

Abstract

In electrical circuits adjacent to traction substations of AC railways, significant asymmetry of three-phase voltages can occur. At low short-circuit powers on 110–220 kV traction substation buses, the asymmetry coefficients in the reverse sequence can significantly exceed the maximum allowable values. An analysis of domestic and foreign publications allows to conclude that research aimed at solving the problem of reducing asymmetry in railway power supply systems is relevant. The proposed methods and means of solving this problem are characterized by multiple variants of approaches. Therefore, the choice of a technically rational solution method should be based on the results of modeling based on adequate digital models. To create such models, approach based on the use of phase coordinates can be used. The article presents the results of studies aimed at determining the technical efficiency of the use of traction power supply systems using transformers with open delta windings. Digital models have been developed providing simulation of complexly asymmetric and non-sinusoidal modes of such traction power supply systems. The simulation results showed that with small movement sizes, the efficiency of balancing in a circuit with an open delta windings transformer increases significantly as compared to a typical one. The coefficients of asymmetry in the reverse sequence k_{2U} decrease by 15–25 %. The maximum total harmonic coefficients at the inputs of 220 kV traction substations are reduced by 22–47 %. The final indicators for voltages on the current collectors of electric locomotives in both circuits differ by fractions of a percent, with the exception of the minimum of the even train voltage, which in the transformers with open delta windings circuits is lower than the similar indicator for a typical traction power supply system by about 3 %. In the circuit with open delta winding transformers, the maximum values of losses in power lines are reduced by 7 %, while in traction networks they increase by 16 %. Reduction of losses in power transmission lines is associated with the alignment of loads by phases. The increase in losses in the traction networks is caused by lower voltages in the circuit with open delta winding transformers as compared to a typical traction power supply system. Due to the decrease in voltages, currents increase, which results in an increase in the magnetic field strength. The developed digital models can be applied in practice when choosing means of balancing on road sections with traffic sizes that do not reach the capacity limits.

Keywords

traction power supply systems, transformers with windings, open triangle, modeling

For citation

Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Serezhkin D.A., Fesak I.A. Modelirovanie rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya, ispol'zuyushchei transformatory s obmotkami, soedinnennymi v otkrytyi treugol'nik [Modeling modes of a traction power supply system using transformers with windings connected in an open triangle]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 44–57. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).44-57.

Article info

Received: May 3, 2023; Revised: May 30, 2023; Accepted: May 31, 2023.

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 the modes of traction power supply systems of DC railways and electromagnetic fields at traction substations of AC railways».

Введение

В электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) железных дорог переменного тока, может возникать значительная несимметрия трехфазных напряжений, вызванная однофазными тяговыми нагрузками. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены результаты измерений коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ ТП Транссиба [1]. Номер у каждого графика, приведенного рис. 1, соответствует порядковому номеру часа измерений, отсчитываемому от 16.00 мск.

Из рис. 1 видно, что уровни несимметрии могут в 1,3–3,3 раза превышать предельно допустимое значение. Несимметричные режимы приводят к следующим негативным последствиям:

- нарушение технологических процессов, снижение качества выпускаемой продукции, уменьшение производительности рабочих механизмов;
- возрастание потерь электрической энергии;
- снижение надежности электроснабжения из-за ускоренного старения изоляции, а также сбоев в работе устройств релейной защиты и автоматики.

Поэтому задача разработки методов и средств уменьшения несимметрии в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, имеет несомненную актуальность.

Вопросам уменьшения уровней несимметрии в сетях, примыкающих к ТП, посвящено значительное число работ. Так, в статье [2] описаны технические решения, обес-

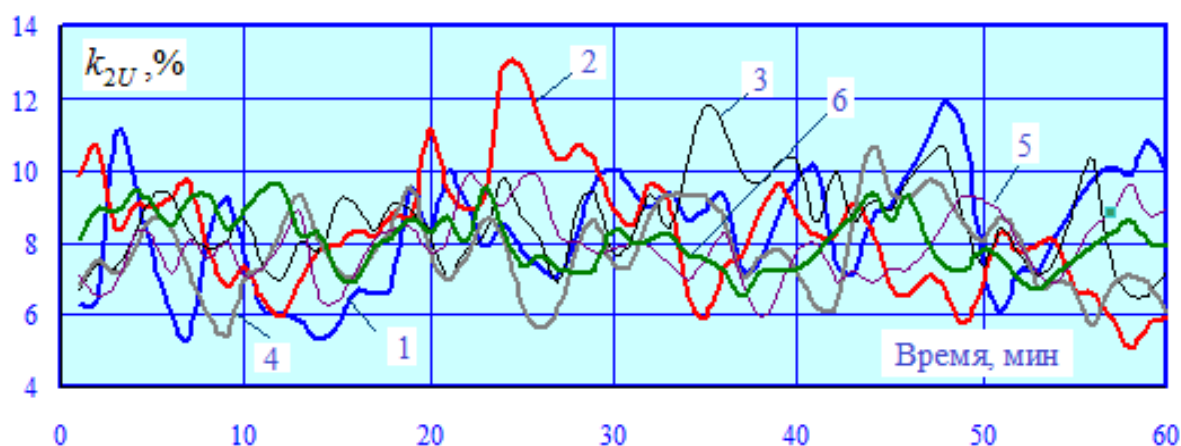


Рис. 1. Результаты измерений коэффициентов несимметрии
 Fig. 1. The results of measurements of the asymmetry coefficients

печаивающие снижение несимметрии в системах тягового электроснабжения (СТЭ). В работе [3] сформулированы задачи, решение которых позволит уменьшить остроту проблемы несимметрии в СТЭ. В статье [4] проанализирована эффективность применения симметрирующих трансформаторов Скотта, Вудбриджа, Р.Р. Мамошина и А.В. Василянского для уменьшения коэффициентов k_{2U} в СТЭ. В работе [5] проведен анализ режимов работы СТЭ Дальневосточной железной дороги и предложены мероприятия по нормализации схем подключения ТП, обеспечивающие повышение пропускной способности и снижение несимметрии. В статье [6] для уменьшения k_{2U} предлагается использовать многофункциональный вольтодобавочный трансформатор. В работе [7] показано, что несимметрия и несинусоидальность напряжений в сетях, примыкающих к ТП, приводит к снижению показателей, характеризующих надежность электроснабжения потребителей. В статье [8] описаны интеллектуальные преобразователи для симметрирования электротяговой нагрузки. В работе [9] предложен способ выравнивания нагрузок на ТП с симметрирующими трансформаторами, основанный на использовании нерегулируемых устройств компенсации реактивной мощности. В статье [10] рассмотрены вопросы уменьшения несимметрии в трехфазной сети, питающей ТП скоростных железных дорог. Работа [11] посвящена решению задачи выбора средств снижения несимметрии в сетях с высокой долей тяговой нагрузки. В статьях [12, 13] предложена модель оптимальной балансировки однофазной тяговой нагрузки на основе метода

Штейнмеца. В работе [14] приведено решение задач балансировки токов, компенсации реактивной мощности и гармоник на электрифицированной железнодорожной сети с помощью стабилизатора мощности. В статье [15] предложен бестрансформаторный компенсатор, который можно использовать на тяговых подстанциях для балансировки нагрузки. Результаты исследования влияния тяговой нагрузки высокоскоростной электрифицированной железной дороги на качество электроэнергии представлены в работе [16]. Гибридный метод активной компенсации баланса токов на основе схемы соединения Y/Δ – 11 тягового трансформатора рассмотрен в статье [17]. Модульный многоуровневый преобразователь для улучшения качества электроэнергии в СТЭ рассмотрен в работе [18]. Результаты анализа несбалансированных режимов в сети, питающей тяговые нагрузки, представлены в статье [19]. Одно из возможных решений задачи балансировки нагрузок на ТП переменного тока описано в работе [20].

