

Применение линий электропередачи с резервными проводами в системах электроснабжения железных дорог

А.В. Крюков^{1,2}, А.В. Черепанов¹✉, И.А. Фесак¹

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

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

✉smart_grid@mail.ru

Резюме

Рассмотрены две конструкции линий электропередач: с одним и тремя резервными проводами. Для сравнения выполнено моделирование питающей сети с типовой линией электропередачи. На их основе определялись серии режимов с нагрузками, создаваемыми при движении пяти грузовых поездов массой 5 000 т в четном и нечетном направлениях. Расчеты осуществлялись на основной частоте и частотах канонических высших гармоник: 3, 5, 7, ... 39. Также проведено моделирование тепловых процессов и построены временные зависимости температур нагрева проводов линий электропередач. Для анализа энергоэффективности вычислялись потери активной мощности в линии электропередачи, с целью оценки условий безопасности рассчитаны ее электромагнитные поля. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: применение линии электропередачи с резервными проводами способствует повышению минимального напряжения на пантографах на 2,5–3 %; по сравнению с типовой линией электропередачи средние значения напряжений линии с одним резервным проводом увеличиваются на 0,4–2,4 %; для линии электропередачи с тремя резервными проводами эти показатели лежат в пределах 1,4–3,2 %. Использование линии электропередачи с резервными проводами помогает снизить коэффициенты несимметрии по обратной последовательности для тяговой подстанции, наиболее удаленной от источника питания. Для линии электропередачи с одним резервным проводом несимметрия снижается на 5,5 %, а при трех резервных проводах – на 29 %. Разработанные цифровые модели могут применяться на практике при выборе средств повышения надежности электроснабжения тяговых подстанций переменного тока.

Ключевые слова

системы электроснабжения тяговых подстанций, линии электропередачи с резервными проводами, моделирование

Для цитирования

Крюков А.В. Применение линий электропередачи с резервными проводами в системах электроснабжения железных дорог / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, И.А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1 (81). С. 82–93. DOI 10.26731/1813-9108.2024.1(81).82-93.

Информация о статье

поступила в редакцию: 07.02.2024 г.; поступила после рецензирования: 01.03.2024 г.; принята к публикации: 04.03.2024 г.

Благодарность

Исследования выполнены 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»

Application of power lines with backup wires in railway power supply systems

A.V. Kryukov^{1,2}, A.V. Cherepanov¹✉, I.A. Fesak¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

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

✉smart_grid@mail.ru

Abstract

Two designs of power lines are considered: with one and three backup wires. For comparison, a simulation of the supply network with a typical power line was performed. Based on it, a series of modes were determined, with loads created when five freight trains weighing 5 000 tons were moving in even and odd directions. Calculations were performed at the fundamental frequency and the frequencies of the canonical higher harmonics: 3, 5, 7, ... 39. Thermal processes were also simulated and time dependences of heating temperatures of power line wires were constructed. To analyze energy efficiency, active power losses in power transmission lines were calculated. In order to assess the safety conditions, calculations of the electromagnetic fields of the power line were carried out. The results obtained allowed to draw the following conclusions: the use of a power line with backup wires allows to increase the minimum voltage on pantographs by 2.5–3%; as compared with a typical power line, the average voltage values of a line with one

backup wire increase by 0.4–2.4 % while for a power line with three backup wires, these indicators lie in the range of 1.4–3.2 %. The use of a power line with backup wires allows to reduce the coefficients of asymmetry in the reverse sequence for the traction substation furthest from the power source. For a power line with one backup wire, the asymmetry is reduced by 5.5 %, while for three backup wires it's 29 %. The developed digital models can be applied in practice when choosing means to increase the reliability of power supply to AC traction substations.

Keywords

power supply systems for traction substations, power lines with backup wires, modeling

For citation

Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Fesak I.A. Primenenie linii elektroperedachi s rezervnymi provodami v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznikh dorog [Application of power lines with backup wires in railway power supply systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 1(81), pp. 82–93. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.1(81).82-93.

Article Info

Received: February 7, 2024; Revised: March 1, 2024; Accepted: March 4, 2024.

Acknowledgement

The research 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

Эффективность процессов перевозок грузов и пассажиров по железным дорогам невозможно обеспечить без высокого уровня надежности электроснабжения тяговых подстанций (ТП) [1]. Основной способ решения этой задачи состоит в использовании резервирования. Так, для питания ТП переменного тока применяются двухцепные линии электропередачи (ЛЭП) 110–220 кВ или две ЛЭП, расположенные на отдельных опорах, подключенные на отправном и приемном концах к опорным подстанциям электроэнергетической системы (ЭЭС).

Альтернативный способ повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей состоит в использовании ЛЭП

специальной конструкции, оборудованных резервными проводами (РП) [2–4]. Изучению таких ЛЭП посвящено значительное число работ. Например, в [5] предложено использовать в качестве РП грозозащитный трос (ГЗ). Результаты исследования ЛЭП с таким ГЗ приведены в [6–9]. Инновационная линия с резервной фазой описана в [10], ЛЭП с тремя РП рассмотрены в [11–16].

