

Применение газоизолированных ЛЭП в системах внешнего электроснабжения железных дорог

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, А.В. Черепанов^{2c}, И.А. Фесак^{2d}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d fesakilya@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>

Статья поступила 29.10.2024, принята 13.11.2024

Внешнее электроснабжение тяговых подстанций (ТП) переменного тока, которые относятся к потребителям первой категории, традиционно выполняется на основе воздушных линий (ВЛ) 110-220 кВ, требующих значительных площадей охранных зон. Наличие токоведущих частей, расположенных в открытом пространстве, может вызывать нарушение электроснабжения при сильных ветрах и образовании гололеда. Кроме того, при обрывах проводов возникает риск поражения людей и животных от воздействия шаговых напряжений. В аварийных и неполнофазных режимах работы на трассах ВЛ возникают значительные уровни напряженностей электромагнитного поля (ЭМП). Эти недостатки можно исключить путем применения кабелей 110-220 кВ с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена или газоизолированных линий (ГИЛ). Преимущества ГИЛ состоят в небольших потерях в диэлектрике и низком уровне электромагнитных полей, что обеспечивает отсутствие воздействия на электронное оборудование и окружающую среду. Поэтому применение ГИЛ для подключения ТП может стать востребованным на трассах, проходящих в зонах жилой застройки. Для обоснованного решения вопросов об использовании ЛЭП такой конструкции необходима разработка адекватных цифровых моделей, обеспечивающих определение режимов систем внешнего электроснабжения, реализованных на основе ГИЛ. В статье представлены результаты разработки таких моделей на основе методов мультифазного моделирования электроэнергетических систем, реализованных в программном комплексе Fazonord. Методика моделирования является универсальной и может использоваться для расчета систем внешнего электроснабжения любой конфигурации и тяговых сетей различного конструктивного исполнения. Она позволяет определять сложно несимметричные и несинусоидальные режимы и электромагнитные поля, создаваемые ГИЛ.

Ключевые слова: система электроснабжения, электромагнитное поле, несимметричные и несинусоидальные режимы, газоизолированные линии; цифровое моделирование.

Application of gas-insulated power lines in external power supply systems of railways

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, I.A. Fesak^{2d}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d fesakilya@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>

Received 29.10.2024, accepted 13.11.2024

External power supply of AC traction substations, which belong to consumers of the first category, is traditionally performed on the basis of 110-220 kV overhead lines, which require significant areas of protected zones. The presence of current-carrying parts located in open space can cause power supply disruptions during strong winds and ice formation. In addition, when wires break, there is a risk of injury to people and animals from the effects of step voltages. In emergency and open-phase operating modes, significant levels of electromagnetic field strengths occur on overhead line routes. These disadvantages can be eliminated by using cables with cross-linked polyethylene insulation or gas-insulated lines. The advantages of such lines are low losses in the dielectric and a low level of electromagnetic fields, which ensures the absence of impact on electronic equipment and the environment. Therefore, the use of gas-insulated power lines for connecting traction substations can become in demand on routes passing through residential areas. To make a reasonable decision on the use of transmission lines of such a design, it is necessary to develop adequate digital models that ensure the determination of the modes of external power supply systems implemented on the basis of gas-insulated transmission lines. The article presents the results of the development of such models based on the methods of multiphase modeling of electric power systems implemented in the Fazonord software package. The modeling technique is universal and can be used to calculate external power supply systems of any configuration and traction networks of various designs. It allows one to determine complex asymmetric and non-sinusoidal modes and electromagnetic fields created by gas-insulated lines.

Keywords: power supply system; electromagnetic field; asymmetric and non-sinusoidal modes; gas-insulated lines; digital modeling.