Анализ представленных выше отчетственных и зарубежных публикаций позволяет сделать вывод об актуальности исследований, направленных на решение проблемы уменьшения несимметрии в системах электроснабжения железных дорог. Предлагаемые методы и средства решения этой проблемы отличаются многовариантностью подходов. Поэтому выбор технически рационального способа решения должен базироваться на результатах моделирования, основанного на адекватных цифровых моделях. Для создания таких моделей можно использовать подход, предложенный в работе [21], бази-

рующийся на использовании фазных координат и реализованный в промышленном программном комплексе (ПК) Fazonord.

Ниже приведены результаты исследований, направленных на определение технической эффективности применения СТЭ, использующих трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник (ОТ) [22, 23]. Следует отметить, что такие трансформаторы можно применять в системах электроснабжения объектов агропромышленного комплекса [24–27].

Постановка задачи

В работе [22] описана система электроснабжения железной дороги переменного тока с применением трансформаторов со схемой соединения обмоток «открытый треугольник», обеспечивающая загрузку малонагруженной фазы внешнего электроснабжения (рис. 2).

В этой схеме симметрирование осуществляется за счет искусственной загрузки малонагруженной фазы с помощью пары трансформаторов: трехфазного со схемой Y/Δ и двухфазного, использующего соединение обмоток V/V и включенного с высокой стороны на линейные напряжения. В середине такой межподстанционной зоны выполняется нейтральная вставка. Для улучшения симметрирования и обеспечения резерва питания предложена схема с группой из восьми ТП и

дополнительной цепью, питающей линию электропередач (ЛЭП).

Для оценки симметрирующего эффекта реализована цифровая модель [29] в ПК Fazonord, центральная часть схемы которой показана на рис. 3.

На первом этапе исследований, результаты которых представлены в работе [29], рассматривались размеры движения, близкие к пределу пропускной способности СТЭ. В таких режимах схема, предложенная в [22], не показала заметного снижения несимметрии по сравнению с СТЭ, оснащенной трехфазными трансформаторами, подключенными по схеме винта. На втором этапе, результаты которого приведены ниже, размеры движения были уменьшены путем увеличения межпоездного интервала до 30 мин. (рис. 4).

На первом этапе исследований, результаты которых представлены в работе [29], рассматривались размеры движения, близкие к пределу пропускной способности СТЭ. В таких режимах схема, предложенная в [22], не показала заметного снижения несимметрии по сравнению с СТЭ, оснащенной трехфазными трансформаторами, подключенными по схеме винта. На втором этапе, результаты которого приведены ниже, размеры движения были уменьшены путем увеличения межпоездного интервала до 30 мин. (рис. 4).

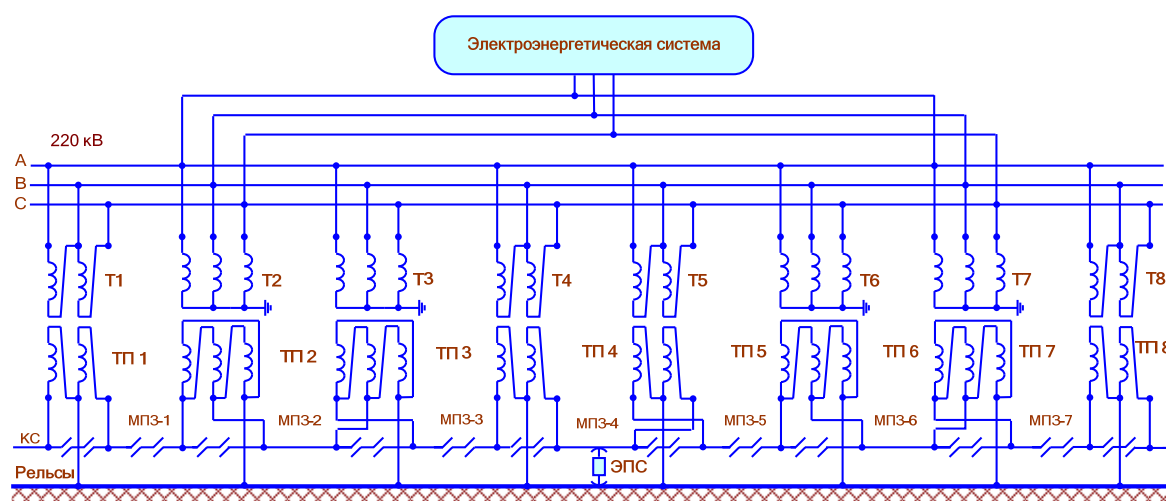


Рис. 2. Схема системы тягового электроснабжения:

T – тяговый трансформатор; $ТП$ – тяговая подстанция; $МПЗ$ – межподстанционная зона;
 $КС$ – контактная сеть; $ЭПС$ – электроподвижной состав

Fig. 2. Diagram of the traction power supply system:

T – traction transformer; $ТП$ – traction substation; $МПЗ$ – intersubstation zone; $КС$ – contact circuit;
 $ЭПС$ – electric rolling stock

