

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311, 621.331

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.2>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛЭП В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Андрей Васильевич Крюков¹, Константин Витальевич Суслов^{2*},
Александр Валерьевич Черепанов³, Илья Анатольевич Фесак⁴

^{1,3,4} Иркутский государственный университет путей сообщения (д. 15 ул. Чернышевского, Иркутск, 664074, Российская Федерация)
² Национальный исследовательский университет «МЭИ» (д. 14 ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Российская Федерация)
^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет (д. 83, ул. Лермонтова, Иркутск, 664074, Российская Федерация)
¹ and_kryukov@mail.ru
² dr.souslov@yandex.ru
³ smart_grid@mail.ru
⁴ fesakilya@yandex.ru
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Для присоединения тяговых подстанций (ТП) железных дорог к сетям 110-220 кВ традиционно применяются воздушные линии (ВЛ) электропередачи. Такой подход обладает целым рядом недостатков, которые можно исключить при использовании для подключения ТП кабелей 110-220 кВ с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена (СПЭК). **Цель.** Разработка цифровых моделей для определения режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) с питанием тяговых подстанций по СПЭК. **Материалы и методы.** Использовались методы мультифазного моделирования электроэнергетических систем и программный продукт Fazonord, версия 5.3.4.5–2024. **Результаты и обсуждение.** Сопоставление воздушной линии 110 кВ с проводами АС-300 и СПЭК аналогичного сечения показало, что в случае СПЭК примерно на 75 % снижены среднеквадратичные отклонения напряжений на токоприемниках электровазов. В 3...5 раз уменьшается несимметрия по обратной последовательности, однако за счет емкостной генерации СПЭК повышаются токи при малых нагрузках и потери в ЛЭП. **Заключение.** Разработанные цифровые модели могут применяться при проектировании. Методика определения режимов является универсальной и может использоваться для расчета режимов СЭЖД любой конфигурации и тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Ключевые слова: железные дороги, системы электроснабжения, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, цифровое моделирование

Для цитирования: Использование кабельных ЛЭП в системах электроснабжения железных дорог / А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. В. Черепанов, И. А. Фесак // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 3(102). С. 18–25. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.2>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.04.2024;
одобрена после рецензирования 15.05.2024;
принята к публикации 30.05. 2024.

Research article

THE USE OF CABLE POWER LINES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF RAILWAYS

Andrey V. Kryukov¹, Konstantin V. Suslov^{2*},
Aleksandr V. Cherepanov³, Ilya A. Fesak⁴

^{1,3,4} Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074, Russian Federation);
² National Research University "MPEI" (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation)
^{1,2} Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation)
¹ and_kryukov@mail.ru
² dr.souslov@yandex.ru
³ smart_grid@mail.ru
⁴ fesakilya@yandex.ru
* Corresponding author

Abstract. Introduction. Overhead power lines are traditionally used to connect railway traction substations to 110-220 kV networks. This approach has a number of disadvantages that can be eliminated when using 110-220 kV cables with molecular cross-linked polyethylene insulation in external power supply systems for traction substations. **Goal.** To develop digital models to determine the modes of railway power supply systems with power supply to traction substations via cables. **Materials and methods.** Methods of multiphase modeling of electrical power systems and the Fazonord software product, version 5.3.4.5–2024 were used. **Results and discussion.** A comparison of the 110 kV AS-300 overhead line and a cable of a similar cross-section showed that in the case of a cable line, the standard deviations of voltages on the current collectors of electric locomotives

were reduced by approximately 75%. Negative sequence asymmetry is reduced by 3...5 times, however, due to capacitive generation by cables, currents at low loads and losses in power lines increase. **Conclusion.** The developed digital models can be used in design. The modeling technique is universal and can be used to calculate the modes of power supply systems of any configuration and traction networks of various designs.

Keywords: railways, power supply systems, XLPE insulated cables, digital modeling

For citation: Kryukov AV, Suslov KV, Cherepanov AV, Fesak IA. The use of cable power lines in power supply systems of railways. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;3(102):18-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.2>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 29.04.2024;

approved after reviewing 15.05.2024;

accepted for publication 30.05.2024.

