

**Информация об авторах**

Баясгалан Даваасурэн - главный инженер службы организация перевозок УБЖД, г. Улаанбаатар, Монголия, e-mail: davka-iriiiit@yandex.ru

Authors

Bayasgalan Davaasuren – chief engineer of the transportation organization of the Ulaanbaatar Railway, Ulaanbaatar, Mongolia, e-mail: davka-iriiiit@yandex.ru

Для цитирования

Баясгалан Даваасурэн Возможности для транзитных перевозок продукции нефте- и газопереработки через территорию Монголии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 58.- № 2. - С. 64-72. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).64-72.

For citation

Bayasgalan Davaasuren. Vozmozhnosti dlya tranzitnykh perevozok produktsii nefte- i gazopererabotki cherez territoriyu mongolii [Opportunities for transit of oil products and gas through the territory of Mongolia]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 64-72. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).64-72

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).72-82

В. П. Закарюкин¹, А. В. Крюков^{1,2}, Л. А. Астраханцев¹

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

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

Дата поступления: 29 мая 2018 г.

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. В большинстве работ по качеству электроэнергии и действующих нормативных документах рассматриваются только амплитудные значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, позволяющие определять допустимость теплового воздействия на электрооборудование. Наиболее полное описание несимметричного режима может быть получено с использованием как амплитудных, так и фазовых параметров, характеризующих несимметрию.

В статье представлены результаты разработок технологий компьютерного моделирования, позволяющих определять и амплитудные, и фазовые характеристики несимметрии. Эти технологии реализованы в программном комплексе Fazonord, предназначенном для моделирования режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) в фазных координатах.

В качестве примера рассмотрены результаты определения несимметричных режимов в типовых СЭЖД 25 и 2×25 кВ. Моделирование проведено в двух вариантах: при движении одного грузового поезда массой 3200 т в нечетном направлении; при движении 6 грузовых поездов массой 3200 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т – в четном.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

– методика и программный комплекс Fazonord позволяют получить исчерпывающую информацию о динамике процессов, характеризующих несимметрию;

– наряду с комплексными показателями, отвечающими несимметрии напряжений, могут быть определены аналогичные параметры для токов, протекающих по элементам СЭЖД;

– динамика процесса изменения фазовых показателей для СЭЖД 2х25 кВ отличается большей дисперсией по сравнению с системой 25 кВ, но по отношению к модулю коэффициента несимметрии по обратной последовательности наблюдается обратная картина.

Предложенный подход обладает универсальностью и может быть использован для исследования несимметричных режимов в специфических и перспективных системах тягового электроснабжения.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, амплитудные и фазовые показатели несимметрии, моделирование.

V. P. Zakaryukin¹, A. V. Kryukov^{1,2}, L. A. Astrakhancev¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

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

Received: May 29, 2018

AMPLITUDE AND PHASE CHARACTERISTICS OF NON-SYMMETRY OF VOLTAGES IN THE RAILWAY ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS

Abstract. Most works on electric power quality and the existing standard documents consider only amplitude values of inverse and zero sequence voltage non-symmetry coefficients, making it possible to define admissibility of thermal impact on the electric equip-



ment. The most complete description of the non-symmetrical mode can be obtained using non-symmetry amplitude and phase parameters.

The article presents the results of computer modeling technologies that allow defining amplitude and phase characteristics of non-symmetry. These technologies are implemented in the software package Fazonord on the basis of phase coordinates methods of definition of railway power supply system modes.

The results of non-symmetrical modes definition in standard 25 and 2x25 kV railway power systems are presented as an example. The modeling is carried out in two options: during the movement of one cargo train weighing 3200 t in the odd direction; during the movement of 6 cargo trains weighing 3200 t in the odd direction and the same number of trains weighing 6000 t in the even direction.

The obtained results have allowed making the following conclusions:

– the technique and the software package Fazonord make it possible to obtain exhaustive information on dynamics of processes characterizing non-symmetry;

– together with complex indicators responding to the voltage non-symmetry, similar parameters for the currents flowing on the railway power supply system elements can be determined;

– the 2x25 kV system is characterized by a larger variance compared to the 25 kV system, but negative sequence coefficient module has a smaller variance in 25 kV than in 2x25 kV system.

The offered approach is universal and can be used for non-symmetrical modes research in the specific and perspective traction power supply systems.

Keywords: railway power supply systems, amplitude and phase non-symmetry indicators, modeling.

Введение

Несимметричные режимы в трехфазных электрических сетях характеризуются комплексными значениями фазных напряжений или их симметричных составляющих для прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{U}_A = U_A e^{j\varphi_{UA}}; \dot{U}_B = U_B e^{j\varphi_{UB}};$$

$$\dot{U}_C = U_C e^{j\varphi_{UC}}; \dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_{U1}};$$

$$\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_{U2}}; \dot{U}_0 = U_0 e^{j\varphi_{U0}}.$$

Таким образом, наиболее полное описание несимметричного режима требует определения амплитудных U_A, U_B, U_C (U_1, U_2, U_0) и фазовых

$\varphi_{UA}, \varphi_{UB}, \varphi_{UC}$ ($\varphi_{U1}, \varphi_{U2}, \varphi_{U0}$) параметров.