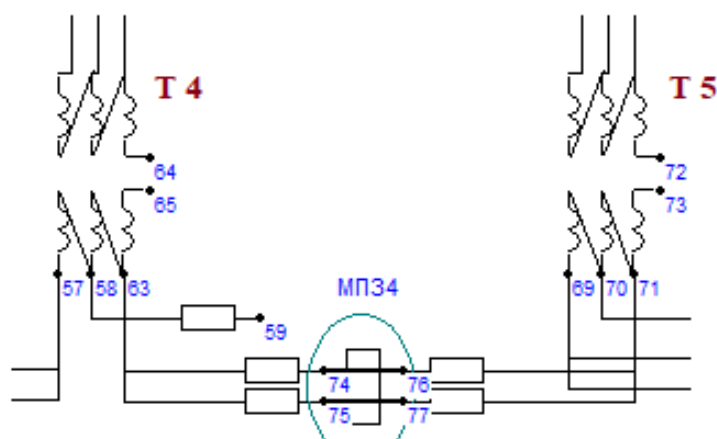
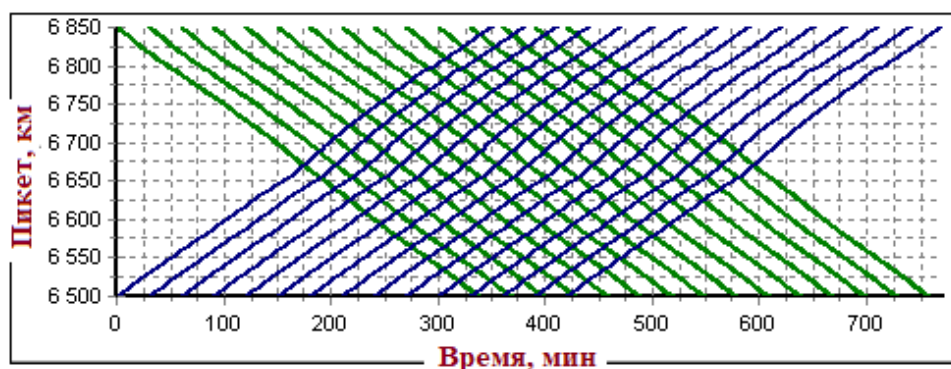
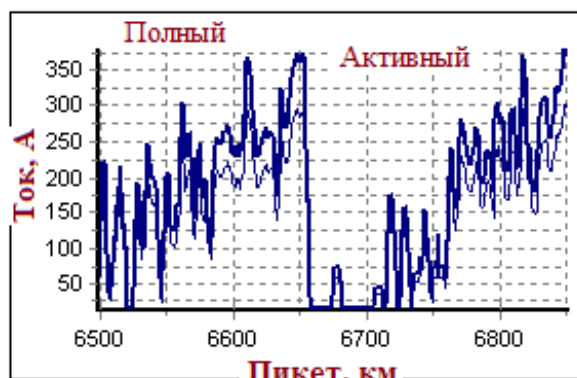


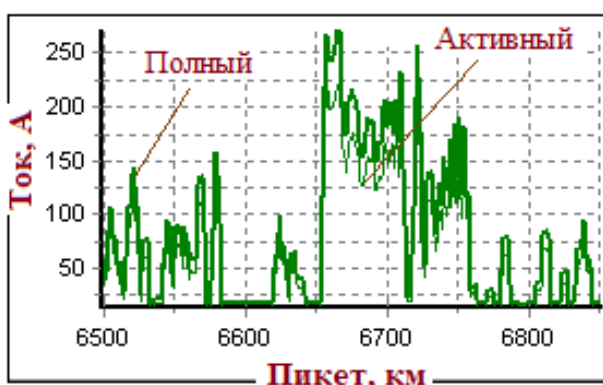
Рис. 3. Центральная часть схемы расчетной модели
Fig. 3. The central part of the calculated model scheme



а



б



в

Рис. 4. График движения (а) и зависимости токов электровозов от пикета для четного (б) и нечетного (в) поездов

Fig. 4. Schedule of movement (a) and dependence of electric locomotive currents on the picket for even (б) and odd (в) trains

Результаты моделирования показаны на рис. 5–12 и в табл. 1–6. На рис. 5 показана динамика изменения напряжений на токоприемниках электровозов в схеме СТЭ с тяговыми трансформаторами по схеме открытого треугольника (ТТ ОТ), а также в СТЭ типовой конструкции с трехфазными трансформатора-

ми. Из рис. 5 и табл. 1 видно, что итоговые показатели в обеих схемах различаются на доли процентов, за исключением минимального напряжения четного поезда, которое в схеме ТТ ОТ ниже аналогичного показателя для типовой СТЭ примерно на 3 %.

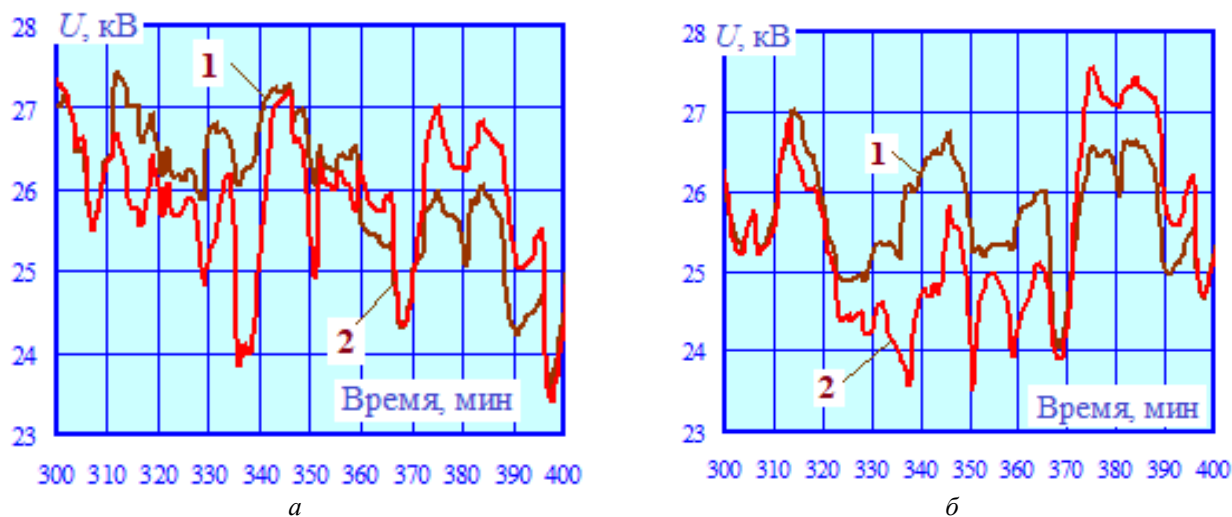


Рис. 5. Изменение напряжений на токоприемниках электровозов (1 – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника):

a – поезд № 10 нечетного направления; *б* – поезд № 32 четного направления;

Fig. 5. Change in voltage at the current collectors of electric locomotives (1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – traction power supply system with transformers according to the open triangle scheme):

a – train No 10 of an odd direction; *b* – train No 32 of an even direction

Таблица 1. Сводные показатели по напряжениям на токоприемниках

Table 1. Summary indicators for voltages on current collectors

Направление Direction	Показатель	Схема системы тягового электроснабжения Scheme of traction power supply system		Различие, % Difference, %
		Типовая Typical	С трансформаторами по схеме открытого треугольника With open triangle scheme transformers	
Нечетное Odd	Минимум Minimum	23,56	23,41	0,62
	Среднее значение Average value	26,71	26,57	0,53
	Максимум Maximum	28,28	28,19	0,33
Четное Even	Минимум Minimum	24,07	23,39	2,80
	Среднее значение Average value	26,17	25,88	1,08
	Максимум Maximum	28,27	28,27	0,01

В табл. 2 и на рис. 7 приведены максимальные значения коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ ТП, а на рис. 6 показана динамика их изменений во времени. Диаграмма, иллюстрирующая величины снижения максимальных значений k_{2U} за счет использования трансформаторов с обмотками, соединенными в ОТ, приведена на рис. 8. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что схема

СТЭ с ТТ ОТ при пониженных размерах движения обеспечивает уменьшение k_{2U} на 16–25 %.