Цель представленных в статье исследований заключалась в разработке цифровых моделей для определения режимов электрических сетей, питающих ТП. Предполагалось, что часть ЛЭП оборудована РП, за счет которых обеспечивается быстрое восстановление электроснабжения при возникновении однофазных



Рис. 1. Схема электрической сети, питающей тяговые подстанции

Fig. 1. Diagram of the electrical network feeding traction substations

ЭЭС – electric energy system; ЛЭП – power transmission line; ТП – traction substation

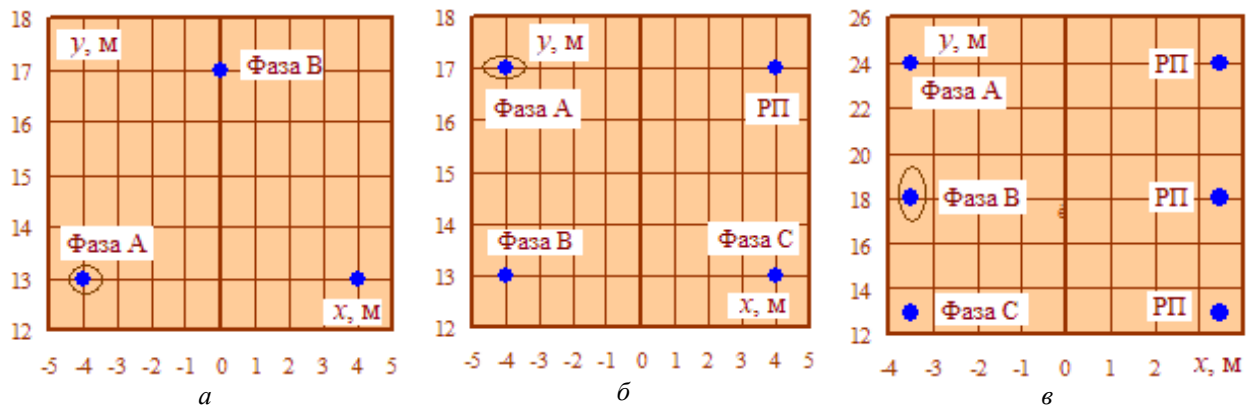


Рис. 2. Координаты токоведущих частей:

a – типовая линия электропередачи; *б* – линия электропередачи с одним резервным проводом;

в – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 2. Coordinates of live parts:

a – typical power transmission line; *b* – power line with one backup wire; *c* – power line with three backup wires

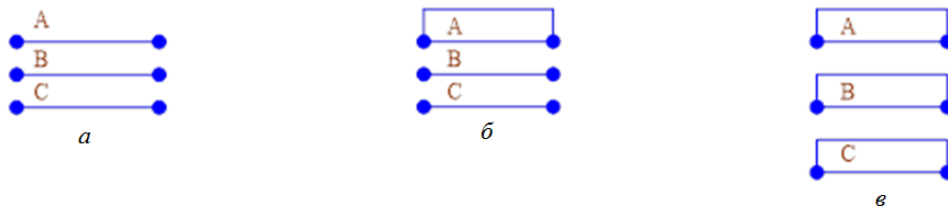


Рис. 3. Схемы соединений проводов в нормальном режиме:

a – типовая линия электропередачи; *б* – линия электропередачи с одним резервным проводом;

в – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 3. Wire connection diagrams in normal mode:

a – typical power transmission line; *b* – power line with one backup wire; *c* – power line with three backup wires



Рис. 4. Схемы соединений в послеаварийном режиме при отключении провода фазы А:

a – линия электропередачи с одним резервным проводом; *б* – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 4. Connection diagrams in post-emergency mode with phase A wire disconnected:

a – power line with one backup wire; *b* – power line with three backup wires

коротких замыканий; при этом отключенный провод поврежденной фазы автоматически заменяется на резервный. Модели были реализованы в программном комплексе Fazonord [17, 18] версии 5.3.3.0-2024.

Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось для электрической сети 220 кВ (рис. 1), питающей ТП железной дороги переменного тока. Пред-

полагалось, что головная ЛЭП 1 может быть реализована в трех вариантах: ЛЭП типовой конструкции (рис. 2, *a*; 3, *a*); линия с одним РП (рис. 2, *б*; 3, *б*; 4, *a*); ЛЭП с тремя РП (рис. 2, *в*; 3, *в*; 4, *б*) [11].

В нормальном режиме ЛЭП с одним РП его подключение происходит параллельно проводу рабочей фазы линии (см. рис. 3, *б*). При возникновении однофазного короткого замыкания (КЗ) поврежденная фаза отключается и

вместо нее используется РП (см. рис. 4, *а*), в качестве которого может выступать любая из токоведущих частей фазы с параллельными проводами [10].

Линия с тремя РП в нормальном режиме работает как ЛЭП с расщепленными на два провода фазами (см. рис. 3, *в*). В аварийном режиме на место поврежденной фазы включаются три РП, соединенных параллельно (см. рис. 4, *б*). Технология необходимых коммутаций описана в [12].

Для оценки эффективности применения ЛЭП с резервными проводами для систем электроснабжения железных дорог в программном комплексе Fazonord (версия 5.3.3.0-2024) проведено моделирование серии режимов сети (см. рис. 1) с нагрузками, создаваемыми при движении пяти грузовых поездов массой 5 000 т в четном и нечетном направлениях (рис. 5, 6).