Введение. Тяговые подстанции (ТП) переменного тока относятся к потребителям первой категории. Для их электроснабжения применяются воздушные линии (ВЛ) 110–220 кВ, которые требуют формирования значительных охраняемых зон. Токоведущие части ВЛ расположены на открытом пространстве, поэтому при сильных ветрах и образовании гололеда электроснабжение ТП может нарушаться. При обрывах проводов возможно поражение людей и животных от воздействия шаговых напряжений. В аварийных и неполнофазных режимах работы на трассах ВЛ возникают значительные уровни напряженностей электромагнитного поля (ЭМП). Эти недостатки можно исключить путем применения кабелей 110–220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена или газоизолированных линий (ГИЛ) [1]. Преимущества ГИЛ состоят в небольших потерях в диэлектрике и низком уровне ЭМП, что существенно снижает негативные воздействия на электронное оборудование и окружающую среду [2]. Поэтому применение ГИЛ для подключения ТП может стать востребованным на трассах, проходящих в зонах жилой застройки. Вопросам применения ГИЛ посвящено значительное число работ. Так, например, обзоры современных конструкций ГИЛ представлены в [3]. Результаты сравнения ГИЛ и подземного кабеля приведены в [4]. Сравнение потерь и падений напряжения при передаче электроэнергии с помощью ГИЛ и ВЛ выполнено в [5]. Компактные ЛЭП переменного тока высокой пропускной способности с газовой изоляцией описаны в [6]. Технические показатели ГИЛ и традиционной ВЛ 400 кВ и результаты их сравнительного анализа представлены в [7]. Возможности передачи электроэнергии на большие расстояния с помощью ГИЛ рассмотрены в [8]. Результаты исследования элегазовой ЛЭП 1100 кВ в металлическом корпусе описаны в [9]. Вопросы сооружения ГИЛ в железнодорожных галереях рассмотрены в [10]. Ультразвуковой метод обнаружения дефектов опорных изоляторов в ГИЛ предложен в [11]. Результаты моделирования переноса заряда на основе нескольких уровней ловушек в изолирующем диэлектрике ГИЛ представлены в [12]. Вопросам строительства первой ГИЛ в Японии посвящена статья [13]. Новая концепция проектирования сверхпроводящей ГИЛ приведена в [14]. Заглубленные газоизолированные линии электропередачи рассмотрены в [15]. Анализ влияния ГИЛ на уровни перенапряжений выполнен в [16]. Потребности в электрических связях большой мощности ГИЛ проанализированы в [17]. Результаты измерения коэффициента диэлектрических потерь в ГИЛ с использованием сверхнизкочастотного теста приведены в [18]. Технико-экономическое обоснование гибкой ГИЛ с использованием газовой смеси выполнено в [19]. Методика моделирования ГИЛ, проложенных в однослойной и двухслойной земле, предложена в [20]. Факторы, влияющие на характерные параметры заземления ГИЛ, проанализированы в [21]. Метод локализации короткого замыкания для линии с газовой изоляцией на основе зондирования крутой волны предложен в [22]. Результаты разработки модели изоляционной пены для изучения распределения электрического поля в ГИЛ приведены в [23].

Концептуальное проектирование и исследование осуществимости гибкой ГИЛ проведены в [24]. Расчеты электрического поля изолирующих прокладок для сверхпроводящей ГИЛ приведены в [25]. Анализ теплопередачи в различных условиях работы ГИЛ выполнен в [26]. Физика поверхностного заряда изолятора в ГИЛ ± 320 кВ рассмотрена в [27]. Линия электропередачи постоянного тока высокого напряжения ± 100 кВ с элегазовой изоляцией описана в [28]. Результаты измерения характеристик электромагнитной среды ГИЛ приведены в [29].

Анализ представленных публикаций позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе ГИЛ может быть реализована перспективная технология транспорта электроэнергии, свободная от перечисленных выше недостатков ВЛ.
2. В проанализированных выше работах рассмотрены многие важные аспекты, связанные с проектированием, эксплуатацией и диагностированием ГИЛ.
3. Вопросы работы ГИЛ в условиях значительной несимметрии и гармонических искажений, характерных для сетей, питающих ТП, не рассматриваются.

Для решения задач определения режимов ГИЛ, обеспечивающих электроснабжение ТП, можно применять подход, описанный в [30–32]. Он реализован в промышленном программном комплексе (ПК) *Fazonord* и базируется на использовании фазных координат.

Ниже представлены результаты моделирования режимов системы электроснабжения (СЭС) тяговых подстанций, построенной на основе ГИЛ. Для сравнения проведены расчеты типовой СЭС, выполненной на базе ВЛ. Схема моделируемой СЭС показана на рис. 1. Часть визуального отображения расчетной модели, реализованной в ПК *Fazonord*, версия 5.3.5.3-2024, представлена на рис. 2. Моделирование осуществлялось при пропуске поездов массой 4 384 и 6 780 т (рис. 3).

Конструкция ГИЛ включает в себя две алюминиевые трубы, внешнюю и внутреннюю, являющуюся проводником; она монтируется на изоляторах, центрирующих ее во внешней оболочке, выполненной из сплава, устойчивого к коррозии. В качестве изолирующей среды используется смесь газов (азот и элегаз). Проводники в модели ГИЛ, применяемой для расчетов, расположены по горизонтали, на расстоянии 0,3 м друг от друга. Результаты определения параметров режимов проиллюстрированы на рис. 4–12. На рис. 4 показаны графики, отвечающие минимальным, осредненным за 3 мин напряжениям на пантографах электровозов. Из них видно, что при использовании ГИЛ эти параметры не выходят за пределы допустимого диапазона 21...29 кВ. При питании ТП от ВЛ напряжения электровозов, ведущих поезда 2 и 3, снижаются соответственно до 18 и 18,5 кВ. Характер вариаций напряжений на пантографах проиллюстрирован на рис. 5 и 6. На рис. 7 и 8 представлены результаты определения коэффициентов несимметрии k_{2U} на вводах 110 кВ ТП. Результаты расчетов несинусоидальных режимов показаны на рис. 9–11. Расчеты магнитных полей ГИЛ и ВЛ проиллюстрированы на рис. 12.

