

Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения

А. В. Крюков^{1,2}✉, А. В. Черепанов², А. Д. Степанов², Д. А. Середкин², И. А. Фесак²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

Один из путей решения задач повышения энергетической эффективности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог заключается в использовании тяговых сетей повышенного напряжения. В современных условиях для внедрения таких сетей необходима разработка их цифровых моделей, обеспечивающих адекватный анализ качества электроэнергии, энергетической эффективности, электромагнитной совместимости и безопасности. Такие модели могут быть реализованы на базе методов моделирования режимов систем электроснабжения в фазных координатах, разработанных в программном комплексе «Fazonord», созданном в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты моделирования режимов перспективных систем электроснабжения железных дорог с тяговыми сетями 50 и 50+110 кВ. Для сравнения проведено моделирование режимов традиционной тяговой сети 25 кВ. Полученные результаты позволили сформулировать следующие выводы: тяговая сеть 50+110 кВ обеспечивает наилучшую стабилизацию напряжения на токоприемниках электроподвижного состава; тяговые сети повышенного напряжения позволяют снизить токи электровозов и уменьшить нагрев проводов контактной сети; наименьшие потери мощности обеспечивает тяговая сеть 50+110 кВ, при этом для нее наблюдается наиболее низкие показатели варибельности потерь; за счет применения сетей повышенного напряжения можно получить снижение суммарного электропотребления; применение тяговых сетей повышенного напряжения приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля по сравнению с сетями 25 кВ; максимальные и средние значения напряженности тяговой сети 50 кВ больше на 82 и 84 % соответственно, однако аналогичные параметры тяговой сети 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 16 %; напряженность магнитного поля перспективных систем электроснабжения по сравнению с тяговой сетью 25 кВ уменьшается для сетей 50 кВ и 50+110 кВ на 50 и 84 % соответственно.

Ключевые слова

системы тягового электроснабжения повышенного напряжения, качество электроэнергии, энергетическая эффективность, электромагнитные поля, моделирование

Для цитирования

Крюков А.В. Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Д. Степанов, Д. А. Середкин, И. А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 83–91. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.09.2021, поступила после рецензирования: 08.10.2021, принята к публикации: 11.10.2021

Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems

A. V. Kryukov^{1,2}✉, A. V. Cherepanov², A. D. Stepanov², D. A. Seredkin², I. A. Fesak²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

One of the ways to solve the problems of increasing energy efficiency and improving the quality of electricity in the power supply systems of the main railways is by using high voltage traction networks (TN). Under modern conditions, the introduction of such networks requires the development of their digital models providing an adequate analysis of the quality of electricity, energy efficiency, electromagnetic compatibility and safety. Such models can be built based upon the methods for modeling the modes of power supply systems in phase coordinates, implemented in the Fazonord software complex, developed at the Irkutsk State University of Communications. The article presents the results of modeling the modes of promising power supply systems for railways with traction networks of 50 and 50 + 110 kV. For comparison, a simulation of the modes of a traditional 25 kV TN was carried out. The results obtained made it possible to formulate the following conclusions: TN 50 + 110 kV provides the best voltage stabilization at the pantographs of electric rolling stock; high-voltage traction networks allow to reduce the currents of electric locomotives and reduce the heating of the wires of the contact network; the lowest power losses are provided by the TN 50 +

110 кВ; в то же время, это TN, для которого наименьшие показатели изменчивости потерь наблюдаются; благодаря использованию сетей повышенного напряжения, возможно получение снижения в общей мощности потребления; использование сетей высокого напряжения приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля по сравнению с 25 кВ, максимальные и средние значения напряженности для 50 кВ выше на 82 и 84 %, соответственно; однако, аналогичные параметры для TN 50 + 110 кВ по сравнению с линией питания снижены на 15 и 16%; напряженность магнитного поля перспективных систем питания, по сравнению с 25 кВ TN, снижается для 50 кВ и 50 + 110 кВ TN на 50 и 84 %, соответственно.

Keywords

high-voltage traction power supply systems, electricity quality, energy efficiency, electromagnetic fields, modeling

For citation

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Stepanov A. D., Seredkin D. A., Fesak I. A. Tsifrovyye modeli perspektivnykh sistem tyagovogo el-ektrosnabzheniya povyshennogo napryazheniya [Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 83–91. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91

Article Info

Received: 21.09.2021, Revised: 08.10.2021, Accepted: 11.10.2021

Введение

Для увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей, снижения потерь мощности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог предлагается использовать системы тягового электроснабжения (СТЭ) повышенного напряжения, например, 50 кВ и 50+110 кВ [1–7]. Для практического применения этих СТЭ необходим детальный анализ их режимов на основе цифровых моделей [8–11]. Задачи такого анализа заключаются в определении показателей качества электрической энергии и энергетической эффективности, а также условий электромагнитной совместимости и безопасности [12–18]. В статье представлены результаты определения этих показателей для перспективных СТЭ повышенного напряжения. Для сравнения выполнено моделирование традиционной СТЭ 25 кВ.