Введение / Introduction. Для присоединения тяговых подстанций (ТП) железных дорог к сетям 110–220 кВ традиционно используются воздушные линии (ВЛ) электропередачи. Такой подход обладает целым рядом недостатков:

- значительная площадь охранной зоны;
- возможность повреждений при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений;
- риск поражения людей и животных от воздействия шаговых напряжений из-за обрыва проводов;
- значительные уровни напряженностей электромагнитного поля, особенно в аварийных и неполнофазных режимах.

Перечисленные недостатки можно исключить при использовании в системах внешнего электропитания ТП кабелей 110–220 кВ с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена (СПЭЖ). Кабельные линии (КЛ) отличаются от ВЛ малой площадью охранных зон, отсутствием ветровой нагрузки и гололеда, меньшим риском поражения электрическим током, более низкими напряженностями электромагнитных полей, повышенной емкостью с компенсацией индуктивных нагрузок и др. В ряде случаев, несмотря на высокую стоимость, КЛ могут оказаться предпочтительнее воздушных линий.

Методам расчета режимов, технологиям проектирования и эксплуатации СПЭЖ посвящено множество публикаций. Серьезное внимание уделено вопросам транспозиции и заземления экранов [1–3, 6, 8] и показано, что эти вопросы должны быть увязаны с требованиями снижения потерь и уменьшения возможных перенапряжений. Подходы к анализу нормальных и аварийных режимов рассмотрены в [4–9], а также в [10–13], где наряду с электрическими параметрами кабелей анализируются и тепловые процессы. Наиболее полно вопросы, связанные с моделированием СПЭЖ, представлены в [6].

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Анализ публикаций по СПЭЖ дает возможность сделать вывод о том, что многие важные аспекты, связанные с моделированием таких кабелей, в них рассмотрены. Однако задача определения режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), имеющих в своем составе КЛ с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена остается нерешенной. СЭЖД обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от электрических сетей общего назначения. К ним можно отнести [14] такие факторы, как: резкопеременная, однофазная и нелинейная тяговые нагрузки; структурная разнородность подсистем, вызванная тем, что в СЭЖД входят однофазные тяговые сети (ТС) и трехфазное внешнее электроснабжение; значительная пространственную распределенность; перемещение потребителей электроэнергии (электровозов). Перечисленные факторы затрудняют моделирование режимов СЭЖД, характеризующихся многократными продольными и поперечными несимметриями и значительными гармоническими искажениями. Для ее решения можно использовать методы, алгоритмы и программный комплекс (ПК) Fazonord, описанные в [15–18].

В Иркутском государственном университете путей сообщения разработаны методы, алгоритмы для определения режимов систем тягового и внешнего электроснабжения в фазных координатах с решением задач, имеющих важное значение для теории и практики. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с данными инструментальных измерений, выполненных на основе устройств РМУ [19] в системах электроснабжения главного хода Забайкальской железной дороги и западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Различия результатов измерений и моделирования не превышало единиц процентов. Для дальнейшего повышения точности моделирования предложены методы определения параметров элементов СЭЖД на основе измерений [20].

Адекватное моделирование режимов СЭЖД может быть реализовано на базе использования фазных координат [14, 15] и решетчатых схем замещения (РСЗ), которые формируются из RLC-элементов, соединенных в схемы полных графов. Для РСЗ справедливо определение:

$$PCЗ: hub \cup con, \forall i, j \subset hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где hub, con – соответственно узлы и ветви РСЗ.

Путем объединения РСЗ отдельных элементов в расчетную модель по алгоритмам, описанным в [14, 15], формируется набор систем нелинейных уравнений режимов, отвечающих дискретным моментам времени t_k , соответствующих текущему расположению тяговых нагрузок:

$$F_k(X_k, Y_k) = 0,$$

где F_k – вектор-функция; X_k – параметры режима, подлежащие определению; Y_k – заданные активные и реактивные мощности, приложенные в узлах сети.

