.