Методика и результаты моделирования

Для определения показателей работы перспективных СТЭ 50 и 50+110 кВ можно использовать методы моделирования, реализованные в программном комплексе «Fazonord», разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. Принципы его применения для определения режимов СТЭ описаны в [19, 20].

Моделирование режимов СТЭ 50 кВ и 50+110 кВ проведено применительно к двухпутному участку. Расчетные схемы, фрагменты которых показаны на рис. 1, имели в своем составе модели трех тяговых трансформаторов и двух межподстанционных зон (МПЗ). Левая МПЗ была разбита на пять участков, протяженностью по 10 км. Кроме того, в схеме были представлены модели четырех линий электропередачи 220 кВ.

При моделировании рассматривалось движение 7 поездов массой 6 300 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6 000 т – в четном. График движения и токовые профили по-

ездов приведены (рис. 2). Расположение токоведущих частей показано на рис. 3.

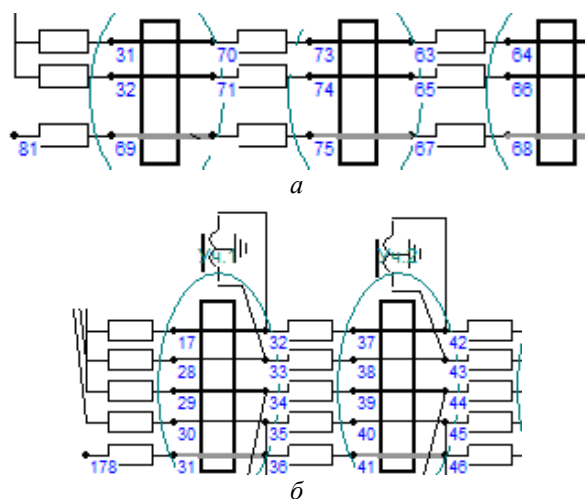
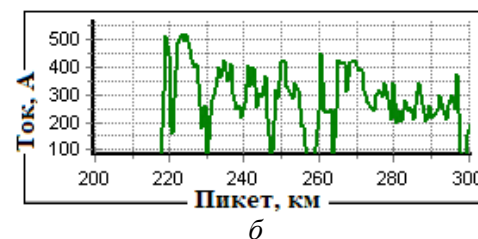
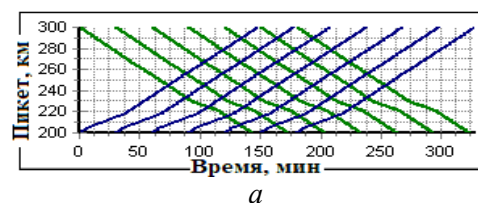


Рис. 1. Фрагменты схем расчетных моделей:
а – 50 кВ; б – 50+110 кВ

Fig. 1. Scheme fragments for calculated models:
a – 50 kV; b – 50+110kV



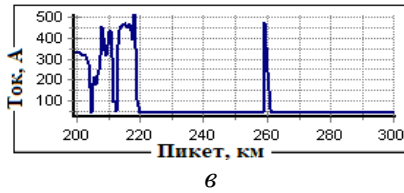


Рис. 2. График движения (а) и токовые профили нечетного поезда массой 6 300 т (б) и четного поезда массой 6 000 т (в)
Fig. 2. Motion graph (a) and current profiles of an odd train weighing 6300 t (b) and an even train weighing 6000 t (v)

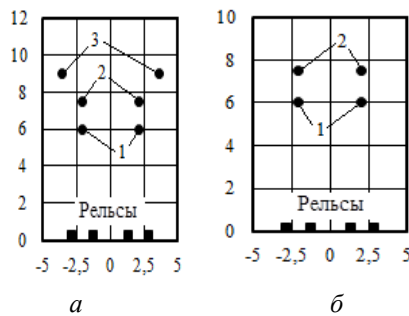


Рис. 3. Расположение токоведущих частей в сечении тяговой сети 50+110 кВ (а) и 50 кВ (б): 1 – контактный провод; 2 – несущий трос; 3 – питающий провод
Fig. 3. The position of the current-carrying parts in the cross section of the traction network 50+110 kV(a) and 50 kV (b): 1 – trlley wire; 2 – carring cable; 3 – power wire

На рис. 4 и 5 и в табл. 1 представлены результаты расчетов напряжений и токов первого поезда.