Сводные показатели по потерям активной мощности в тяговой сети (ТС) и ЛЭП 220 кВ представлены в табл. 3. На рис. 9 показаны графики, характеризующие динамику их изменений во времени. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что по сравнению с типовой в схеме с ТТ ОТ максимальные значения потерь в ЛЭП уменьшаются

на 7 %, в ТС увеличиваются на 16 %. Снижение потерь в ЛЭП связано с выравниваем нагрузок по фазам при использовании схемы с ТТ ОТ. Повышение потерь в ТС вызвано пониженными напряжениями в схеме с ТТ ОТ по сравнению с типовой СТЭ (см. табл. 1).

В табл. 4 и 5 приведены сводные данные по суммарным коэффициентам гармоник на шинах 220 кВ ТП, полученные на основе моделирования несинусоидальных режимов СТЭ.

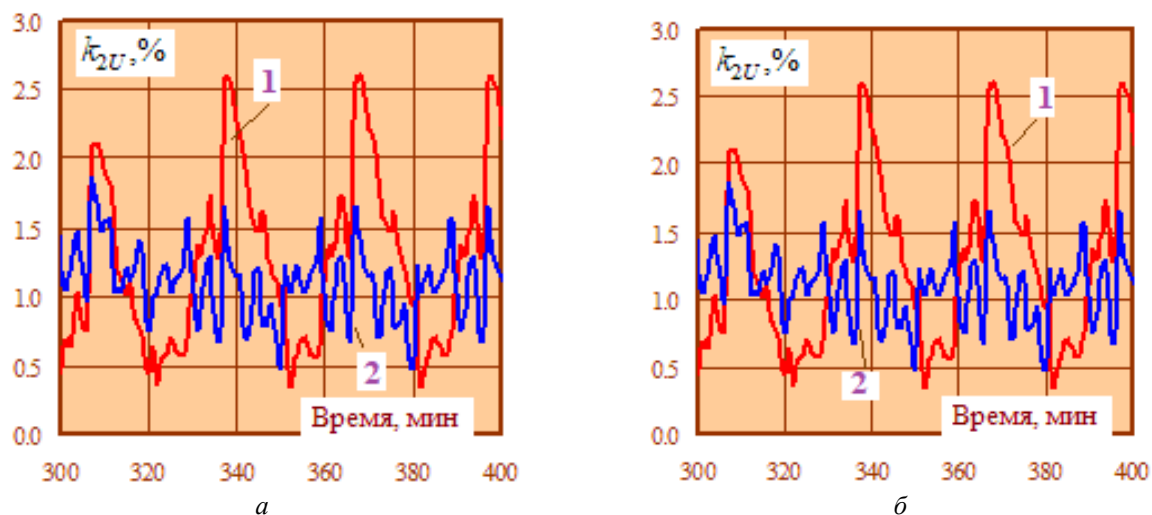


Рис. 6. Вариации коэффициентов несимметрии на шинах высокого напряжения тяговых подстанций (1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с тяговыми трансформаторами по схеме открытого треугольника):
а – ТП 1; б – ТП 8

Fig. 6. Variations of asymmetry coefficients on high voltage buses of traction substations (1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with traction transformers according to the open triangle scheme):
а – TP 1; б – TP 8

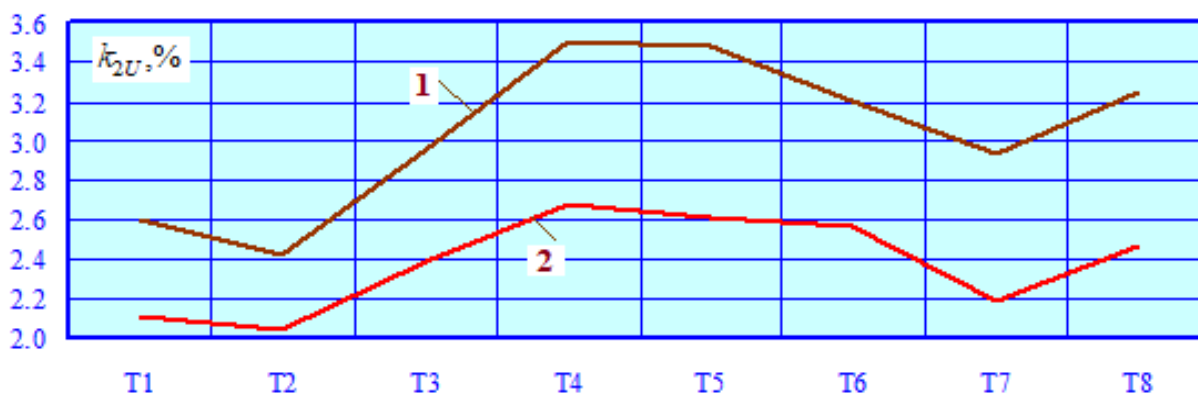


Рис. 7. Максимальные значения коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций: 1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника

Fig. 7. Maximum values of asymmetry coefficients on 220 kV buses of traction substations: 1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with transformers by open triangle pattern

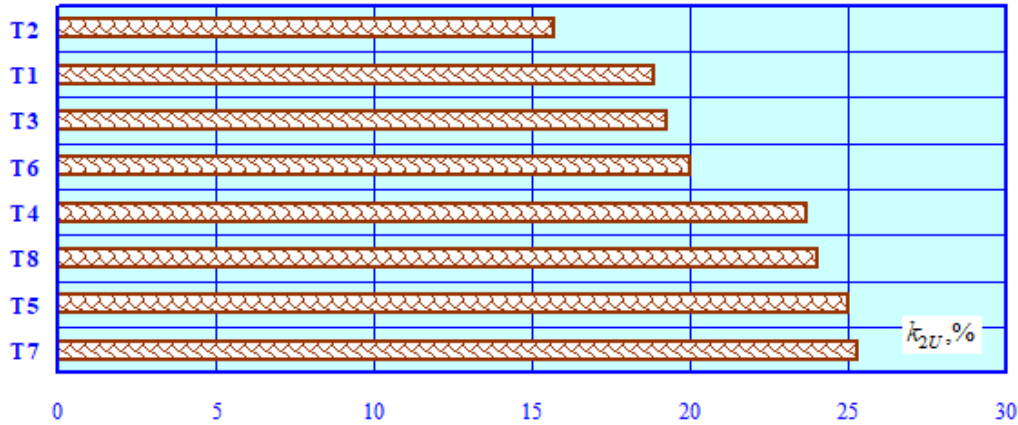


Рис. 8. Снижение максимальных значений несимметрии за счет использования трансформаторов с обмотками, соединенными в открытый треугольник
Fig. 8. Reduction of maximum unbalance values through the use of transformers with windings connected into an open triangle