Результаты моделирования представлены в табл. 1–4 и на рис. 7–16. На рис. 7 показаны графики, характеризующие изменения напря-

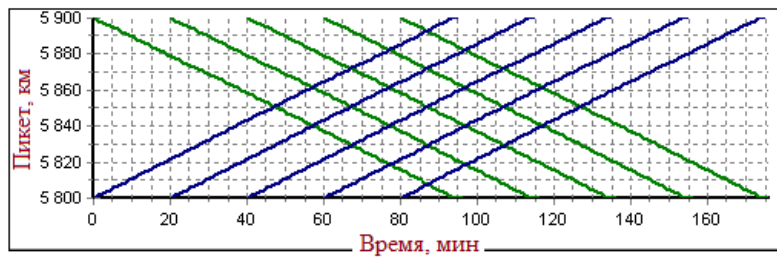


Рис. 5. График движения
Fig. 5. Traffic schedule

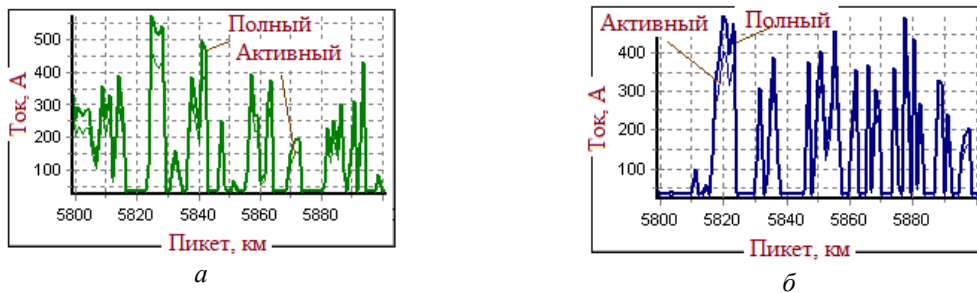


Рис. 6. Токвые профили поездов массой 5 000 т:
а – нечетное направление; *б* – четное направление
Fig. 6. Current profiles of trains weighing 5 000 tons:
a – odd direction; *b* – even direction

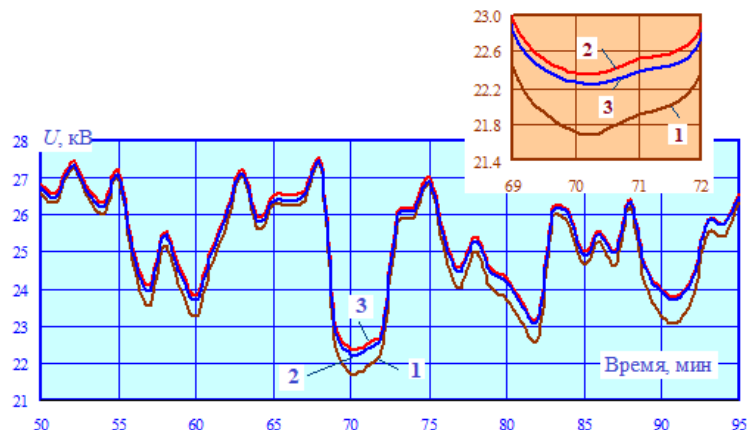


Рис. 7. Напряжения на пантографах электровозов:
1 – типовая линия электропередачи; *2* – линия электропередачи с одним резервным проводом;
3 – линия электропередачи с тремя резервными проводами
Fig. 7. Voltages on pantographs of electric locomotives:
1 – typical power line; *2* – power line with one backup wire; *3* – power line with three backup wires

жений на пантографе электровоза первого поезда. Сводные данные представлены в табл. 1. Анализ полученных результатов дает возможность сделать вывод, что применение ЛЭП с РП позволяет повысить минимальное напряжение на пантографах электровозов на 2,5–3 %.

На рис. 8 и 9 и в табл. 2 приведены результаты определения напряжений на приемном конце ЛЭП 1 для трех указанных вариантов ее исполнения. Полученные данные показывают, что по сравнению с типовой ЛЭП средние значения напряжений линии с одним РП увеличи-

Таблица 1. Сводные данные по напряжениям на пантографах
Table 1. Summary of stresses on pantographs

№	Конструктивное исполнение Design	Показатель Indicator		
		Минимум Minimum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum
1	Типовая линия электропередачи Typical power line	21,72	25,55	27,29
2	Линия электропередачи с одним резервным проводом Power line with one backup wire	22,36	25,83	27,44
3	Линия электропередачи с тремя резервными проводами Power line with three backup wires	22,26	25,76	27,34
4	Различие между строками 1 и 2, % Difference between lines 1 and 2, %	-2,99	-1,09	-0,54
5	Различие между строками 1 и 3, % Difference between lines 1 and 3, %	-2,51	-0,83	-0,18