Нагрузки электроподвижного состава (ЭПС) формируются на основе тяговых расчетов, а стационарные могут задаваться отборами мощности P_H, Q_H , статическими характеристиками $P_H = P_H(U), Q_H = Q_H(U)$ сопротивлениями или проводимостями, а также графиками $P_H = P_H(t), Q_H = Q_H(t)$.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Ниже представлены исследования, направленные на изучение эффективности применения СПЭК в сетях, питающих ТП. Расчеты проведены для схемы СЭЖД, показанной на рис. 1а. Рассматриваемое консольное питание ТП возникает в вынужденных режимах, а при некоторых категориях железных дорог такая схема разрешается для постоянного подключения. В состав моделируемой СЭЖД входили следующие элементы: КЛ-110 кВ, выполненные кабелем марки 3хАПвПУ-300/70-110; тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000/110; контактные подвески с проводами МФ-100 и несущими тросами ПБСМ-95, рельсы Р 50. На шинах 110 кВ ТП 3 была приложена нагрузка $2 + j1$ МВ · А на фазу. Для сравнения рассматривалась типовая система внешнего электроснабжения, выполненная воздушными ЛЭП с проводами АС-300. Часть визуального отображения расчетной модели, отвечающей кабельной сети, приведена на рис. 1б.

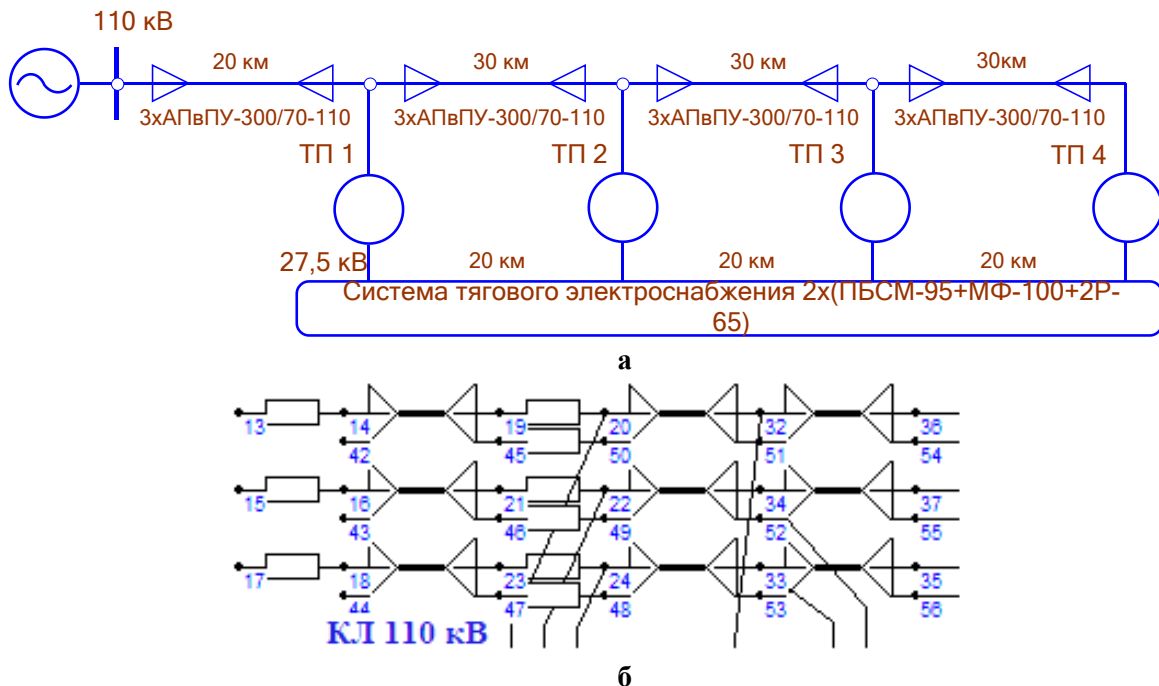


Рис. 1. Схема СЭЖД (а) и часть визуального отображения модели (б), соответствующей кабельной сети / Fig. 1. Power supply system on railways diagram (a) and part of the visual display of the model (b) corresponding to the cable network

График движения и зависимости активных и полных токов электровозов от мест их расположения приведены на рис. 2. Рассматривался пропуск шести составов в противоположных направлениях. Приведенные графики соответствуют горно-перевальному участку; токи нечетных поездов достигают 650 А, а более тяжелых четных на отдельных пикетах доходят до 1000 А.