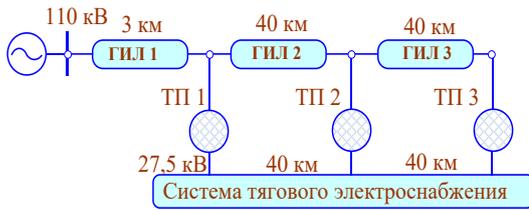


Рис. 1. Схема моделируемой сети

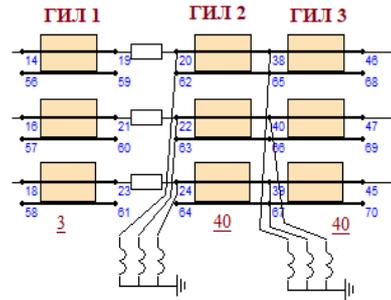
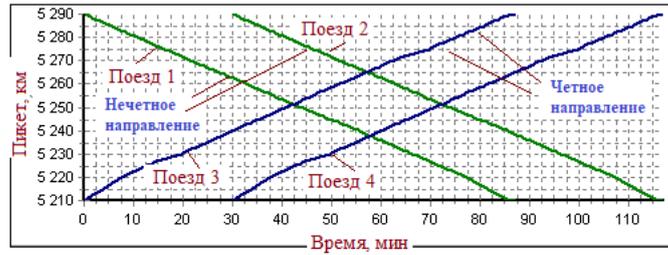
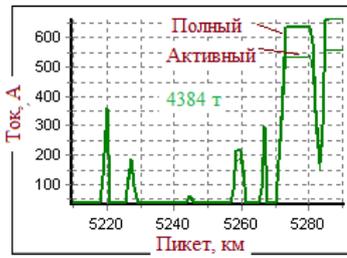


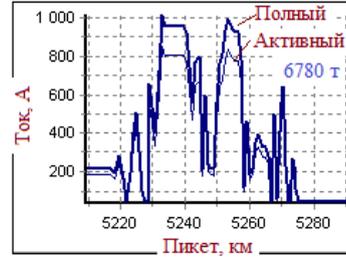
Рис. 2. Часть визуального отображения модели



а)



б)



в)

Рис. 3. График движения (а) и зависимости (б, в) токов электровозов от их местоположения: б — поезда 1 и 2; в — поезда 3 и 4

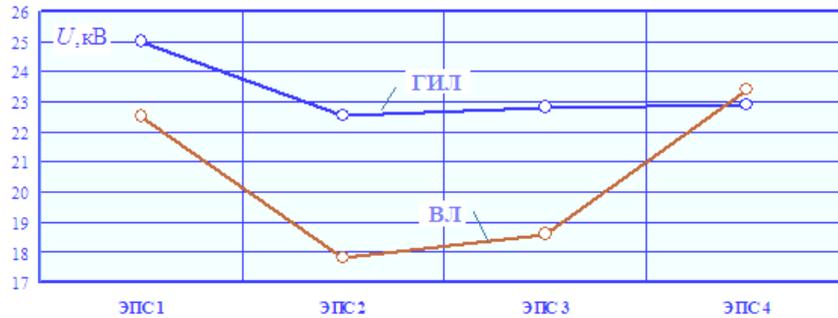
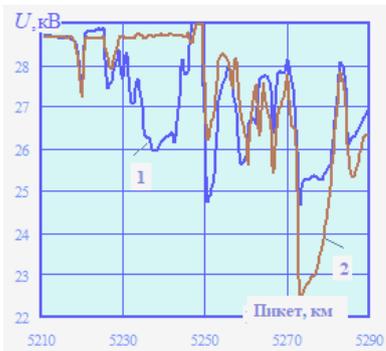
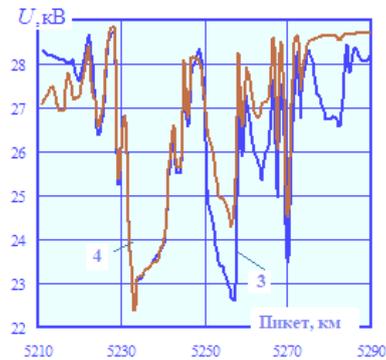


Рис. 4. Минимальные, осредненные за 3 мин напряжения на пантографах электровозов



а)



б)

Рис. 5. Напряжения на пантографах для схемы с ГИЛ. Цифрами обозначены номера поездов по рис. 3, а