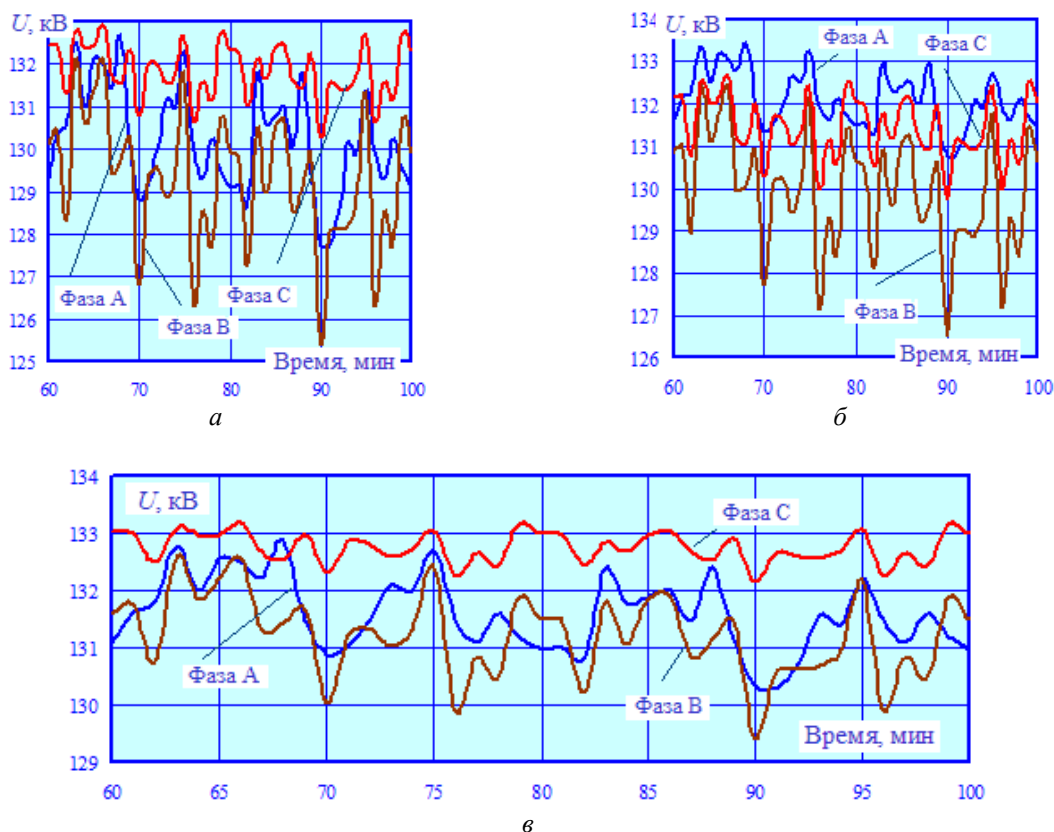


Рис. 8. Изменения напряжений на приемном конце головной линии электропередач, вызванные вариациями тяговых нагрузок:

a – типовая линия электропередачи; *б* – линия электропередачи с одним резервным проводом;
в – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 8. Changes in voltage at the receiving end of the head power line, caused by variations in traction loads:
a – typical power transmission line; *b* – power line with one backup wire; *c* – power line with three backup wires

ваются на 2,4 % по фазе А, на 1 % по В и 0,4 % по С. Для линии с тремя РП эти показатели равны: 2,1, 3,2 и 1,4 % соответственно. Размах колебаний S_c напряжений по фазам А и В для ЛЭП с одним РП уменьшается на 45 и 11 % соответственно, а для линии с тремя РП – на 48 и 51 %. Для фазы С наблюдается повышение этого показателя на 18 %. Для линии с тремя РП S_c по все фазам уменьшается на 48–59 %.

На рис. 10 и 11 и в табл. 3 представлены результаты определения потерь активной мощно-

сти в ЛЭП 1 для трех рассматриваемых вариантов ее исполнения. Полученные данные позволяют сделать вывод, что за счет применения резервных проводов повышается энергоэффективность транспорта электроэнергии к тяговым подстанциям: по сравнению с типовой ЛЭП потери в линии с одним РП снижаются на 30 %, а при трех резервных проводах – на 57 %.

На рис. 12 и 13 и в табл. 4 приведены результаты определения несимметрии на выводах 220 кВ тяговых подстанций.

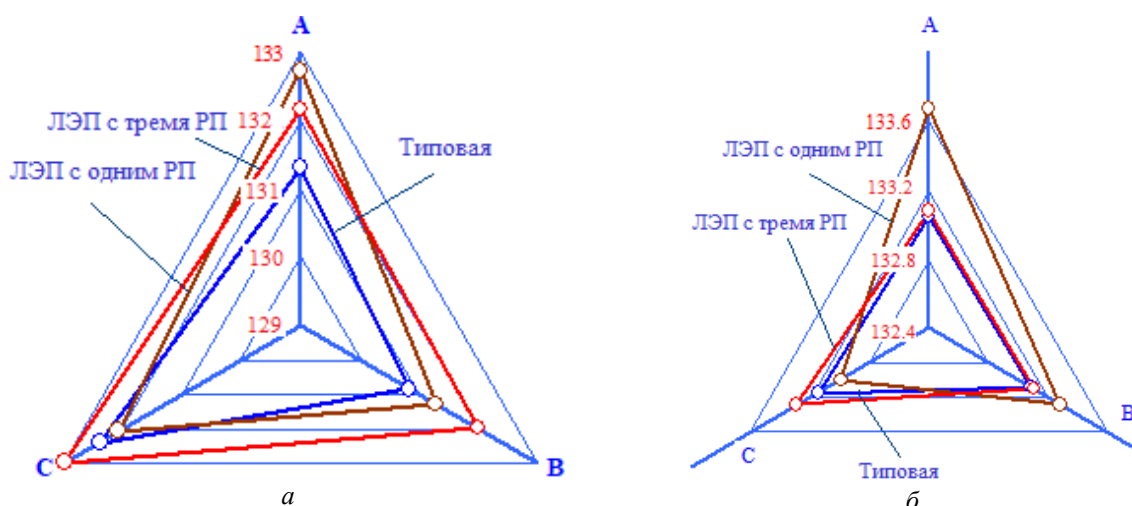


Рис. 9. Значения напряжений на приемном конце головной линии электропередачи:

a – средние; *b* – максимальные

Fig. 9. Voltage values at the receiving end of the head power line:

a – average; *b* – maximum

Таблица 2. Сводные данные по результатам моделирования фазных напряжений на приемном конце головной линии электропередачи, кВ

Table 2. Summary of phase voltage modeling results at the receiving end of the main power line, kV