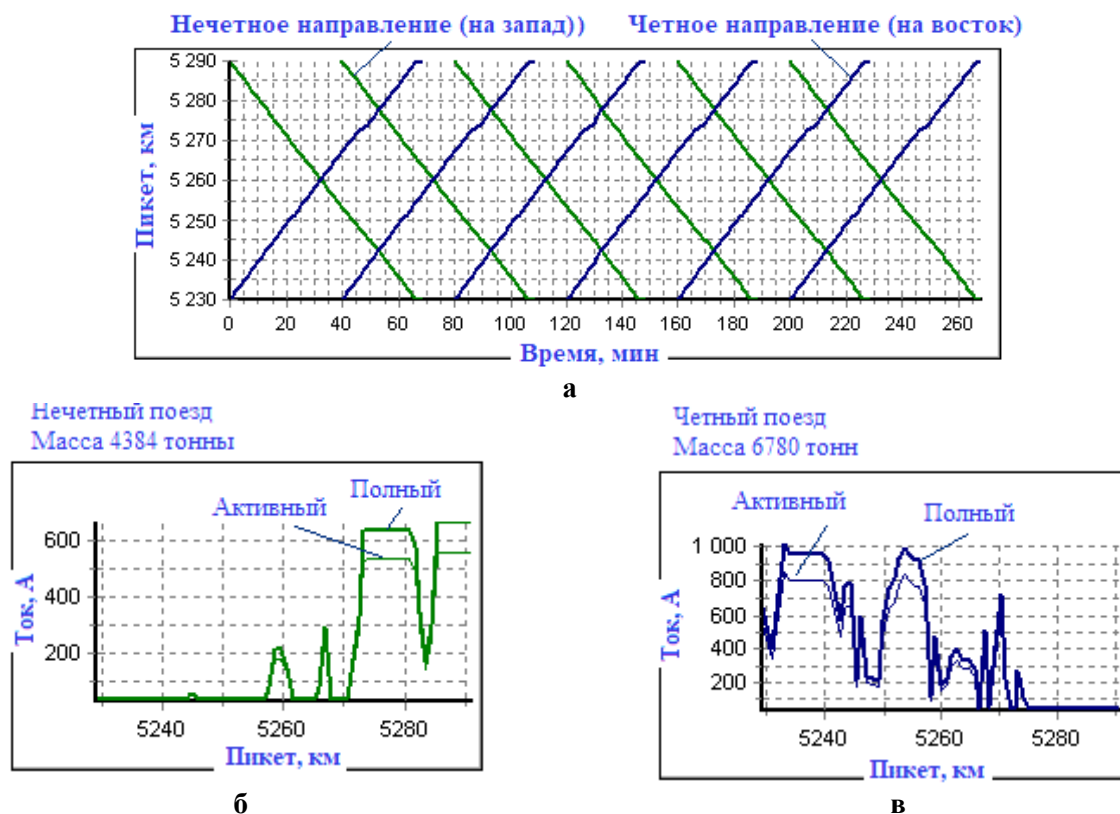


Рис. 2. График перемещения поездов по заданному маршруту (а) и зависимости токов, потребляемых электровозами, от пикетов (б, в), т. е. точек разметки расстояний на железнодорожных линиях / Fig. 2. The schedule of trains moving along a given route (a) and the dependence of currents consumed by electric locomotives on pickets (b, c), i. e. points of marking distances on railway lines

Результаты моделирования представлены на рис. 3–6 и в таблице. На рис. 3 приведены зависимости

$$U = U(t),$$

где U – напряжения на пантографах электровозов; t – время.

Снижение индуктивного реактанса и увеличение емкости кабельной линии приводит к значительному уменьшению отклонений напряжений на пантографах электровозов. Максимальные снижения U отвечают пиковым поездным нагрузкам, что усугубляется нахождением встречно движущихся поездов на одной межподстанционной зоне.

Из рис. 3 видно, что в СЭЖД, оборудованной СПЭК, напряжения U стабилизируются. По сравнению с ВЛ за счет СПЭК среднеквадратические отклонения этих параметров снижаются на 74–77 %. Минимальное значение U_{\min} для первых поездов нечетного и четного направлений возрастает соответственно на 12 % и 35 %. Следует отметить, что напряжение на токоприемнике электровоза первого четного поезда в схеме с ВЛ уменьшается ниже допустимого 21 кВ.