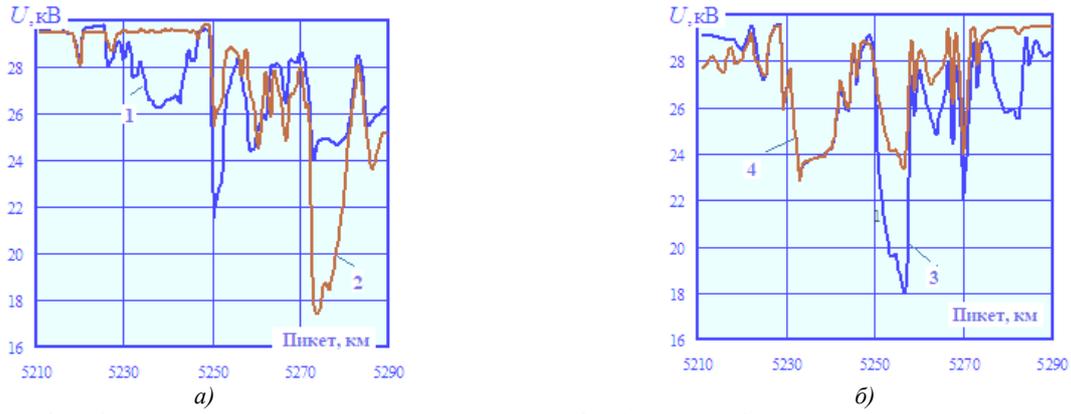


Рис. 6. Напряжения на пантографах для схемы с ВЛ. Цифрами обозначены номера поездов по рис. 3, а

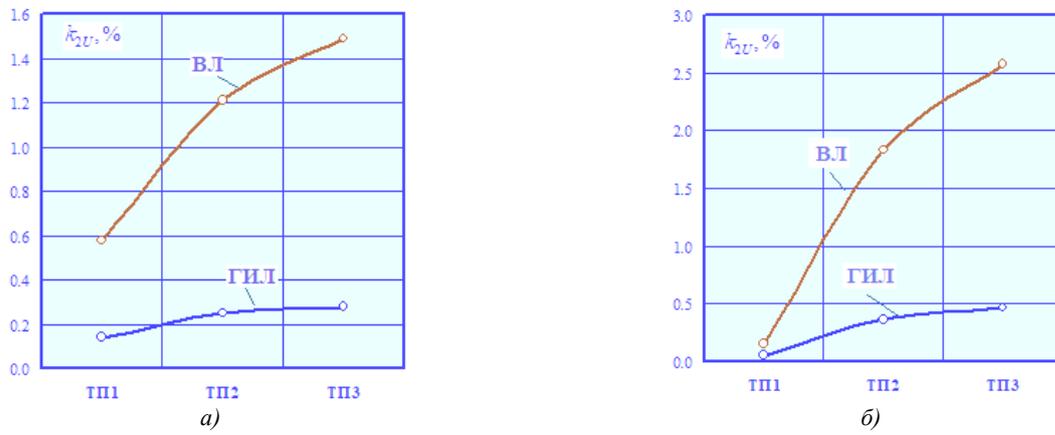


Рис. 7. Коэффициенты k_{2U} на вводах 110 кВ ТП: а — средние значения; б — максимумы