Показатель Indicator	Конструкция линии электропередачи Power transmission line design								
	Типовая Typical			С одним резервным проводом With one backup wire			С тремя резервными проводами With three backup wires		
	Фаза Phase								
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Минимум Minimum	127,73	125,45	130,30	130,80	126,56	129,76	130,30	129,42	132,14
Среднее значение Average value	131,32	130,83	132,39	132,72	131,30	132,08	132,16	131,97	132,96
Максимум Maximum	133,05	133,09	133,15	133,67	133,28	132,99	133,08	133,10	133,29
Размах Span	5,32	7,64	2,85	2,88	6,72	3,24	2,78	3,68	1,15
Среднеквадратичное отклонение RMS deviation	1,30	1,58	0,60	0,71	1,41	0,72	0,68	0,77	0,25

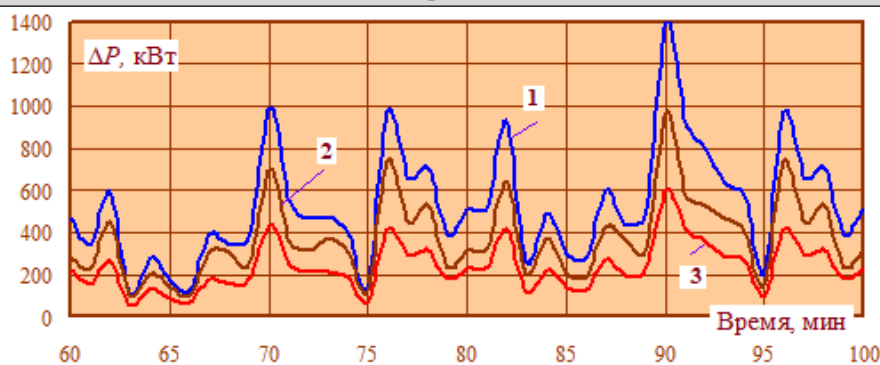


Рис. 10. Потери в головной линии электропередач

Fig. 10. Losses in the main power line



Рис. 11. Максимумы и средние значения потерь в головной линии электропередачи

Fig. 11. Maximum and average values of losses in the head power line

Таблица 3. Сводные данные по результатам потерь в головной линии электропередачи, кВт

Table 3. Maximum and average values of losses in the head power line

Показатель Indicator	Конструкция линии электропередачи Transmission line design			Различие, % Difference, %	
	Типовая Typical	С одним резервным проводом With one backup wire	С тремя резервными проводами With three backup wires	Между столбцами 2 и 3 Between columns 2 and 3	Между столбцами 2 и 4 Between columns 2 and 4
1	2	3	4	5	6
Среднее значение Average value	299,10	222,06	140,43	25,76	53,05
Максимум Maximum	1 394,00	967,00	603,00	30,63	56,74

Таблица 4. Максимумы коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций

Table 4. Maximum asymmetry coefficients on busbars of 220 kV traction substations

Тяговая подстан- ция Traction substation	Конструкция линии электропередачи Transmission line design			Различие, % Difference, %	
	Типо- вая Typical	С одним резервным проводом With one backup wire	С тремя резервными проводами With three backup wires	Между столбца- ми 2 и 3 Between columns 2 and 3	Между столбца- ми 2 и 4 Between columns 2 and 4
1	2	3	4	5	6
ТП 1	2,11	1,85	1,10	12,32	47,87
ТП 2	3,48	3,26	2,29	6,32	34,20
ТП 3	4,36	4,12	3,09	5,50	29,13