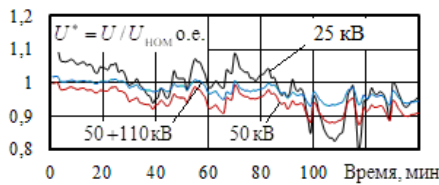


Рис. 4. Напряжения на токоприемнике первого поезда
Fig. 4. Voltage in the current collector of the first train

Таблица 1. Напряжения на токоприемнике первого поезда

Показатель	Тип тяговой сети		
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
Максимум	<i>1,10</i>	1,00	1,02
Среднее значение	<i>0,99</i>	0,94	<i>0,98</i>
Минимум	<i>0,80</i>	0,88	0,93
Размах	<i>0,30</i>	0,12	0,09
Среднеквадратичное отклонение	<i>0,06</i>	0,03	0,02

Примечание. Курсивом выделены экстремальные значения.

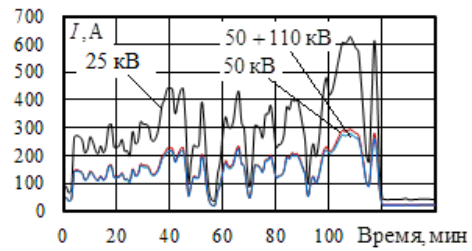


Рис. 5. Токи электровоза первого поезда
Fig. 5. Currents of the first train's electric locomotive

На рис. 6, 7 и в табл. 2, 3 приведены результаты моделирования потерь мощности и суммарного электропотребления. На рис. 8 показаны зависимости перегревов проводов от времени

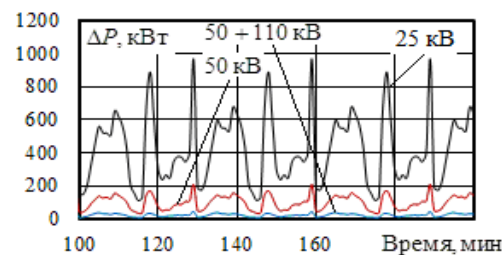


Рис. 6. Потери мощности на левых участках контактной сети по рис. 1 а, б
Fig. 6. Power loss in the left sites of the contact network, fig.1 a, b

Таблица 2. Потери мощности на левых участках контактной сети, кВт
Table 2. Power loss in the left sites of the contact network, kW

Показатель	Тип тяговой сети		
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
Максимум	780,00	166,00	37,00
Среднее значение	236,71	57,75	13,83
Минимум	0,04	0,08	0,48
Размах	779,96	165,92	36,52
Среднеквадратичное отклонение	195,76	44,23	9,55

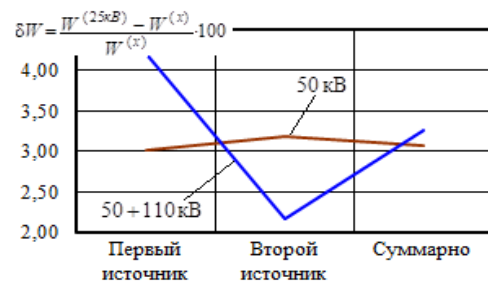
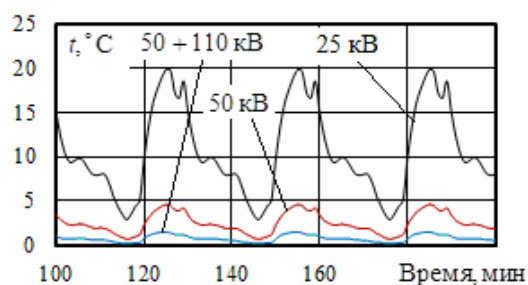


Рис. 7. Изменения суммарного электропотребления: x = 50 кВ или 50 + 110 кВ
Fig. 7. Changes in total power consumption: x = 50 кВ или 50 + 110 кВ

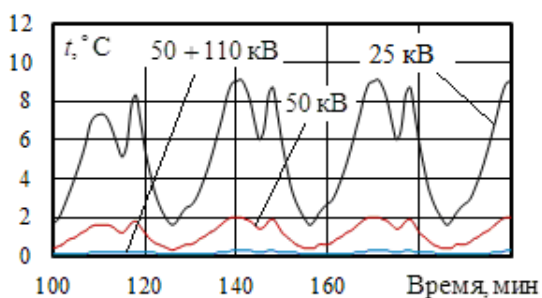
Таблица 3. Суммарное электропотребление, МВт·ч
Table 3. Total power consumption, MWh

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
W_1	73,56	71,34	70,47	3,02	4,20
W_2	65,92	63,83	64,48	3,18	2,18
Сумма	139,51	135,22	134,96	3,07	3,26

Примечание. W_1 – электропотребление от первого источника; W_2 – электропотребление от второго источника.