Потери напряжений в сети 110 кВ корреспондируются с их отклонениями в ТС. Снижение отклонений для СЭЖД с КЛ приводит и к уменьшению несимметрии в соответствии с рис. 4. Кроме того, здесь сказывается и повышение напряжений на токоприемниках, что при сохранении потребляемой электровозами мощности приводит к падению пиковых токов головной ЛЭП (рис. 5). Значительное влияние оказывает также и уменьшенная величина индуктивного сопротивления КЛ по сравнению с ВЛ.

**Коэффициенты несимметрии и напряжения прямой последовательности 110 кВ ТП /
The coefficients of asymmetry and direct sequence voltage 110 kV TP**

Показатель	ТП1, ВЛ	ТП1, КЛ	ТП2, ВЛ	ТП2, КЛ	ТП3, ВЛ	ТП3, КЛ	ТП4, ВЛ	ТП4, КЛ
Максимум k_{2U} , %	2,8	1,0	7,9	2,3	11,1	3,5	12,7	4,2
Среднее k_{2U} , %	1,1	0,4	2,6	0,9	3,6	1,3	4,0	1,5
Максимум U_1 , кВ	117	118	117	120	117	120	117	122
Минимум U_1 , кВ	111	116	104	115	98	114	96	115

Максимальные величины коэффициентов несимметрии при использовании КЛ меньше по сравнению с ВЛ в 3,3–5,0 раз, а средние значения – в 2,8–3,0 раз.

Большая емкость кабельной линии, способствующая снижению максимальных токов головной ЛЭП, приводит к увеличению их средних значений (рис. 6а). Из-за этого растут потери мощности в линиях, что показано на рис. 6б для ЛЭП 1. Относительные потери энергии $\square W^*$ в головной ЛЭП в схеме с КЛ на 2,5 % больше по сравнению с воздушной линией. При повышении загрузки ЛЭП величины $\square W^*$ в СЭЖД со СПЭК будут снижаться. Так, например, при транзите мощности по питающей ЛЭП 10 + j10 МВ · А прирост $\square W^*$ уменьшается до 1,4 %.

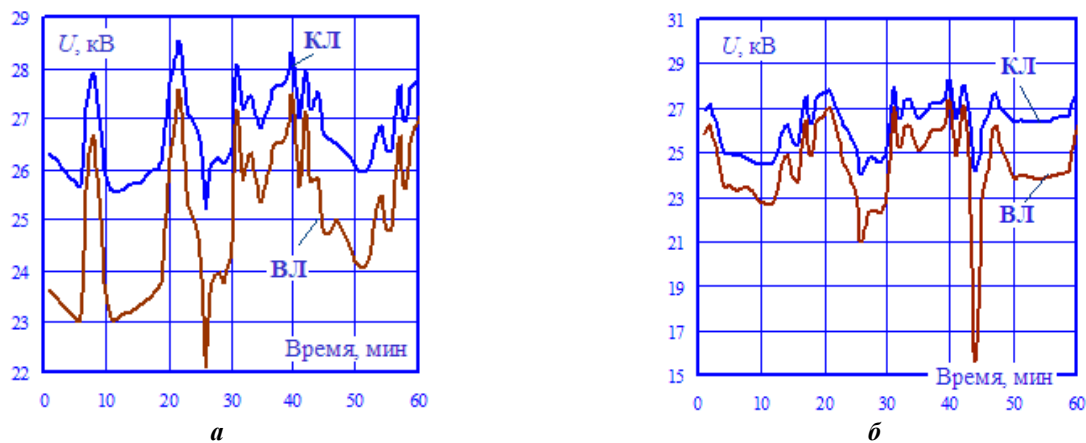


Рис. 3. Напряжения на пантографах электровозов:
первый поезд нечетного направления (а); первый поезд четного направления (б) /
Fig. 3. Voltages on pantographs of electric locomotives:
the first train of the odd direction (a); the first train of the even direction (b)