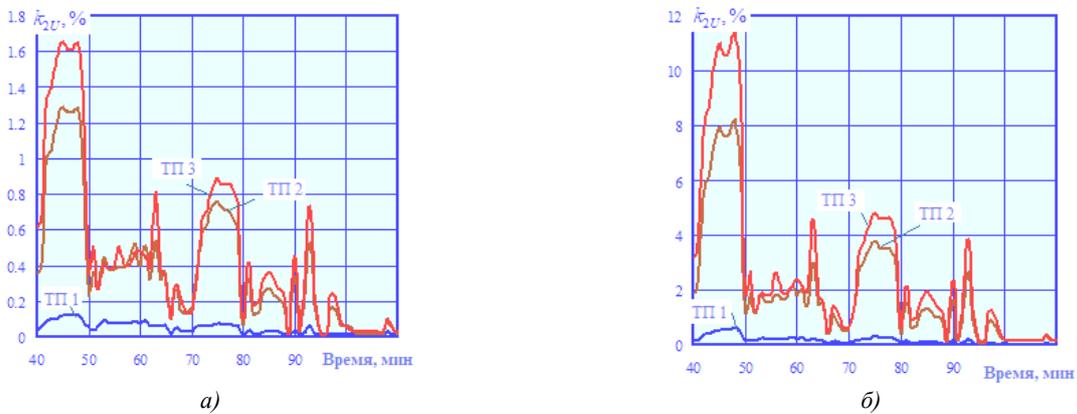


Рис. 8. Зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$: а — ГИЛ; б — ВЛ

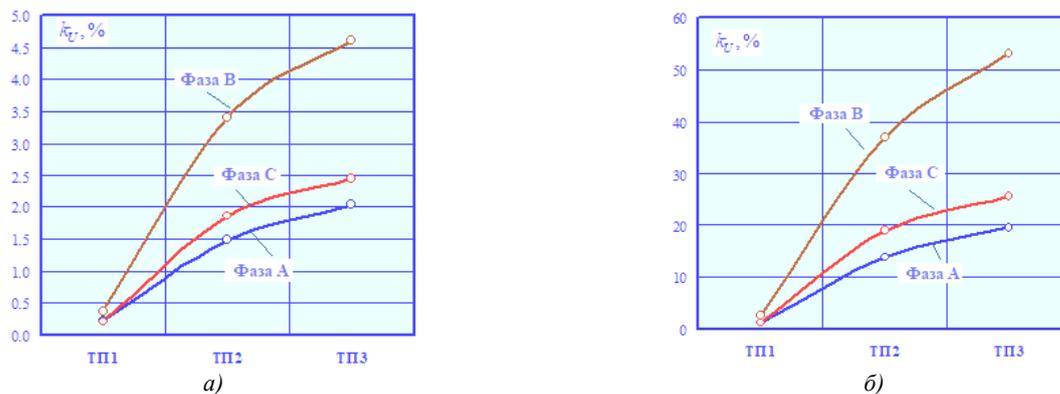


Рис. 9. Максимумы коэффициентов гармоник k_U на вводах 110 кВ ТП: а — ГИЛ; б — ВЛ