Наряду с перечисленными параметрами могут быть введены комплексные коэффициенты

$$\dot{k}_{2U} = k_{2U} e^{j\beta_2} = k_{2U} e^{j(\varphi_{U2} - \varphi_{U1})};$$

$$\dot{k}_{0U} = k_{0U} e^{j\beta_0} = k_{0U} e^{j(\varphi_{U0} - \varphi_{U1})}.$$

В большинстве работ по качеству электроэнергии и в действующих нормативных документах рассматриваются только амплитудные значения k_{2U}, k_{0U} этих коэффициентов, позволяющие определять допустимость теплового воздействия несимметрии на электрооборудование.

Для систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), в которых составляющие нулевой последовательности не проявляются, в работах [1–3] предлагается рассматривать фазовый показатель $\beta_2 = \varphi_{U2} - \varphi_{U1}$. Как указано в этих работах, учет амплитудных и фазовых значений позволит более адекватно анализировать влияние несимметрии напряжений на электрооборудование.

Методы измерения параметров β_2 предложены в работах [1, 2], однако методология расчетов этих показателей развита слабо. В данной ста-

тье приведены результаты разработок технологий компьютерного моделирования, позволяющих определять параметры β_2 и β_0 . Данные технологии реализованы в программном комплексе Fazonord на базе методов определения режимов СЭЖД в фазных координатах [4–6].

Рассматриваемые технологии являются универсальными и позволяют определять несимметрию как в типовых СЭЖД 25 и 2×25 кВ, так и в перспективных системах повышенного напряжения [7–11]. Примеры моделирования приведены далее.

Результаты моделирования типовых СЭЖД

Моделирование осуществлялось программным комплексом Fazonord для типовых систем тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ (рис. 1 и 2). Рассматривались двухпутные участки железной дороги протяженностью 150 км. Системы тягового электроснабжения включали три межподстанционные зоны (МПЗ) длиной в 50 км.

Моделирование проведено в двух вариантах:

1) движение одного грузового поезда массой 3200 т в нечетном направлении;

2) движение пакета из 6 грузовых поездов массой 3200 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т в четном.

Фрагменты схем расчетных моделей представлены на рис. 3 и 4.

График движения поездов показан на рис. 5. Токовые профили приведены на рис. 6. Показатели несимметрии определялись на шинах 220 кВ тяговой подстанции (ТП) номер 3.

Результаты моделирования для варианта 1 приведены в табл. 1–3 и проиллюстрированы на рис. 7–9.