Таблица 3. Сводные показатели по потерям мощности, кВт
Table 3. Summary indicators for power losses, kW

Показатель Indicator	Линия электропередач, связывающая Т 3 и Т 4 Power line linking T 3 and T 4			Тяговая сеть между ТП 3 и ТП 4 Traction circuit between TP3 and TP4		
	Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Traction transformer by open triangle pattern	Различие, % Difference, %	Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Traction transformer by open triangle pattern	Различие, % Difference, %
Среднее значение Average value	114,02	114,09	-0,06	70,59	73,99	-4,82
Максимум Maximum	209,00	194,00	7,18	232,00	269,00	-15,95

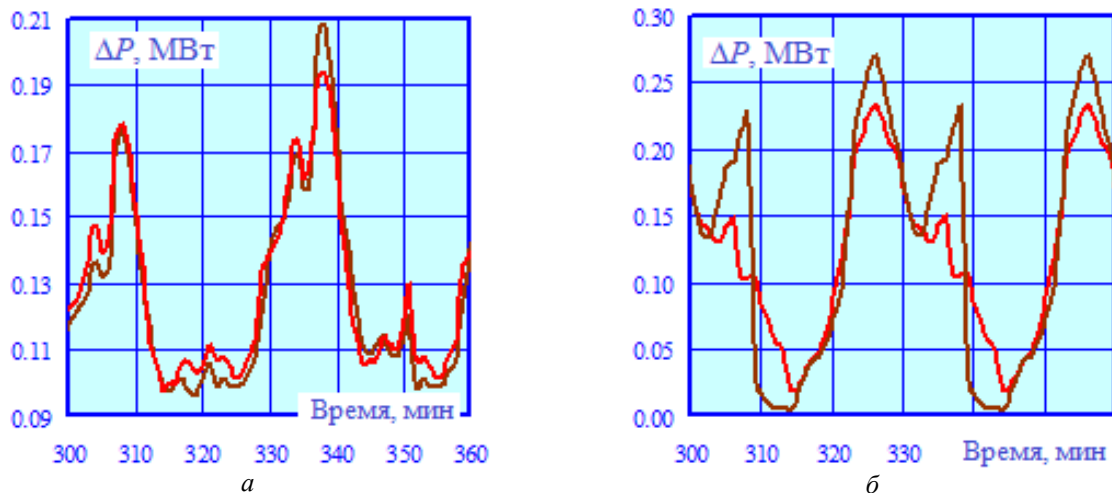


Рис. 9. Вариации потерь активной мощности в линии электропередач и тяговой сети:
 а – линия электропередач, связывающая Т3 и Т4; б – тяговая сеть между ТП3 и ТП4
Fig. 9. Variations in active power losses in power lines and traction networks:
 а – power line connecting T3 and T4; б – traction network between TP3 and TP4

Таблица 4. Суммарные коэффициенты гармоник k_U на шинах 220 кВ тяговой подстанции (типичная система тягового электроснабжения), %**Table 4.** Total harmonic coefficients k_U on 220 kV busbars of traction substation (typical traction power supply system), %

№	Тяговая подстанция Traction substation	Фаза А Phase A		Фаза В Phase B		Фаза С Phase C	
		Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum
1	ТП 1	8,57	21,61	6,42	12,24	7,95	20,28
2	ТП 2	8,25	20,84	6,18	11,83	7,74	19,73
3	ТП 3	9,03	22,92	6,81	13,21	8,6	22,15
4	ТП 4	9,34	23,7	7,17	14	9	23,45
5	ТП 5	9,31	23,67	7,21	13,99	8,99	23,41
6	ТП 6	8,95	22,77	6,9	13,2	8,54	22,02
7	ТП 7	8,14	20,59	6,3	11,83	7,67	19,53
8	ТП 8	8,43	21,3	6,56	12,22	7,91	20,07
9	Максимум	9,34	23,7	7,21	14	9	23,45

Таблица 5. Сводные данные по k_U на шинах 220 кВ тяговой подстанции (система тягового электроснабжения с тяговым трансформатором по схеме открытого треугольника), %**Table 5.** Summary of k_U on 220 kV busbars of a traction substation (traction power supply system with traction transformer according to the open triangle scheme), %

№	Тяговая подстанция Traction substation	Фаза А Phase A		Фаза В Phase B		Фаза С Phase C	
		Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum
1	ТП 1	6,6	12,59	4,67	9,42	5,38	10,57
2	ТП 2	6,33	12,11	4,52	9,22	5,11	9,82
3	ТП 3	6,96	13,42	5,03	10,38	5,68	11,18
4	ТП 4	7,27	14,05	5,16	10,71	6,08	12,39
5	ТП 5	7,28	14,04	5,15	10,65	6,03	12,24
6	ТП 6	7	13,37	5,01	10,16	5,59	11,05
7	ТП 7	6,41	12,1	4,57	9,18	4,95	9,57
8	ТП 8	6,76	12,67	4,77	9,47	5,11	9,84
9	Максимум	7,28	14,05	5,16	10,71	6,08	12,39

На рис. 10 представлены диаграммы, отвечающие величинам $\max(k_{U_{\max}})$ и $\max(k_{U_{\text{mean}}})$. Различия между этими показателями для типовой СТЭ и схемы с ТТ ОТ представлены в табл. 6. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП показаны на графиках рис. 11.

Результаты расчета несинусоидальных режимов позволяют сделать вывод о том, что схема с ТТ ОТ обеспечивает снижение макси-

мумов суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП на 22–47 % по сравнению с типовой СТЭ.

На рис. 12 показаны зависимости амплитуд напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м для типовой ТС и СТЭ с ТТ ОТ. Из него видно, что за счет небольшого снижения напряжений в ТС в схеме с ТТ ОТ возрастают токи, что приводит к увеличению напряженностей магнитного поля.