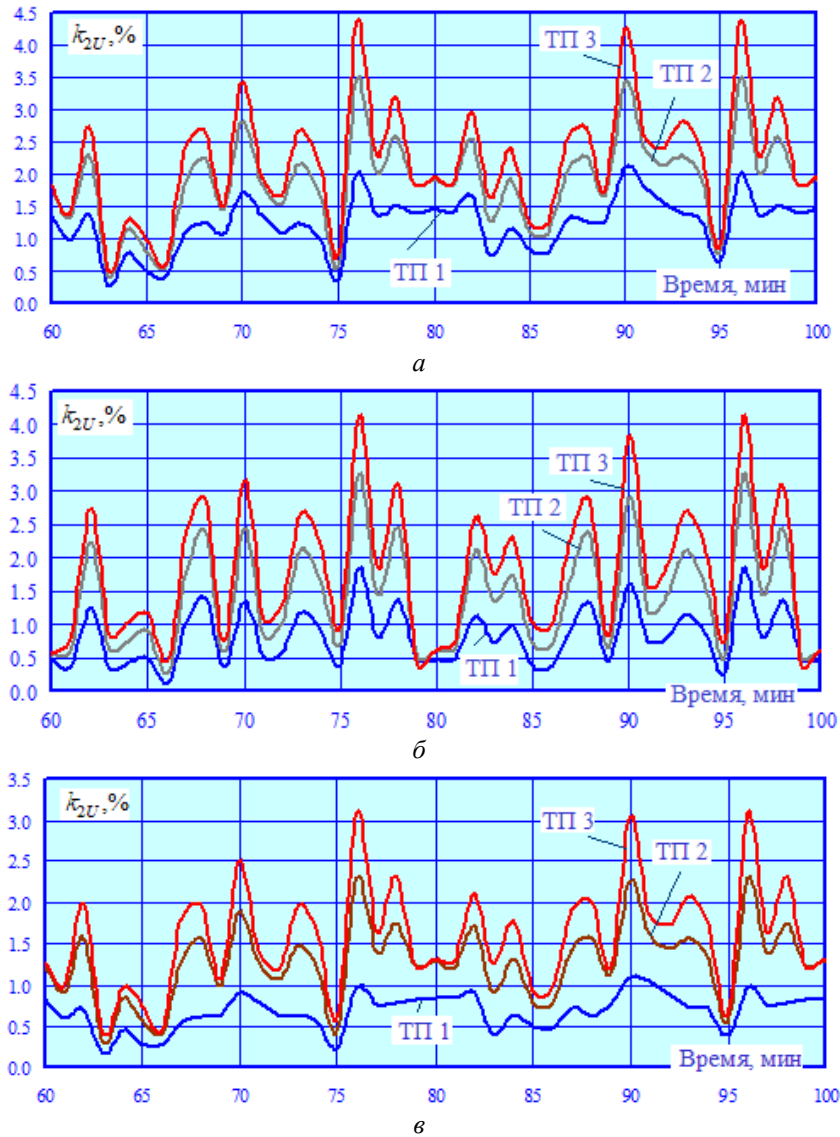


Рис. 12. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ тяговых подстанций:
 а – типовая линия электропередачи; б – линия электропередачи с одним резервным проводом;
 в – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 12. Negative sequence asymmetry coefficients on buses of 220 kV traction substations:
 a – typical power transmission line; б – power line with one backup wire;
 c – power line with three backup wires

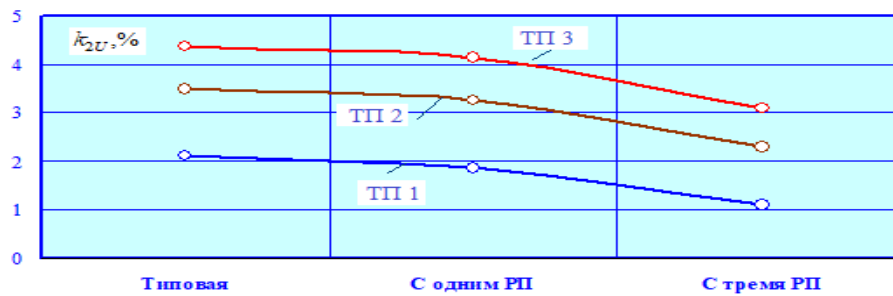


Рис. 13. Максимумы коэффициентов k_{2U}
Fig. 13. Maximum of k_{2U} coefficients

Полученные результаты дают возможность сделать вывод, что применение ЛЭП с одним РП позволяет снизить коэффициент k_{2U} на 5,5–12 %, а при наличии трех РП – на 29–48 %.

На рис. 14 приведены результаты определения температур нагрева проводов головной ЛЭП. Из него видно, что наименьшие значения этих показателей наблюдаются для ЛЭП с тремя РП.

На рис. 15 приведены результаты моделирования условий электромагнитной безопасности на трассе головной ЛЭП 220 кВ. Из анализа представленных зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. В точке с координатой $z = 0$ максимум напряженности электрического поля ЛЭП с одним РП уменьшается по сравнению с линией типовой конструкции на 48 %; для ЛЭП с тремя РП этот показатель равен 7 %.

2. Максимум напряженности магнитного поля ЛЭП с одним РП повышается по сравнению с типовой линией на 50 % а для ЛЭП с тремя РП этот показатель снижается на 8 %.

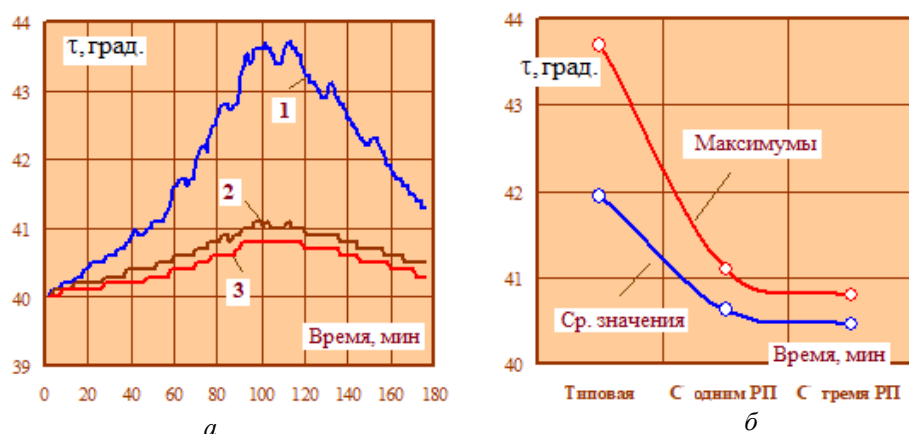


Рис. 14. Температуры нагрева проводов, выделенных на рис. 2 овалом:

a – временные зависимости; b – средние значения и максимумы

(1 – типовая линия электропередачи; 2 – линия электропередачи с одним резервным проводом; 3 – линия электропередачи с тремя резервными проводами)

Fig. 14. Heating temperatures of the wires highlighted in Fig. 2 by an oval:

a – time dependencies; b – average values and maximums

(1 – standard power line; 2 – power line with one backup wire; 3 – power line with three backup wires)