а



б

Рис. 8. Перегрев проводов контактной сети:
а – нечетное направление; б – четное направление

Fig. 8. Wire overheating in the contact network:
а – odd direction, б – even direction

Таблица 4. Максимальные значения перегрева контактного провода

Table 4. Maximum values of trolley wire overheating

Интервал усреднения	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
1 мин.	19,8	4,6	1,5
3 мин.	19,5	4,5	1,5
20 мин.	13,4	3,2	1,0

По результатам расчета потерь мощности и суммарного электропотребления, а также токов и напряжений первого поезда можно сделать следующие выводы:

1. СТЭ 50+110 кВ обеспечивает наилучшую стабилизацию напряжения на токоприемниках электроподвижного состава.

2. Перспективные тяговые сети повышенного напряжения позволяют снизить токи электровозов. Так, среднее значение отношения токов систем тяги 25 кВ и 50+110 кВ достигает $\gamma_{50} = I^{(25)} / I^{(50)} = 1,91$; аналогичный параметр СТЭ 50+110 кВ составляет 1,98; максимальные величины этих показателей соответственно равны 2,2 и 2,35.

3. Уменьшение токов позволяет снизить нагрев проводов контактной сети. Так, перегрев проводов нечетного пути ТС 50 кВ относительно ТС 25 кВ снижается в 4 раза до значений 4,5 °С при одностороннем и трехминутном интервале усреднения и до 3,2 °С при 20 минутном интервале усреднения. Применение СТЭ 50+110 кВ приводит к снижению перегрева до значений менее 1,5 °С.

4. Наименьшие потери мощности обеспечивает ТС 50+110 кВ, при этом для данной ТС наблюдается наиболее низкие показатели вариальности потерь.

5. За счет применения СТЭ повышенного напряжения можно получить снижение суммарного электропотребления 3,1–3,3 %. Первая цифра соответствует СТЭ 50 кВ, а вторая – 50+110 кВ. В обозначенных единицах снижение электропотребления достигает соответственно 4,3 и 4,6 МВт·ч за время моделирования 327 мин.

На рис. 9 и в табл. 5 приведены результаты расчета коэффициентов несимметрии напряжения на шинах 220 кВ средней тяговой подстанции (ТП 2).

Таблица 5. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на шинах 220 кВ второй тяговой подстанции
Table 5. Asymmetry coefficients for the reverse sequence k_{2U} on 220 kV tines for the second traction substation

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
Минимум	0,04	0,04	0,08		
Среднее значение	0,98	0,87	0,76	10,93	22,61
Максимум	2,39	1,68	1,61	29,71	32,64
Размах	2,35	1,64	1,53	30,21	34,89
Среднеквадратичное отклонение	0,43	0,36	0,31	16,85	28,69

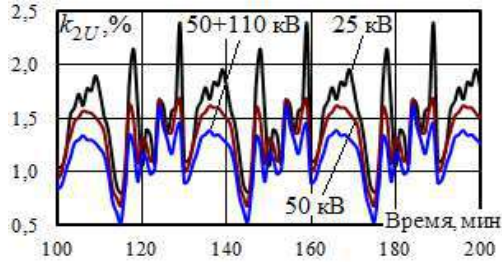


Рис. 9. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ второй тяговой подстанции

Fig. 9. Asymmetry coefficients of the reverse sequence on 220 kV tires of the second traction substation

На рис. 10 и в табл. 6 представлены результаты определения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций.