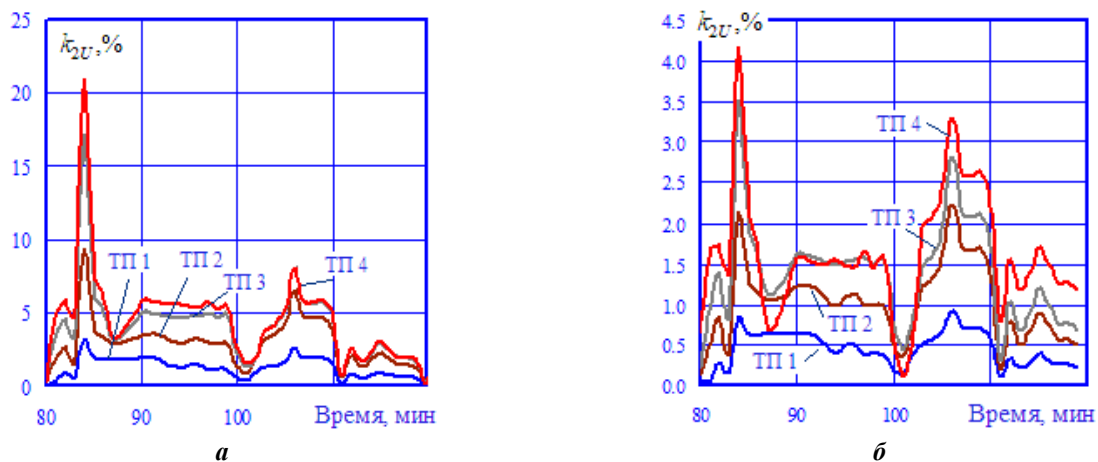


Рис. 4. Динамика коэффициентов несимметрии: ВЛ (а); КЛ (б) /
Fig. 4. Dynamics of the asymmetry coefficients: VL (a); KL (b)

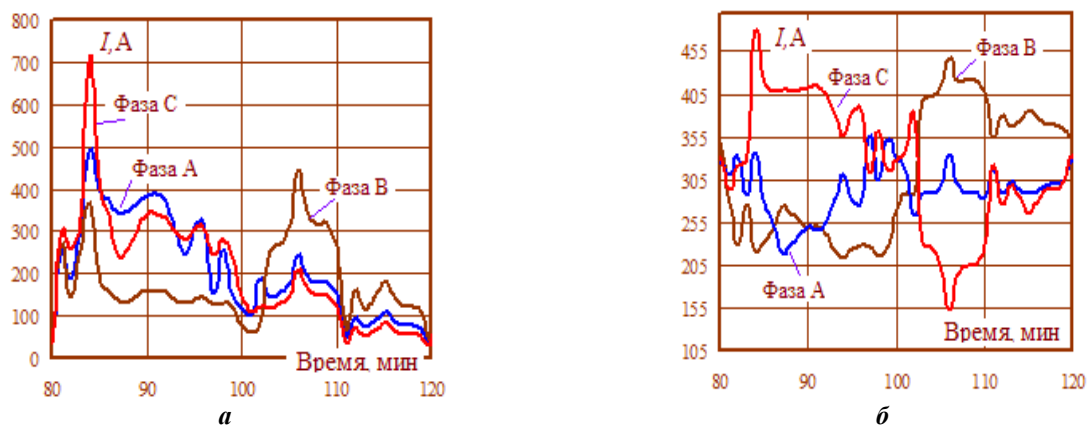


Рис. 5. Динамика изменений токов головной ЛЭП: ВЛ (а); КЛ (б) / Fig. 5. Dynamics of changes in the currents of the head power line: VL (a); KL (b)