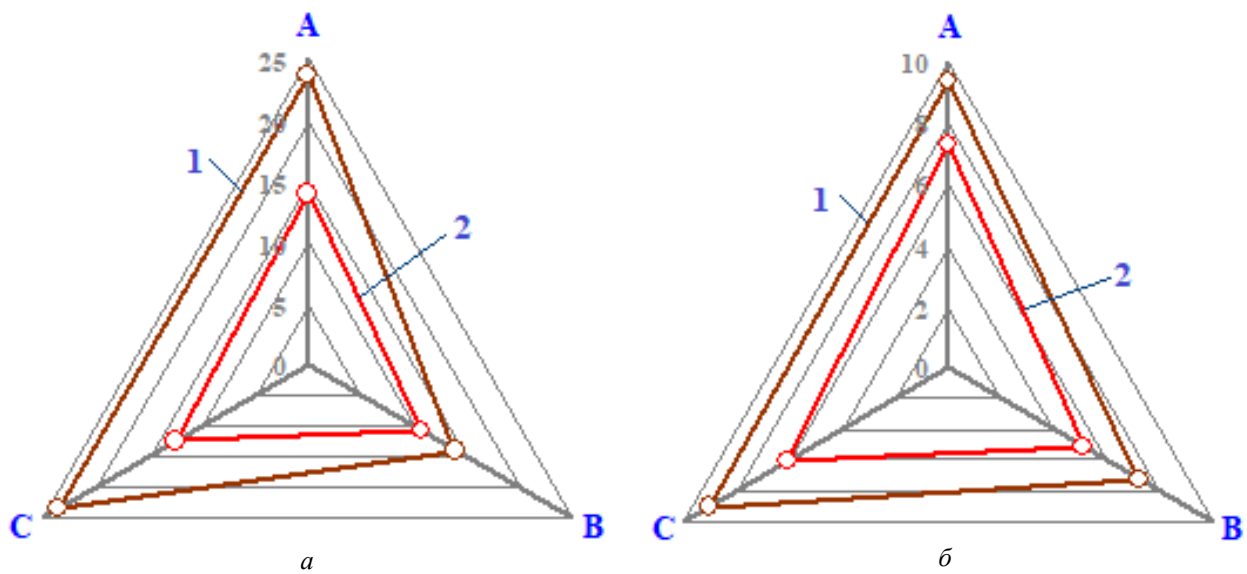


Рис. 10. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник по тяговой подстанции (1 – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника):

a – $\max(k_{U_{\max}})$; b – $\max(k_{U_{\text{mean}}})$; $k_{U_{\max}}$ – максимальное значение k_U ; $k_{U_{\text{mean}}}$ – среднее значение k_U

Fig. 10. Maximum values of total harmonic coefficients for traction substation

(1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – traction power supply system with open triangle transformers):

a – $\max(k_{U_{\max}})$; b – $\max(k_{U_{\text{mean}}})$; $k_{U_{\max}}$ is the maximum value of k_U ; $k_{U_{\text{mean}}}$ – average value of k_U

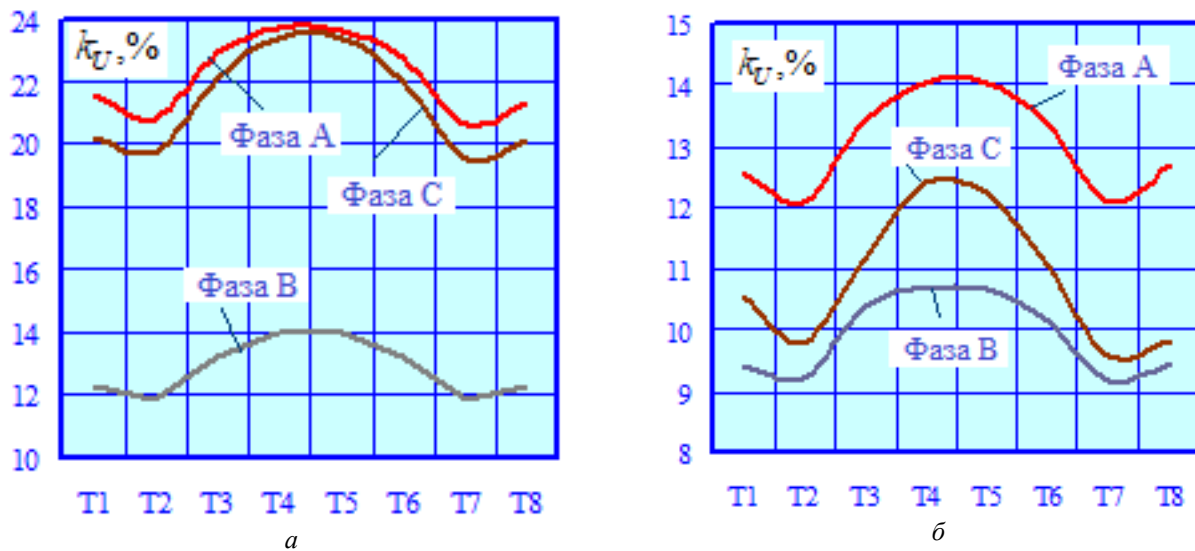


Рис. 11. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ тяговой подстанции:

a – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; b – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника

Fig. 11. The maximum values of the total harmonic coefficients at the 220 kV inputs of the traction substation:

a – a typical 25 kV traction power supply system; b – traction power supply system with open triangle transformers

Таблица 6. Максимумы суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ тяговой подстанции
Table 6. Maximum total harmonic coefficients at 220 kV inputs of traction substation

Фаза Phase	Значение Value	Система тягового электроснабжения Traction power supply system		Различие, % Difference, %
		Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Open triangle traction transformer	
А	Среднее; Average	9,34	7,28	22,06
	Максимум Maximum	23,7	14,05	40,72
В	Среднее; Average	7,21	5,16	28,43
	Максимум Maximum	14	10,71	23,50
С	Среднее; Average	9	6,08	32,44
	Максимум Maximum	23,45	12,39	47,16

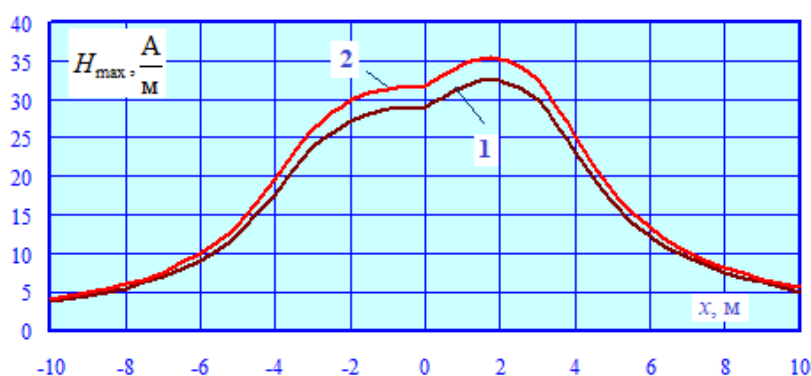


Рис. 12. Амплитуды напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м для тяговой сети межподстанционной зоны между ТП 3 и ТП 4:

1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с тяговым трансформатором по схеме открытого треугольника

Fig. 12. Amplitudes of the magnetic field strength at a height of 1.8 m for the traction circuit intersubstation zone between TS 3 and TS 4:

1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with open triangle traction transformer

Заключение

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие моделирование сложно несимметричных и несинусоидальных режимов системы тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме ОТ. Результаты моделирования показали, что при снижении размеров движения по сравнению с данными, приведенными в работе [29], эффективность улучшения качества электроэнергии в схеме с ТТ ОТ возрастает. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности k_{2U} уменьшаются на 15–25 %. Максимумы суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП снижаются на 22–47 %.