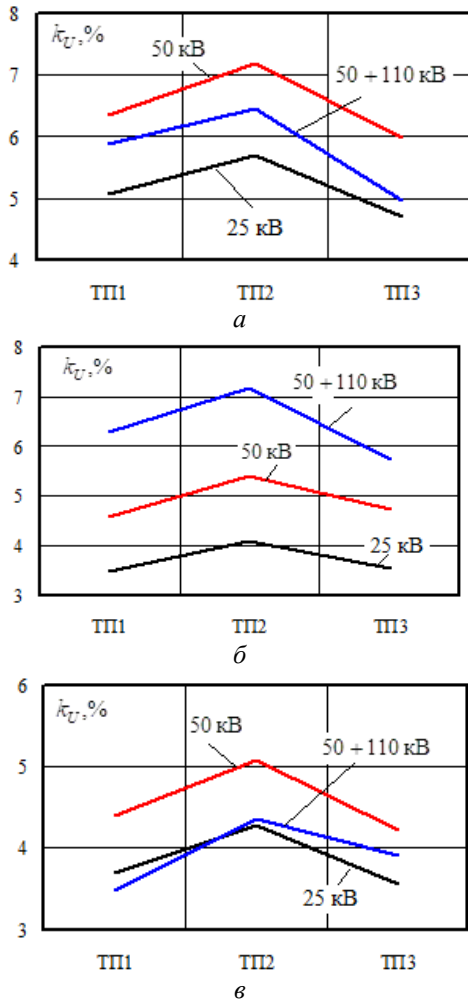


Рис. 10. Средние значения коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Fig. 10. Mean values of harmonic coefficients on tires of 220 kV traction substations: а - phase A; б - phase B; в - phase C

Таблица 6. Средние значения коэффициентов гармоник k_U на шинах 220 кВ ТП
Table 6. Average values of the coefficients of harmonics k_U on the buses of 220 kV TP

Фаза	Подстанция	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
		25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	3/4	3/5
1	2	3	4	5	6	7
А	1	5,05	6,35	5,87	-25,74	-16,24
	2	5,67	7,18	6,45	-26,63	-13,76
	3	4,68	5,97	4,95	-27,56	-5,77
В	1	3,46	4,56	6,28	-31,79	-81,50
	2	4,07	5,39	7,17	-32,43	-76,17
	3	3,55	4,72	5,73	-32,96	-61,41
С	1	3,7	4,39	3,47	-18,65	6,22
	2	4,28	5,08	4,35	-18,69	-1,64
	3	3,56	4,22	3,91	-18,54	-9,83

На рис. 11 показана зависимость коэффициента несинусоидальности напряжения на шинах 220 кВ средней тяговой подстанции от времени.

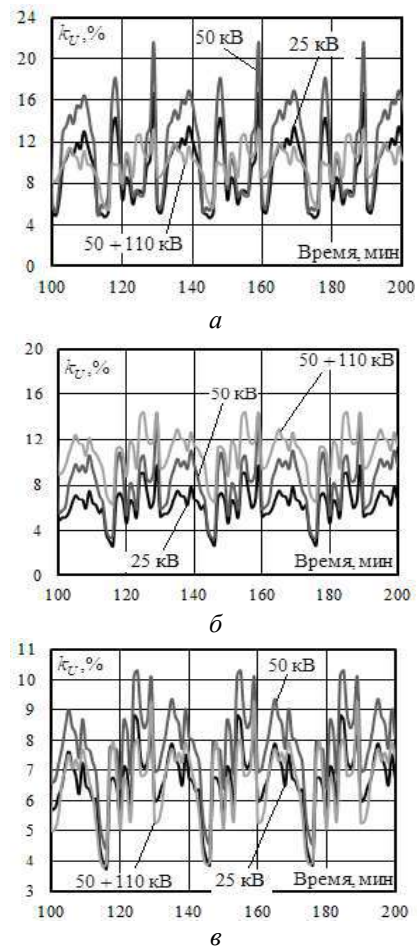


Рис. 11. Коэффициенты гармоник: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Fig. 11. Harmonic coefficients: а - phase A; б - phase B; в - phase C

На основе результатов расчета показателей качества электрической энергии можно сделать следующие выводы:

1. За счет уменьшенных токов в тяговых сетях 50 и 50+110 кВ средние значения k_{2U} на вводах 220 кВ тяговых подстанций (ТП) снижаются на 11 и 22 % соответственно по сравнению с типовой ТС 25 кВ. Аналогичные показатели для максимумов составляют 30 и 35 %. В ТС 25 кВ величины k_{2U} превышают нормально допустимые значения.

2. Применение СТЭ повышенного напряжения приводит к уменьшению показателей, характеризующих динамику изменения несимметрии во времени. Размах колебаний снижается для ТС 50 кВ на 30 %, а для ТС 50+110 кВ на 35 %. Аналогичные данные по среднеквадратическому отклонению составляют 17 и 29 % соответственно. Таким образом, в перспективных ТС для устранения несимметрии при выходе ее за допустимые пределы в результате роста тяговых нагрузок потребуются меньший диапазон регулирования симметрирующих устройств.