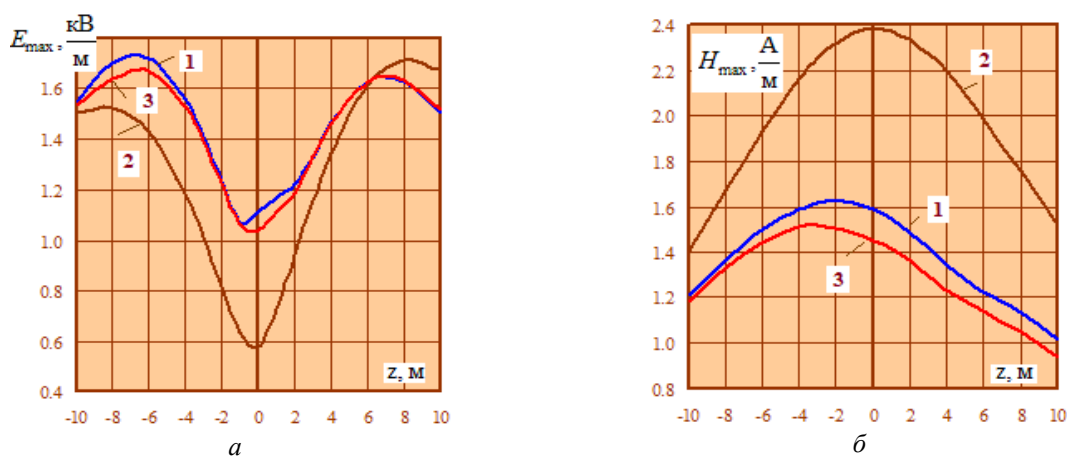


Рис. 15. Зависимости максимумов амплитуд напряженностей электрического (a) и магнитного (b) полей на высоте 1,8 м от координаты z оси, расположенной перпендикулярно трассе линии:

1 – типовая линия электропередачи; 2 – линия электропередачи с одним резервным проводом;

3 – линия электропередачи с тремя резервными проводами

Fig. 15. Dependences of the maximum amplitudes of the electric (a) and magnetic (b) field strengths at a height of 1,8 m from the z -axis coordinate located perpendicular to the line route:

1 – typical power line; 2 – power line with one backup wire; 3 – power line with three backup wires



Рис. 16. Максимумы и средние значения суммарных коэффициентов гармоник
Fig. 16. Maximum and average values of total harmonic coefficients

На рис. 16 представлены результаты моделирования несинусоидальных режимов для фазы на приемном конце головной ЛЭП. На их основе может быть сделан вывод, что по сравнению с типовой ЛЭП средние значения суммарных коэффициентов гармоник для линии с одним РП снижаются на 35 %, а максимумы – на 40 %. Аналогичные показатели для ЛЭП с тремя РП – 37 % и 41 %.

Заключение

Разработаны цифровые модели для определения режимов электрических сетей, питающих ТП, при наличии ЛЭП, оборудованных РП. За счет них обеспечивается быстрое восстановление электроснабжения при возникновении

однофазных коротких замыканий, при этом отключенный провод поврежденной фазы автоматически заменяется на резервный. Рассмотрены два вида таких ЛЭП: с одним и тремя РП. Для сравнения выполнено моделирование питающей сети с ЛЭП типовой конструкции.

Результаты расчетов показали, что применение резервных проводов позволяет улучшить качество электроэнергии по несимметрии и гармоническим искажениям, а также снизить потери активной мощности.

Разработанные модели могут применяться на практике при выборе средств повышения надежности электроснабжения ТП переменного тока.

Список литературы

1. Третьяков Е.А., Денисов И.Н., Истомин С.Г. Интеллектуальная система координированного управления тяговым подвижным составом и энергетической инфраструктурой железных дорог // Актуальные теоретико-методологические и прикладные проблемы виртуальной реальности и искусственного интеллекта : материалы Междунар. науч. конф. Хабаровск, 2021. С. 64–70.
2. Бушуев В.В., Красильникова Т.Г., Самородов Г.И. Дальние электропередачи переменного тока и их сравнительный анализ // Электро. 2012. № 2. С. 2–7.
3. Зильберман С.М. Пути обеспечения режимной надежности электропередач напряжением 500 кВ и выше // Электрические станции. № 5. 2009. С. 42–45.
4. Федин В.Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии. Минск : БНТУ, 2012. 222 с.
5. Жанаев Д.Т., Заславская Т.Б. Линии электропередач с резервной фазой. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1990. 120 с.
6. Использование грозозащитного троса в качестве резервной фазы на воздушных линиях электропередачи / Д.С. Левин, А.В. Карнаух, Д.А. Вырыханов и др. // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 4. № 3 (51). С. 76–81.
7. Левин Д.С., Угаров Г.Г. Эффективность применения резервной фазы на воздушных линиях электропередачи 110–330 кВ // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. 2012. № 4 (36). С. 168–172.
8. Левин Д.С. Режимы одноцепных воздушных линий электропередачи 110–330 кВ с использованием резервной фазы // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2013. Т. 13. № 1-2 (70-71). С. 93–96.
9. Левин Д.С., Вырыханов Д.А. Расчет и анализ режимов воздушных линий электропередачи с резервной фазой с учетом их пофазных различных распределенных параметров // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 2. № 2 (66). С. 86–92.
10. Красильникова Т.Г., Махмудов К.А., Новиков Н.Л. Инновационная линия СВН и ее основные показатели // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : сб. науч. ст. Вып. 73 : Надежность систем энергетики в условиях энергетического перехода. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2022. С. 143–152.
11. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой / А.С. Нестеров, М.П. Лебедев, В.П. Кобылин и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 45–48.