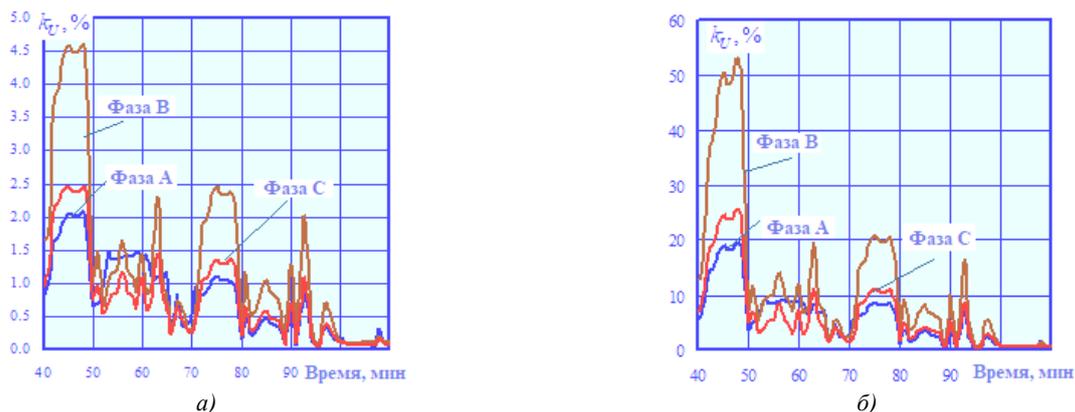


Рис. 10. Зависимости $k_U = k_U(t)$ на вводах 110 кВ ТП 3: а — ГИЛ; б — ВЛ

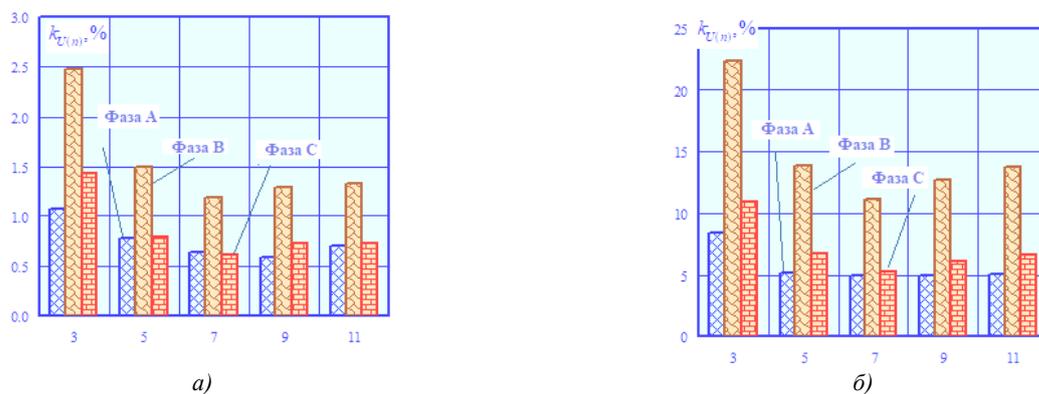


Рис. 11. Спектры гармоник на вводах 110 кВ ТП 3: а — ГИЛ; б — ВЛ

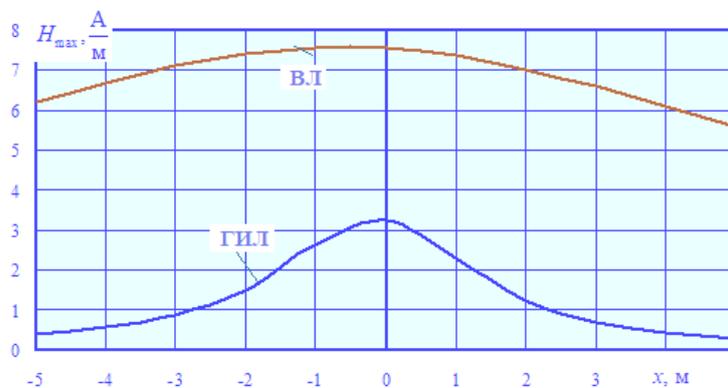


Рис. 12. Амплитуды напряженностей магнитного поля на высоте 1,8 м

Представленные на рис. 6–12 результаты дают возможность сформулировать следующие выводы:

1. При использовании ГИЛ эти параметры не выходят за пределы допустимого диапазона 21...29 кВ. При питании тяговых подстанций от ВЛ напряжения электропоездов, ведущих поезда 2 и 3, снижаются соответственно до 18 и 18,5 кВ.

2. Для ситуации с ВЛ уровни несимметрии на шинах 110 кВ ТП выходят за нормативные пределы и превышают 2,5 %.

3. На основе применения ГИЛ возможно значительно снизить гармонические искажения на шинах 110 кВ ТП (рис. 12). Наибольшие уровни несинусоидальности наблюдаются по фазе В.

4. Максимум напряженности магнитного поля ГИЛ уменьшается по сравнению с ВЛ более чем в два раза.

Заключение. Разработаны цифровые модели, позволяющие определять режимы электрических сетей, реализованных на основе газоизолированных линий. Моделирование режимов железнодорожной системы электроснабжения показало, что на основе ГИЛ можно получить следующие положительные эффекты:

- повышение и стабилизация напряжений на пантографах электропоездов;
- уменьшение уровней несимметрии и гармонических искажений на вводах 110 кВ тяговых подстанций;
- снижение напряженностей магнитных полей.

Разработанная методика моделирования является универсальной и может использоваться при моделировании режимов тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Литература