3. На шинах высокого напряжения перспективных ТС наблюдается повышенный уровень гармонических искажений по сравнению с ТС 25 кВ. Исключение составляет фаза С ТП 1, для которой величина k_U в СТЭ 50+110 кВ ниже, чем в СТЭ 25 кВ.

4. По фазам А и С наибольший уровень гармонических искажений наблюдается для тяговых подстанций СТЭ 50 кВ. По фазе В максимум k_U имеет место в СТЭ 50+110 кВ.

Условия электромагнитной безопасности [20] в системах тягового электроснабжения определяются величинами напряженностей электромагнитного поля (ЭМП). Результаты моделирования ЭМП показаны на рис. 12, 13 и в табл. 7. Электромагнитные поля определялись на высоте 1,8 м.

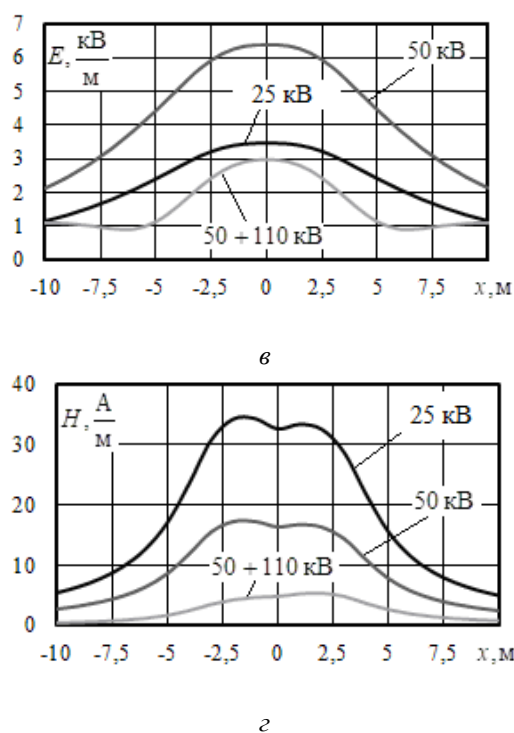
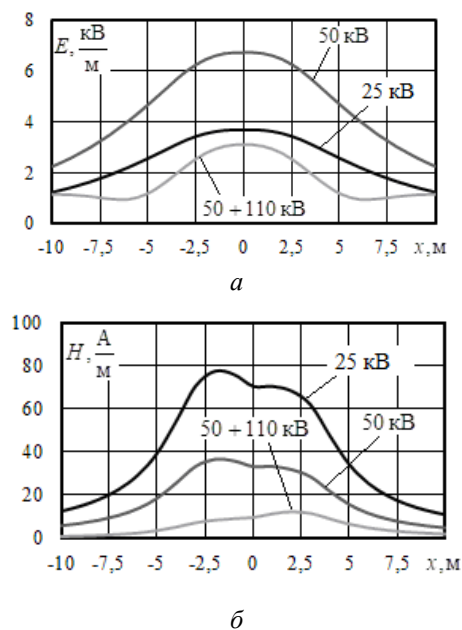


Рис. 12. Максимальные (а, б) и средние (в, г) значения напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) поля

Fig. 12. Top (a, b) and average (v, g) values of electric (a, v) and magnetic (b, g) field strength

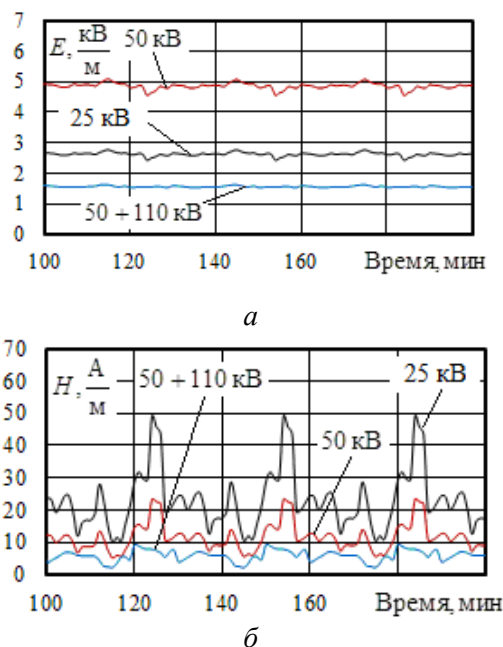


Рис. 13. Динамика напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля

Fig. 13. Dynamics of electric (a) and magnetic (b) fields

Таблица 7. Напряженность электрического и магнитного поля

Table 7. Electric and magnetic field strength

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
$Max(E_{max})$, кВ/м	3,68	6,71	3,11	-82,34	15,49
$max(H_{max})$, А/м	77,51	36,66	12,36	52,7	84,05
$Mid(E_{max})$, кВ/м	3,46	6,37	2,97	-84,10	14,16
$Mid(H_{max})$, А/м	34,23	17,21	5,32	49,72	84,46