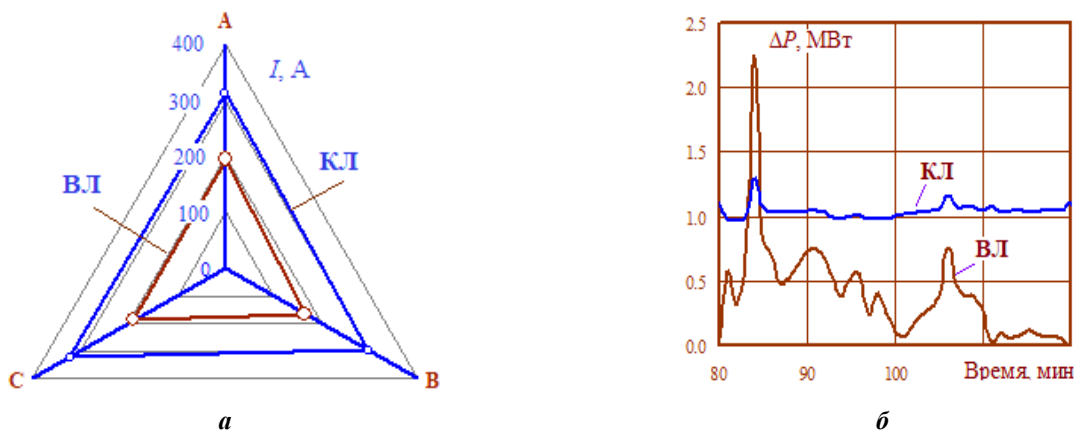


Рис. 6. Средние значения токов на отправном конце ЛЭП 1 (а) и динамика изменения потерь мощности в этой линии (б) / Fig. 6. Average values of currents at the starting end of the power line 1 (a) and the dynamics of changes in power losses in this line (b)

Заключение / Conclusion. Сопоставление воздушной линии 110 кВ с проводами АС-300 и КЛ аналогичного сечения показало, что в случае КЛ примерно на 75 % снижены среднеквадратичные отклонения напряжений на токоприемниках электровозов. В 3–5 раз уменьшается несимметрия по обратной последовательности на шинах 110 кВ тяговых подстанций, однако за счет емкостной генерации КЛ повышаются токи при малых нагрузках и потери в ЛЭП.

Разработанные цифровые модели элементов электроэнергетических систем, включая кабельные линии, достаточно универсальны и могут использоваться для определения режимов СЭЖД с тяговыми сетями различных конструкций, например, с перспективными ТС трехфазного исполнения [18].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бадалян Н. П., Колесник Г. П., Чашин Е. А. Заземление экрана однофазных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 63–78.
2. Кудаярова А. А., Хузина Л. Н. Проблема выбора способа заземления металлических экранов // Электротехнические комплексы и системы. Уфа, 2017. С. 214–219.
3. Зотова М. В., Смирнов Е. В., Смирнова А. Г. Заземление экранов однофазных кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Электроэнергетика глазами молодежи. Иваново: ИГЭУ, 2015. С. 458–461.
4. Голдобин Д. А., Шумахер Е. Е. Нормальные и аварийные режимы кабельных линий 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 8-1(86). С. 103–111.
5. Дмитриев М. В. Особенности передачи мощности по протяженным КЛ 6–500 кВ переменного напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 2(41). С. 52–59.
6. Дмитриев М. В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Политех-Пресс, 2021. 688 с.

7. Дмитриев М. В. Продольные параметры кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 1(46). С. 84–90.
8. Дмитриев М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.
9. Неугодников И. П., Косяков А. А. Автоматизация расчета силовых кабелей 6-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена // Железнодорожный транспорт. 2013. № 4(10). С. 12–16.
10. Lee S.-B. et al. Development of 250kV HVDC XLPE cable system in Korea, Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Niigata, Japan, 2014. 334-337, doi: 10.1109/ISEIM.2014.6870787.
11. Qin S. et al. Simulation Study on Influence of Cable Tunnel Shape on Temperature Rise of XLPE Cable, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961379.
12. Su B. et al. Insulation Fault Detection and Optimization System of High Voltage XLPE Cable Sheath. 2021. 131-134. doi:10.1109/ICICAS53977.2021.00032.
13. Adhikari N. Studies on the Characteristics of Partial Discharges in High-Voltage XLPE Cable Joints exposed to Lightning Impulse Voltages, 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichirappalli, India, 2023. 1-5, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157592.
14. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
15. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / под ред. А.В. Крюкова. Иркутск: ИрГУПС. 2010. 160 с.
16. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование многопроводных систем с одножильными экранированными кабелями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 4(16). С. 63–66.
17. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование режимов электрических сетей с высоковольтными коаксиальными кабелями // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 1(74). С. 42–57.
18. Моделирование трехфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, А. В. Черепанов [и др.]; под ред. А. В. Крюкова. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. 170 с.
19. Мокеев А. В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации // Электрические станции. 2007. № 6. С. 60–61.
20. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Алгоритмы определения параметров элементов электроэнергетических систем на основе пофазных измерений. М.: Директ-Медиа, 2023. 222 с.