Итоговые показатели по напряжениям на токоприемниках электровозов в обеих схемах

различаются на доли процентов, за исключением минимального напряжения четного поезда, которое в схеме ТТ ОТ ниже аналогичного показателя для типовой СТЭ примерно на 3 %.

В схеме с ТТ ОТ максимальные значения потерь в ЛЭП уменьшаются на 7 %, в ТС увеличиваются на 16 %. Из-за снижения напряжений в ТС в схеме с ТТ ОТ возрастают токи, что приводит к увеличению напряженностей магнитного поля.

Разработанные цифровые модели могут применяться на практике при выборе средств симметрирования на участках дорог с размерами движения, не достигающими пределов пропускной способности.

Список литературы

1. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid) / Г.О. Арсентьев, Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков и др. Иркутск : ИрГУПС, 2019. 412 с.
2. Щегловитова Е.В. Несимметрия напряжений в системе тягового электроснабжения и технические решения для ее снижения // Молодой исследователь: вызовы и перспективы : сб. ст. по материалам ССЛXIII Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2022. Т. 21 (263). С. 335–340.
3. Родченко А.Д. Проблемы и задачи снижения несимметрии токов и напряжений системы тягового электроснабжения переменного тока // Электроснабжение железных дорог : межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск, 2010. С. 28–30.
4. Осипов В.А., Боева А.И. Снижение коэффициента несимметрии в системе тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 2. С. 81–86.
5. Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги / Н.П. Григорьев, И.В. Игнатенко, С.А. Власенко и др. // Вестн. Научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2022. Т. 81. № 3. С. 248–257.
6. Косарев А.Б., Алексеев М.В. Система тягового электроснабжения переменного тока с незначительным коэффициентом несимметрии по напряжению на первичной стороне силового тягового трансформатора // Вестн. Научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2015. № 1. С. 11–16.
7. Савина Н.В., Лисогурский И.А. Тяга переменного тока, как источник снижения эффективности и надежности функционирования электрических сетей // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2021. С. 143–147.
8. Интеллектуальные преобразователи для симметрирования высокоскоростной электротяговой нагрузки / А.Т. Бурков, С.В. Кузьмин, В.В. Сероносков и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 2 (58). С. 116–121.
9. Сероносков В.В. Улучшение условий симметрирования трехфазных токовых нагрузок на тяговых подстанциях однопутных участков // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2006. № 4 (24). С. 123–127.
10. Манусов В.З., Морозов П.В. Снижение несимметрии в трехфазной сети, питающей двухфазную сеть тяговых подстанций скоростных железных дорог переменного тока // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1 (25). С. 204–207.
11. Определение оптимального способа анализа электрических режимов и выбор средств снижения несимметрии напряжений в районах с высокой долей потребления электроэнергии тяговой нагрузкой / О.С. Стремиллова, И.М. Кац, В.В. Дикович и др. // Электроэнергетика глазами молодежи : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017. Т. 2. С. 14–17.
12. Model for optimal balancing single-phase traction load based on Steinmetz's method / Q. Wan, M. Wu, J. Chen et al. // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, 2010. P. 1565–1569. DOI 10.1109/ECCE.2010.5618084.
13. Optimal balancing of large single-phase traction load / Q. Wan, M. Wu, J. Chen et al. // IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010). Birmingham, 2010. P. 1–6. DOI 10.1049/ic.2010.0017.
14. Current balancing, reactive power and harmonic compensation using a traction power conditioner on electrified railway system / I. Maghsoud, A. Ghassemi, S. Farshad et al. // 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, 2013. P. 1–6. DOI 10.1109/IranianCEE.2013.6599882.
15. A transformerless compensator used in traction substation for load balancing / C. Zhang, Y. Wei, Q. Jiang et al. // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, 2011. P. 1490–1493. DOI 10.1109/DRPT.2011.5994132.
16. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality / Yu-q. Liu, G.-p. Wu, H.-s. Hua et al. // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, 2011. P. 569–573. DOI 10.1109/DRPT.2011.5993957.
17. Wang G., Ren E., Tian M. A Hybrid active compensation method for current balance based on Y/Δ 11 Connection Traction Transformer // Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Guangzhou, 2008. P. 582–586. DOI 10.1109/PEITS.2008.88.
18. A modular multilevel converter based Railway Power Conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system / S. Song, J. Liu, S. Ouyang et al. // IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, 2016. P. 2412–2416. DOI 10.1109/IPEMC.2016.7512675.
19. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network / U. Bumtsend, M. Safaraliev, A. Ghulomzoda et al. // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 2020. P. 0456–0459. DOI 10.1109/USBREIT48449.2020.9117758.
20. Blahnik V., Pittermann M., Straka M. Operating states of load balancer for ac traction substation based on CHB topology // IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Gliwice, 2021. P. 272–277. DOI 10.1109/PEMC48073.2021.9432600.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
22. А.с. № 418934 СССР. Схема однофазного энергоснабжения железной дороги от линии электропередачи / М. Б. Улановский. № 1738679/24-7 ; заявл. 12.01.1972 ; опубл. 05.03.1974, Бюл. № 9. 2 с.
23. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
24. Масенко А.В., Жестков В.В., Таразанов В.И. Электроснабжение потребителей по схеме «открытого треугольника» // Приднепровский научный вестник. 2023. Т. 1. № 3. С. 52–55.
25. Щebetеев В.А., Мищенко В.Р., Таразанов В.И. Оценка дополнительных потерь в схеме питания потребителей «открытым треугольником» // Приднепровский научный вестник. 2023. Т. 1. № 3. С. 63–65.
26. Надтока И.И., Осадчий П.В., Тропин В.В. Особенности применения схемы «открытый треугольник» в структуре сельской низковольтной распределительной сети // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 5. С. 72–78.

27. Попов Н.М., Канов А.Н. Моделирование в фазных координатах соединения двух однофазных трансформаторов в «открытый треугольник» // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : труды V Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 2006. Т. 1. С. 284–289.

28. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. Иркутск : ИрГУПС, 2016. 164 с.

References

1. Arsent'ev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Nguen V.Kh., Cherepanov A.V., Chan Z.Kh. Upravlenie rezhimami sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog na osnove tekhnologii intellektual'nykh setei (smart grid) [Management of modes of railway power supply systems based on smart grid technologies]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2019. 412 p.

2. Shcheglovitova E.V. Nesimmetriya napryazhenii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya i tekhnicheskie resheniya dlya ee snizheniya [Voltage asymmetry in the traction power supply system and technical solutions for its reduction]. *Sbornik statei po materialam CCLXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodoi issledovatel': vyzovy i perspektivy»* [Proceedings of the CCLXIII International Scientific and Practical Conference «Young Researcher: Challenges and Prospects»]. Moscow, 2022, vol. 21 (263), pp. 335–340.