Результаты расчета электромагнитных полей позволяют сделать следующие выводы:

1. Значения напряженности электрического и магнитного полей не превышают допустимые значения для электротехнического персонала.

2. Применение перспективных СТЭ приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля. Так, максимальные и средние значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ на 82 и 84 % соответственно. Однако аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 14 %.

3. Максимальные значения напряженностей магнитного поля уменьшаются по сравнению с СТЭ 25 кВ на 53 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ соответственно.

Заключение

Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения могут быть реализованы на основе методов моделирования СТЭ переменного тока в фазных координатах, разработанных в ИРГУПС и реализованных в программном комплексе «Fazonord». Результаты моделирования для типовых межподстанционных зон СТЭ 50 и 50+110 кВ показали положительные эффекты от применения указанных СТЭ, заключающиеся в стабилизации напряжений на токоприемниках ЭПС, снижении потерь, уменьшении суммарного электропотребления, а также улучшении показателей качества электроэнергии по несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций. Однако, на шинах высокого напряжения перспективных ТС наблюдается повышенный уровень гармонических искажений по сравнению с ТС 25 кВ. Исключение составляет фаза С ТП 1, для которой величина k_U в СТЭ 50+110 кВ ниже, чем в СТЭ 25 кВ.

Применение перспективных СТЭ приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля. Так, максимальные значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ на 82 %. Аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 16 %.

Напряженность магнитного поля перспективных систем электроснабжения уменьшается по сравнению с СТЭ 25 кВ на 50 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ соответственно.

Список литературы

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. 104 с.
2. Котельников А.В., Нестрахов А.С. Железнодорожный транспорт России в 2000-2030 гг. (научная концепция) // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 5. С. 3–15.
3. Kotelnikov A., Glonti A. Word trends in the development of railway electrification // Rail International. 2001. August/September. P. 26–35.
4. Бадёр М.П., Иньков Ю.М., Розенберг Е.Н. Энергосберегающие технологии интеллектуального железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 4. С. 36–43.
5. Котельников А.В., Лисицын А.Л., Быков В.А. Перспективы развития электрификации железных дорог России и задачи электротехнической промышленности по ее обеспечению // Электро. 2001. № 2. С. 2–4.
6. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц // Железные дороги мира. 2002. № 8. С. 40–46.
7. Электромагнитная безопасность систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А.В. Котельников, А.Б. Косарев, И.И. Полишкина и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 6. С. 10–14.
8. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC'09. Kyoto, 2009. P. 567–570.
9. Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction power-supply system / Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangnin et al. // 2008 IEEE Canada Electric Power Conference. 2008. DOI: 10.1109/EPC.2008.4763383.
10. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway / Han Zhengqing, Zhang Yuge, Liu Shuping et al. // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2011. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748640.
11. Lei Xue, Xiaoqing Han, Shuying Li. Influence of traction transformer with different connection forms on power quality of the grid // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582113.
12. Alexander Cherepanov, Anton Kutsiy. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI:10.1007/978-3-319-70987-1_10.

13. Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research // IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). 2020. | DOI: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194938.
14. Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis / Zhang Liyan, Liang Shiwen, Li Xin et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3069980.
15. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway / Chen Minwu, Luo Jie, Jiang Wenbing et al. // TENCON 2015. 2015 IEEE Region 10 Conference. 2015. DOI: 10.1109/TENCON.2015.7372869.
16. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues / Mohamed Rageh, Auguste Ndtoungou, Abdelhamid Hamadi et al. // IECON 2018 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591768.
17. Nezevak V., Cheremisin V. Prediction of Bandwidth Increase of Railways Areas at the Change Expense of The Direct Current Traction Power Supply System Characteristics by Implementation of Electric Storage Units // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216295.
18. 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 (USBEREIT). 2020. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.
19. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
20. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2018. 382 с.