REFERENCES

1. Badalyan NP, Kolesnik GP, Chashchin EA. Grounding the screen of single-phase power cables with cross-linked polyethylene insulation. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. electrical engineering, information technology, control systems. 2019;30:63-78. (In Russ.)
2. Kudayarova AA, Khuzina LN. The problem of choosing a method for grounding metal screens. Electrotechnical complexes and systems. Ufa; 2017. P. 214-219. (In Russ.)
3. Zotova MV, Smirnov EV, Smirnova AG. Grounding of screens of single-phase high voltage cables with cross-linked polyethylene insulation. Electric power industry through the eyes of youth. Ivanovo: ISUE; 2015. P. 458-461. (In Russ.)
4. Goldobin DA, Schumacher EE. Normal and emergency modes of 110 kV cable lines with polyethylene insulation. International scientific research journal. 2019;8-1(86):103-111. (In Russ.)
5. Dmitriev MV. Features of power transmission over long cable lines of 6-500 kV alternating voltage. Electricity. Transmission and distribution. 2017;2(41): 52-59. (In Russ.)
6. Dmitriev MV. High voltage cable lines. Saint Petersburg: Politech publishing; 2021. 688 p. (In Russ.)
7. Dmitriev MV. Longitudinal parameters of cable lines 6-500 kV with single-phase cables. Electricity. Transmission and distribution. 2018;1(46):84-90. (In Russ.)
8. Dmitriev MV. Screen grounding of single-phase power cables. Saint-Petersburg: Politech publishing; 2010. 152 p. (In Russ.)
9. Neugodnikov IP., Kosyakov AA. Automation of calculation of 6-500 kV power cables with cross-linked polyethylene insulation. Railway transport. 2013;4(10):12-16. (In Russ.)
10. Lee S.-B. et al. Development of 250kV HVDC XLPE cable system in Korea, Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Niigata, Japan, 2014. 334-337, doi: 10.1109/ISEIM.2014.6870787.
11. Qin S. et al. Simulation Study on Influence of Cable Tunnel Shape on Temperature Rise of XLPE Cable, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961379.
12. Su B. et al. Insulation Fault Detection and Optimization System of High Voltage XLPE Cable Sheath. 2021. 131-134. doi:10.1109/ICICAS53977.2021.00032.
13. Adhikari N. Studies on the Characteristics of Partial Discharges in High-Voltage XLPE Cable Joints exposed to Lightning Impulse Voltages, 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichirappalli, India, 2023. 1-5, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157592.

14. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkut Publishing House Univ.; 2005. 273 p. (In Russ.)
15. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways. Irkutsk; 2010. 160 p. (In Russ.)
16. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Modeling of multi-wire systems with single-core shielded cables. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2007;4(16):63-66. (In Russ.)
17. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Modeling the modes of electrical networks with high-voltage coaxial cables. News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System. 2016;1(74):42-57. (In Russ.)
18. Modeling of three-phase AC traction power supply systems for railways: monograph / AV Kryukov, VP Zakaryukin, AV Cherepanov [etc.]. Ekaterinburg, 2023. 170 p. (In Russ.)
19. Mokeev AV. Development and implementation of systems for collecting telemechanical information. *Electric stations*. 2007;6:60-61. (In Russ.)
20. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Algorithms for determining the parameters of elements of electrical power systems based on phase-by-phase measurements. Moscow: Direct-Media; 2023. 222 p. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Васильевич Крюков – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Константин Витальевич Суслов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Александр Валерьевич Черепанов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетика транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.

Илья Анатольевич Фесак – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения.

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Васильевич Крюков – разработка методов и средств моделирования. Принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Константин Витальевич Суслов – постановка задач исследования, анализ полученных результатов.

Александр Валерьевич Черепанов – разработка и настройка моделей, анализ полученных результатов.

Илья Анатольевич Фесак – проведение моделирования и обработка полученных результатов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov – Dr. Sci. (Tech.), 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.

Konstantin V. Suslov – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI"; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University.

Alexander V. Cherepanov – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University.

Ilya A. Fesak – Graduate Student of Irkutsk State Transport University.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov – development of methods and modeling tools. Taking responsibility for all aspects of work, integrity all parts of the article and its final version ‘

Konstantin V. Suslov – formulation of research problems, analysis of the results obtained.

Alexander V. Cherepanov– development and tuning of models, analysis of the results obtained.

Ilya A. Fesak – carrying out modeling and processing the results obtained.