3. Rodchenko A.D. Problemy i zadachi snizheniya nesimmetrii tokov i napryazhenii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Problems and tasks of reducing the asymmetry of currents and voltages of the system of traction power supply of alternating current]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog»* [Inter-university proceedings «Electric supply of railways»]. Omsk, 2010, pp. 28–30.

4. Osipov V.A., Boeva A.I. Snizhenie koefitsienta nesimmetrii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka 27,5 kV [Reduction of the asymmetry coefficient in the system of traction power supply of alternating current 27,5 kV]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2015, no. 2, pp. 81–86.

5. Grigor'ev N.P., Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Kovalev V.A., Shatalov V.V. Povyshenie rabotosposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya Dal'nevostochnoi zheleznoi dorogi [Improving the efficiency of the traction power supply system of the Far Eastern Railway]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2022, vol. 81, no. 3, pp. 248–257.

6. Kosarev A.B., Alekseenko M.V. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s neznachitel'nyim koefitsientom nesimmetrii po napryazheniyu na pervichnoi storone silovogo tyagovogo transformatora [Alternating current traction power supply system with a non-significant voltage asymmetry coefficient on the primary side of a power traction transformer]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2015, no. 1, pp. 11–16.

7. Savina N.V., Lisogurskii I.A. Tyaga peremennogo toka, kak istochnik snizheniya effektivnosti i nadezhnosti funkcionirovaniya elektricheskikh setei [Alternating current traction as a source of reducing the efficiency and reliability of the functioning of electrical networks]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu»* [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Production technologies of the future: from creation to implementation»]. Komsomolsk-on-Amur, 2021, pp. 143–147.

8. Burkov A.T., Kuz'min S.V., Seronosov V.V., Stepanskaya O.A. Intellektual'nye preobrazovateli dlya simmetrirovaniya vysokoskorostnoi elektroyagovoi nagruzki [Intelligent converters for balancing high-speed electric traction load]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2015, no. 2 (58), pp. 116–121.

9. Seronosov V.V. Uluchshenie uslovii simmetrirovaniya trekhfaznykh tokovykh nagruzok na tyagovykh podstantsiyakh odnoputnykh uchastkov [Improving the conditions for balancing three-phase current loads at traction substations of single-track sections]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2006, no. 4 (24), pp. 123–127.

10. Manusov V.Z., Morozov P.V. Snizhenie nesimmetrii v trekhfaznoi seti, pitayushchei dvukhfaznyuyu set' tyagovykh podstantsii skorostnykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Reduction of asymmetry in a three-phase network supplying a two-phase network of traction substations of high-speed AC railways]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], no. 1-1 (25), 2012, pp. 204–207.

11. Stremilova O.S., Kats I.M., Dikovich V.V., Zav'yalov P.B. Opredelenie optimal'nogo sposoba analiza elektricheskikh rezhimov i izbor sredstv snizheniya nesimmetrii napryazhenii v raionakh s vysokoi dolei potrebleniya elektroenergii tyagovoi nagruzkoj [Determining the optimal method for analyzing electrical modes and choosing means to reduce voltage unbalance in areas with a high share of electricity consumption by traction load]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»* [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference «Power industry through the eyes of youth»]. Samara, 2017, vol. 2, pp. 14–17.

12. Wan Qingzhu, Wu Mingli, Chen Jianye, Zhu Guiping. Model for optimal balancing single-phase traction load based on Steinmetz's method. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, 2010, pp. 1565–1569. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618084.

13. Wan Qingzhu, Wu Mingli, Chen Jianye, Zhu Guiping. Optimal balancing of large single-phase traction load. *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*. Birmingham, 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1049/ic.2010.0017.

14. Maghsoud I., Ghassemi A., Farshad S., Fazel S.S. Current balancing, reactive power and harmonic compensation using a traction power conditioner on electrified railway system. *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Mash-

had, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IranianCEE.2013.6599882.

15. Zhang C., Wei Y., Jiang Q., Tong L. A transformerless compensator used in traction substation for load balancing. *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, 2011, pp. 1490–1493. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5994132.

16. Liu Yu-q., Wu G.-p., Hua H.-s., Li W. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality. *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. Weihai, 2011, pp. 569–573. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993957.

17. Wang G., Ren E., Tian M. A Hybrid Active Compensation Method for Current Balance Based on Y/ Δ 11 Connection Traction Transformer. *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. Guangzhou, 2008, pp. 582–586. DOI: 10.1109/PEITS.2008.88.

18. Song S., Liu J., Ouyang S., Chen X. A modular multilevel converter based Railway Power Conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. Hefei, 2016, pp. 2412–2416. DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512675.

19. Bumtsend U., Safaraliev M., Ghulomzoda A., Ghoziev B., Ahyoev J., Ghulomabdolov G. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network. *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 2020, pp. 0456–0459. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.

20. Blahnik V., Pittermann M., Straka M. Operating States of Load Balancer for AC Traction Substation Based on CHB Topology. *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. Gliwice, 2021, pp. 272–277. DOI: 10.1109/PEMC48073.2021.9432600.

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

22. Ulanovskii M.B. Copyright certificate SU 418934 A1, 05.03.1974.

23. Markvard K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.

24. Masenko A.V., Zhestkov V.V., Tarazanov V.I. Elektrosnabzhenie potrebitelei po skheme «otkrytogo treugol'nika» [Power supply of consumers according to the «open triangle» scheme]. *Pridneprovskii nauchnyi vestnik* [Pridneprovsky Scientific Bulletin], 2023, vol. 1, no. 3, pp. 52–55.

25. Shchebetev V.A., Mishchenko V.R., Tarazanov V.I. [Estimation of additional losses in the scheme of supplying consumers with an «open triangle»]. *Pridneprovskii nauchnyi vestnik* [Pridneprovsky Scientific Bulletin], 2023, vol. 1, no. 3, pp. 63–65.

26. Nadtoka I.I., Osadchii P.V., Tropin V.V. Osobennosti primeniya skhemy «otkrytyi treugol'nik» v strukture sel'skoi nizkovol'tnoi raspredelitel'noi seti [Peculiarities of using the «open triangle» scheme in the structure of a rural low-voltage distribution network]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Bulletins of higher educational organizations. Electromechanics], 2020, vol. 63, no. 5, pp. 72–78.

27. Popov N.M., Kanov A.N. Modelirovanie v faznykh koordinatakh soedineniya dvukh odnofaznykh transformatorov v «otkrytyi treugol'nik» [Modeling in phase coordinates of the connection of two single-phase transformers into an «open triangle»]. *Trudy V Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaistve» (v 5 t.)* [Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference «Energy supply and energy saving in agriculture» (in 5 vol.)]. Moscow, 2006, vol. 1, pp. 284–289.

28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriryushchimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems equipped with balancing transformers]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016. 164 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.

Серёдкин Дмитрий Александрович, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: dmitriy987@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.

Dmitrii A. Seredkin, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: dmitriy987@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.