1. Вариводов В.Н. Газозолированные высоковольтные линии // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2011. № 1-4 (4). С. 74-77.
2. Байшев А.В., Торопов А.С. Обзор направлений применения высоковольтных газозолированных линий электропередачи // *Вестн. Хакасского гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова*. 2017. № 19. С. 5-8.
3. Riedl J., Hillers T. Gas insulated transmission lines, in *IEEE Power Engineering Review*. 2000. Vol. 20, № 9. P. 15-16.
4. Alvi M.J., Izhar T., Ali Qaiser A., Afzaal M.U., Anjum A., Safdar A. Pliability Assay of Conventional Gas Insulated Transmission Line and Flexible Gas Insulated Transmission Line Regarding Horizontal Directional Drilling Based Underground Cable Laying for Metropolitan Areas, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018. P. 1-5.
5. Khan D., Rafiq M., Rafique S.F., Khan I., Abbas F. Comparison of transmission losses and voltage drops of GIL (Gas Insulated transmission line) and overhead transmission lines, 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014. P. 1151-1153.
6. Magier T., Dehler A., Koch H. AC Compact High Power Gas-Insulated Transmission Lines, 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA, 2018. P. 1-5.
7. Lauria D., Quaiá S. Technical comparison between a gas-insulated line and a traditional three-bundled OHL for a 400 kV, 200 km connection, 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy, 2015. P. 597-601.
8. Elnaddab K., Haddad A., Griffiths H. The transmission characteristics of gas insulated lines (GIL) over long distance, 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Uxbridge, UK, 2012. P. 1-5.
9. Jianying Z., Yujing G., Guangyao J., Liping D. Research on the key technology of 1100 kV SF6 gas-insulated metal-enclosed transmission line, 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China, 2017. P. 30-33.
10. Benato R., Carlini E. M., Di Mario C., Fellin L., Paolucci A., Turri R. Gas insulated transmission lines in railway galleries, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003. Vol. 2. P. 7.
11. Li W. An Ultrasonic Detection Method for Interface Defects of Three Post Insulators in Gas-insulated Transmission Lines, 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020. P. 1-5.
12. Zhang J.-w. Modeling of charge transport in insulating dielectric for gas-insulated transmission line based on multiple trap levels, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. August 2018. Vol. 25, № 4. P. 1195-1201.
13. Watanabe Y., Mori S., Ninomiya K., Hata H., Yoshida Y., Itaka K. Construction of First Gas Insulated Transmission Line in Japan, in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Oct. 1981. Vol. PAS-100, № 10. P. 4319-4329.
14. Cheetham P., Viquez J., Graber L., Kim C.H., Rodrigo H., Pamidi S. Novel Design Concept and Demonstration of a Superconducting Gas-Insulated Transmission Line, in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. June 2017. Vol. 27, № 4. P. 1-5.
15. Poehler S., Rudenko P. Directly buried gas-insulated transmission lines (GIL), PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 2012. P. 1-5.
16. Wenjia X., Zutao X. Influence of Gas-Insulated Transmission Line (GIL) on Energization Overvoltage, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018. P. 1-8.
17. Koch H. Future needs of high power interconnections solved with gas-insulated transmission lines (GIL), *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, Kunming, China, 2002. Vol. 3. P. 1851-1855.
18. Nganpitak T., Rugthaicharoencheep N., Chancharoensook P., Pattanadech N. Dielectric Loss Factor Measurement in A Gas-Insulated Transmission Line by Using Very Low Frequency Test, 2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 2020. P. 844-847.
19. Kobayashi T., Shioiri T., Matsuoka S., Kumada A., Hidaka K. Feasibility study of flexible gas-insulated transmission line using CF3I gas mixture, 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), Valencia, Spain, 2020. P. 806-809.
20. Tsiमितros D.A., Papadopoulos T.A., Papagiannis G.K. Modeling of Gas-Insulated Lines buried in single and in two-layer earth, 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, 2009. P. 1-5.
21. Chen H., Tang L., Liu G., Xu X., Wu M., Li J. Factors Affecting the Characteristic Parameters of GIL (Gas Insulated Transmission Line) Grounding System, 2023 Panda Forum on Power and Energy (Panda FPE), Chengdu, China, 2023. P. 818-823.
22. Cheng Z. Flashover Fault Localization for Gas Insulated Line Based on Steep Wave Sensing, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020. P. 1-4.
23. Pendse H., Karady G. Development of the insulating foam model for the study of electric field distribution for the application of Gas Insulated Transmission Line, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015. P. 1-5.
24. Tateyama C., Kobayashi T., Kumada A., Hidaka K. Conceptual Design and Feasibility Study of Flexible Gas-Insulated Transmission Line Using CF3I Gas Mixture, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. August 2021. Vol. 28, № 4. P. 1424-1430.
25. Cheetham P., Wagner J., Stamm T., Kim C.H., Graber L., Pamidi S. Electric field analysis of insulating spacers for a superconducting gas-insulated transmission line, 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China, 2018. P. 185-189.
26. Qiao Y.J. Heat Transfer Analysis of Different Conditions for SF6/N2 Gas-Insulated Transmission Lines, in *IEEE Transactions on Power Delivery*. April 2021. Vol. 36, № 2. P. 831-840.
27. Liang F. Surface Charging Physics of the Basin Insulator in ± 320 -kV Gas-Insulated Transmission Lines, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. June 2024. Vol. 31, № 3. P. 1654-1656.
28. Tu Y. ± 100 -kV HVDC SF6/N2 Gas-Insulated Transmission Line, in *IEEE Transactions on Power Delivery*. April 2020. Vol. 35, № 2. P. 735-744.
29. Li N. Study on Measurement of Electromagnetic Environment Characteristics of UHV AC GIL Test Line, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020. P. 1-4.
30. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
31. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 198 с.
32. Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В., Фесак И.А. Использование кабельных ЛЭП в системах электроснаб-

жения железных дорог // Вестн. Северо-Кавказского федер. ун-та. 2024. № 3 (102). С. 18-25.