12. Нестеров А.С., Васильев П.Ф., Кобылин В.П. Анализ и расчет пропускной способности воздушных линий электропередачи // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 21–26.
13. Васильев П.Ф., Нестеров А.С., Кобылин В.П. Оценка надежности воздушной линии электропередачи с расщепленной резервной фазой // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. № 4. С. 294–298.
14. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи за счет резервирования фазных проводов / А.С. Нестеров, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов и др. // Actualscience. 2016. Т. 2. № 11. С. 15–17.
15. Vasil'ev P.F., Nesterov A.S., Khoiutanov A.M. Overhead Power Line with Backup Split-Phase // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934844.
16. Vasil'ev P.F., Nesterov A.S., Maleeva E.I. Increasing the Capacity of the Double-Circuit Transmission Line in Emergency Mode // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2019. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934821.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИРГУПС, 2005. 273 с.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.

References

1. Tret'yakov E.A., Denisov I.N., Istomin S.G. Intellektual'naya sistema koordinirovannogo upravleniya tyagovym podvizhnym sostavom i energeticheskoi infrastrukturoi zheleznnykh dorog [Intelligent system for coordinated control of traction rolling stock and energy infrastructure of railways]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Aktual'nye teoretiko-metodologicheskie i prikladnye problemy virtual'noi real'nosti i iskusstvennogo intellekta»* [Proceedings of the International Scientific Conference «Current theoretical, methodological and applied problems of virtual reality and artificial intelligence»]. Khabarovsk, 2021, pp. 64–70.
2. Bushuev V.V., Krasil'nikova T.G., Samorodov G.I. Dal'nie elektroperedachi peremennogo toka i ikh sravnitel'nyi analiz [Long-distance AC power transmission and their comparative analysis]. *Elektro* [Electro], 2012, no. 2, pp. 2–7.
3. Zil'berman S.M. [Ways to ensure operational reliability of power transmission voltages of 500 kV and higher]. [Electric stations], 2009, no. 5, pp. 42–45.
4. Fedin V.T. Innovatsionnye tekhnicheskie resheniya v sistemakh peredachi elektroenergii [Innovative technical solutions in power transmission systems]. Minsk: BNTU Publ., 2012. 222 p.
5. Zhanaev D.T., Zaslavskaya T.B. Linii elektroperedach s rezervnoi fazoi [Power lines with a backup phase]. Saratov: Saratovskii universitet Publ., 1990. 120 p.
6. Levin D.S., Karnaukh A.V., Vyrykhanov D.A., Ugarov G.G. Ispol'zovanie grozozashchitnogo trosa v kachestve rezervnoi fazy na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Using a lightning protection cable as a backup phase on overhead power lines]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2010, vol. 4, no. 3 (51), pp. 76–81.
7. Levin D.S., Ugarov G.G. Effektivnost' primeneniya rezervnoi fazy na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi 110–330 kV [Efficiency of using the reserve phase on overhead power lines 110–330 kV]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2012, no. 4 (36), pp. 168–172.
8. Levin D.S. Rezhimy odnotsepykh vozdushnykh linii elektroperedachi 110–330 kV s ispol'zovaniem rezervnoi fazy [Modes of single-circuit overhead power lines 110–330 kV using a backup phase]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2013, vol. 13, no. 1-2 (70-71), pp. 93–96.
9. Levin D.S., Vyrykhanov D.A. Raschet i analiz rezhimov vozdushnykh linii elektroperedachi s rezervnoi fazoi s uchedom ikh pofazno razlichnykh raspredelennykh parametrov [Calculation and analysis of modes of overhead power lines with a backup phase, taking into account their phase-by-phase different distributed parameters]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2012, vol. 2, no. 2 (66), pp. 86–92.
10. Krasil'nikova T.G., Makhmudov K.A., Novikov N.L. Innovatsionnaya liniya SVN i ee osnovnye pokazateli [Innovative HVV line and its main indicators]. Materialy 94-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar «Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki» [Proceedings of the 94th meeting of the International Scientific Seminar «Methodological issues in studying the reliability of large energy systems»]. Irkutsk, 2022, pp. 143–152.
11. Nesterov A.S., Lebedev M.P., Kobylin V.P., Vasil'ev P.F., Davydov G.I., Khoiutanov A.M. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii vozdushnykh linii elektroperedachi s rezervnoi fazoi [Increasing the efficiency of operation of overhead power lines with a backup phase]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 45–48.
12. Nesterov A.S., Vasil'ev P.F., Kobylin V.P. Analiz i raschet propusknoi sposobnosti vozdushnykh linii elektroperedachi [Analysis and calculation of the capacity of overhead power lines]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 21–26.
13. Vasil'ev P.F., Nesterov A.S., Kobylin V.P. [Assessing the reliability of an overhead power transmission line with a split backup phase]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and safety of energy], 2018, vol. 11, no. 4, pp. 294–298.
14. Nesterov A.S., Vasil'ev P.F., Davydov G.I., Khoiutanov A.M. Povyshenie propusknoi sposobnosti vozdushnykh linii elektroperedachi za schet rezervirovaniya faznykh provodov [Increasing the capacity of overhead power lines by reserving phase wires]. *Actualscience*, 2016, vol. 2, no. 11, pp. 15–17.

15. Vasil'ev P.F., Nesterov A.S., Khoiutanov A.M. Overhead Power Line with Backup Split-Phase. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934844

16. Vasil'ev P.F., Nesterov A.S., Maleeva E.I. Increasing the Capacity of the Double-Circuit Transmission Line in Emergency Mode. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2019. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934821.

17. Zakaryukin, V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moscow: Direkt-Media Publ., 2023. 156 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.

Черепанов Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Фесак Илья Анатольевич, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: fesakilya@yandex.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.

Alexandr V. Cherepanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Ilya A. Fesak, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: fesakilya@yandex.ru.