References

1. Kotelnikov A.V. Elektrifikaciya zhelezny`x dorog [Railway electrification]. Mirovy`e tendencii i perspektivy` [Global trends and prospects]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 104 p.
2. Kotelnikov A.V., Nestraxov A.S. Zheleznodorozhny`j transport Rossii v 2000–2030 gg. (nauchnaya koncepciya) [Railway transport in Russia in 2000–2030 (scientific concept)]. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Bulletin]*, 2000, No. 5, pp. 3–15.
3. Kotelnikov A., Glonti A. Word trends in the development of railway electrification. *Rail International*, 2001, pp. 26–35.
4. Badyor M.P., In`kov Yu.M., Rozenberg E.N. E`nergoberegayushhie tehnologii intellektual`nogo zheleznodorozhnogo transporta [Energy-saving technologies of intelligent railway transport]. *Electronics and electrical equipment of transport [E`lektronika i e`lektooborudovanie transporta]*, 2012, No. 4, pp. 36–43.
5. Kotelnikov A.V., Lisicyn A.L., By`kov V.A. Perspektivy` razvitiya e`lektrifikacii zhelezny`x dorog Rossii i zadachi e`lektrotexnicheskoj promy`shlennosti po ee obespecheniyu [Prospects for the development of electrification of Russian railways and the tasks of the electrical industry to ensure it]. *E`lektrika [Electro]*, 2001, No.2, pp. 2–4.
6. Vasilyanskij A.M., Mamoshin R.R., Yakimov G.B. Sovershenstvovanie sistemy` tyagovogo e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog, e`lektificirovanny`x na peremennom toke 27,5 kV, 50 Gcz [Improvement of the traction power supply system for railways electrified with alternating current of 27.5 kV, 50 Hz]. *Zhelezny`e dorogi mira [Railways of the world]*, 2002, No. 8, pp. 40–46.
7. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B., Polishkina I.I. E`lektromagnitnaya bezopasnost` sistem tyagovogo e`lektrosnabzheniya pov`shennogo napryazheniya [Electromagnetic safety of high-voltage traction power supply systems]. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Bulletin]*, 2002, No. 6, pp. 10–14.
8. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09. Kyoto, 2009*, pp. 567–570.
9. Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangnin, Liu Yingying, Jiang Peisi. Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction power-supply system. 2008 IEEE Canada Electric Power Conference. 2008. Publisher: IEEE.
10. Zhengqing Han, Yuge Zhang, Shuping Liu, Shibin Gao. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference: 2011. Publisher: IEEE.
11. Lei Xue, Xiaoqing Han, Shuying Li. Influence of traction transformer with different connection forms on power quality of the grid. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. Publisher: IEEE.
12. Alexander Cherpanov, Anton Kutsiy. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). | Publisher: IEEE.
13. Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). 2020. Publisher: IEEE
14. Liyan Zhang, Shiwen Liang, Xin Li, Ying Jia. Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Publisher: IEEE.
15. Minwu Chen, Jie Luo, Wenbing Jiang, Yaowu Wang. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway. TENCON 2015. 2015 IEEE Region 10 Conference. 2015. Publisher: IEEE.
16. Mohamed Rageh, Auguste Ndtoungou, Abdelhamid Hamadi, Kamal Al-Haddad. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues. IECON 2018 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. Publisher: IEEE.

17. Vladislav Nezevak, Vasyliy Cheremisin. Prediction of Bandwidth Increase of Railways Areas at the Change Expense of The Direct Current Traction Power Supply System Characteristics by Implementation of Electric Storage Units. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Publisher: IEEE.

18. Uyangasaikhan Bumtsend, Murodbek Safaraliev, Anvari Ghulomzoda, Bakhtiyor Ghoziev, Javod Ahyoev, Ghulomabdol Ghulomabdolov. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network. 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 2020. Publisher: IEEE.

19. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichny`e rezhimy` e`lektricheskix system [Complex-symmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk University Publ., 2005. 273 p.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. E`lektromagnitnaya bezopasnost` v sistemax e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog: modelirovanie i upravlenie [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and management]. Angarsk: AnGTU Publ., 2018. 382 p.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: santela89@mail.ru

Степанов Андрей Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru.

Середкин Дмитрий Александрович – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Фесак Илья Анатольевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: fesakilya@yandex.ru

Information about the authors

Andrej V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Aleksandr V. Cherepanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: santela89@mail.ru

Andrej D. Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru

Dmitriy A. Seredkin – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Ilya A. Fesak – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: fesakilya@yandex.ru