References

- Varivodov V.N. Gas-insulated high-voltage lines // Electric power. Transmission and distribution. 2011. № 1-4 (4). P. 74-77.
- Bajshv A.V., Toropov A.S. Review of areas of application of high-voltage gas-insulated power lines // Vestn. Hakasskogo gos. un-ta im. N.F. Katanova. 2017. № 19. P. 5-8.
- Riedl J., Hillers T. Gas insulated transmission lines, in IEEE Power Engineering Review. 2000. Vol. 20, № 9. P. 15-16.
- Alvi M.J., Izhar T., Ali Qaiser A., Afzaal M.U., Anjum A., Safdar A. Pliability Assay of Conventional Gas Insulated Transmission Line and Flexible Gas Insulated Transmission Line Regarding Horizontal Directional Drilling Based Underground Cable Laying for Metropolitan Areas, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018. P. 1-5.
- Khan D., Rafiq M., Rafique S.F., Khan I., Abbas F. Comparison of transmission losses and voltage drops of GIL (Gas Insulated transmission line) and overhead transmission lines, 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014. P. 1151-1153.
- Magier T., Dehler A., Koch H. AC Compact High Power Gas-Insulated Transmission Lines, 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA, 2018. P. 1-5.
- Lauria D., Quaia S. Technical comparison between a gas-insulated line and a traditional three-bundled OHL for a 400 kV, 200 km connection, 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy, 2015. P. 597-601.
- Elnaddab K., Haddad A., Griffiths H. The transmission characteristics of gas insulated lines (GIL) over long distance, 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Uxbridge, UK, 2012. P. 1-5.
- Jiaying Z., Yujing G., Guangyao J., Liping D. Research on the key technology of 1100 kV SF6 gas-insulated metal-enclosed transmission line, 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China, 2017. P. 30-33.
- Benato R., Carlini E. M., Di Mario C., Fellin L., Paolucci A., Turri R. Gas insulated transmission lines in railway galleries, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003. Vol. 2. P. 7.
- Li W. An Ultrasonic Detection Method for Interface Defects of Three Post Insulators in Gas-insulated Transmission Lines, 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020. P. 1-5.
- Zhang J.-w. Modeling of charge transport in insulating dielectric for gas-insulated transmission line based on multiple trap levels, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. August 2018. Vol. 25, № 4. P. 1195-1201.
- Watanabe Y., Mori S., Ninomiya K., Hata H., Yoshida Y., Itaka K. Construction of First Gas Insulated Transmission Line in Japan, in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Oct. 1981. Vol. PAS-100, № 10. P. 4319-4329.
- Cheatham P., Viquez J., Graber L., Kim C.H., Rodrigo H., Pamidi S. Novel Design Concept and Demonstration of a Superconducting Gas-Insulated Transmission Line, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity. June 2017. Vol. 27, № 4. P. 1-5.
- Poehler S., Rudenko P. Directly buried gas-insulated transmission lines (GIL), PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 2012. P. 1-5.
- Wenjia X., Zutao X. Influence of Gas-Insulated Transmission Line (GIL) on Energization Overvoltage, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018. P. 1-8.
- Koch H. Future needs of high power interconnections solved with gas-insulated transmission lines (GIL), Proceedings. International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002. Vol. 3. P. 1851-1855.
- Nganpitak T., Rugthaicharoencheep N., Chanchaensook P., Pattanadech N. Dielectric Loss Factor Measurement in A Gas-Insulated Transmission Line by Using Very Low Frequency Test, 2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 2020. P. 844-847.
- Kobayashi T., Shioiri T., Matsuoka S., Kumada A., Hidaka K. Feasibility study of flexible gas-insulated transmission line using CF3I gas mixture, 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), Valencia, Spain, 2020. P. 806-809.
- Tsiamitros D.A., Papadopoulos T.A., Papagiannis G.K. Modeling of Gas-Insulated Lines buried in single and in two-layer earth, 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, 2009. P. 1-5.
- Chen H., Tang L., Liu G., Xu X., Wu M., Li J. Factors Affecting the Characteristic Parameters of GIL (Gas Insulated Transmission Line) Grounding System, 2023 Panda Forum on Power and Energy (Panda FPE), Chengdu, China, 2023. P. 818-823.
- Cheng Z. Flashover Fault Localization for Gas Insulated Line Based on Steep Wave Sensing, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020. P. 1-4.
- Pendse H., Karady G. Development of the insulating foam model for the study of electric field distribution for the application of Gas Insulated Transmission Line, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015. P. 1-5.
- Tateyama C., Kobayashi T., Kumada A., Hidaka K. Conceptual Design and Feasibility Study of Flexible Gas-Insulated Transmission Line Using CF3I Gas Mixture, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. August 2021. Vol. 28, № 4. P. 1424-1430.
- Cheatham P., Wagner J., Stamm T., Kim C.H., Graber L., Pamidi S. Electric field analysis of insulating spacers for a superconducting gas-insulated transmission line, 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China, 2018. P. 185-189.
- Qiao Y.J. Heat Transfer Analysis of Different Conditions for SF6/N2 Gas-Insulated Transmission Lines, in IEEE Transactions on Power Delivery. April 2021. Vol. 36, № 2. P. 831-840.
- Liang F. Surface Charging Physics of the Basin Insulator in ± 320 -kV Gas-Insulated Transmission Lines, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. June 2024. Vol. 31, № 3. P. 1654-1656.
- Tu Y. ± 100 -kV HVDC SF6/N2 Gas-Insulated Transmission Line, in IEEE Transactions on Power Delivery. April 2020. Vol. 35, № 2. P. 735-744.
- Li N. Study on Measurement of Electromagnetic Environment Characteristics of UHV AC GIL Test Line, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020. P. 1-4.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2005. 273 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. M.: Direkt-Media, 2023. 198 p.
- Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Fesak I.A. Use of cable transmission lines in railway power supply systems // Newsletter of the North Caucasus Federal University. 2024. № 3 (102). P. 18-25.