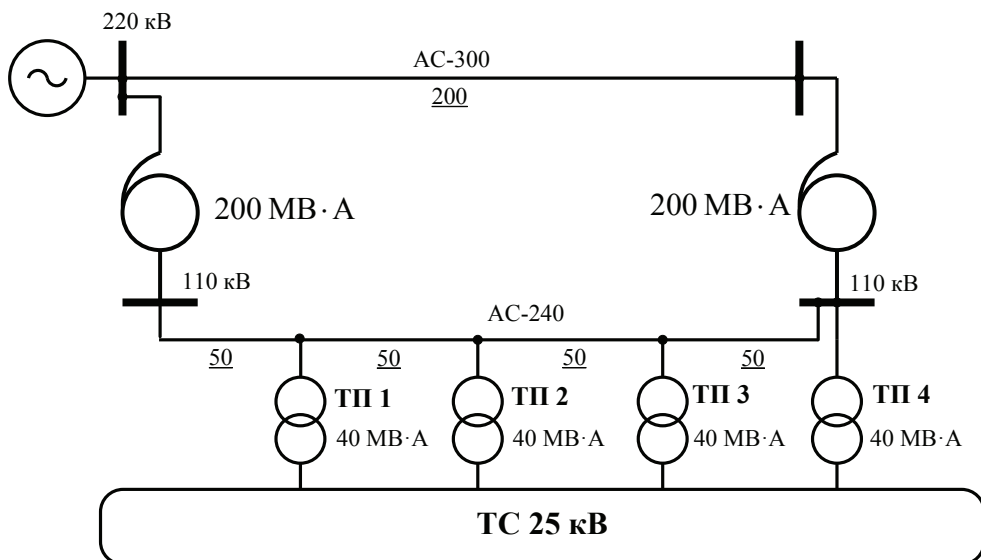


Рис. 1. Схема СЭЖД 1×25 кВ

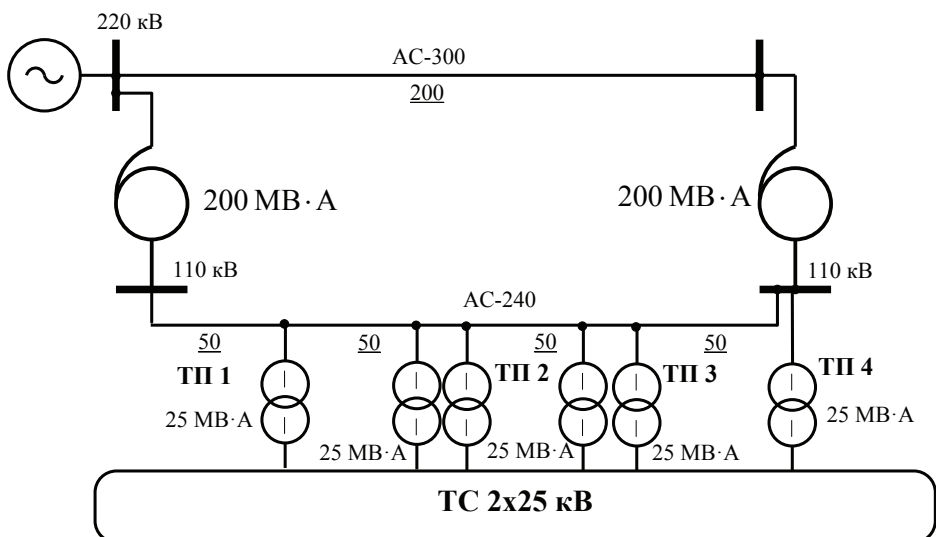


Рис. 2. Схема СЭЖД 2×25 кВ

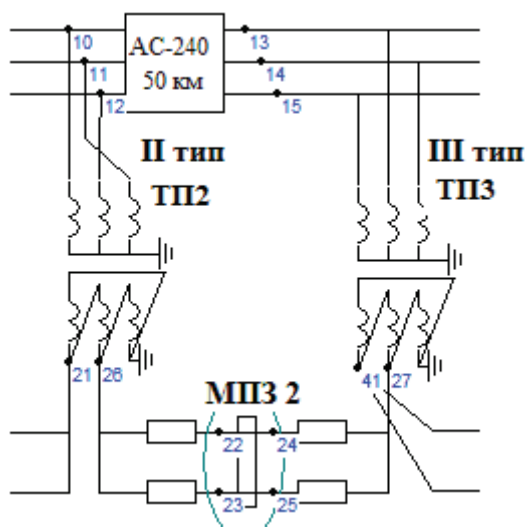


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели для СЭЖД 25 кВ

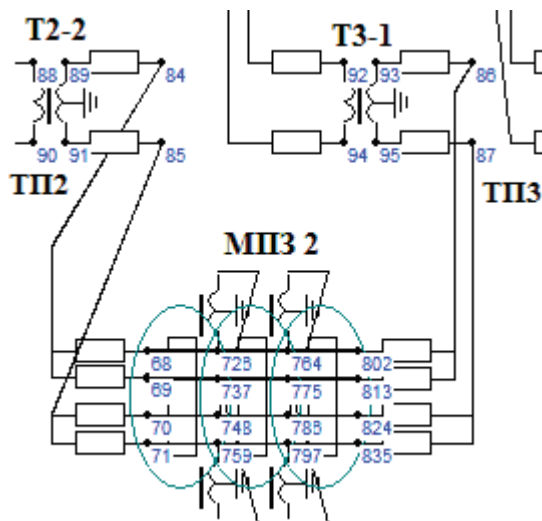
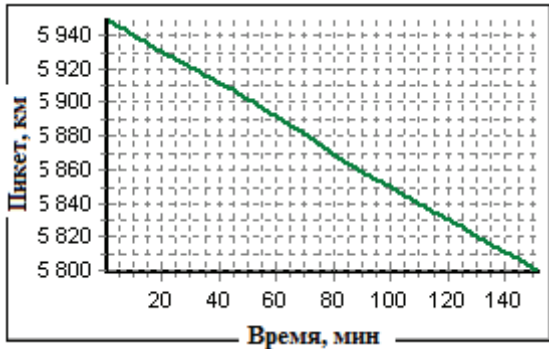
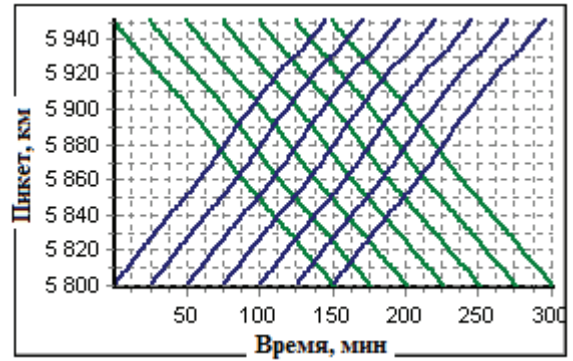


Рис. 4. Фрагмент схемы расчетной модели для СЭЖД 2×25 кВ



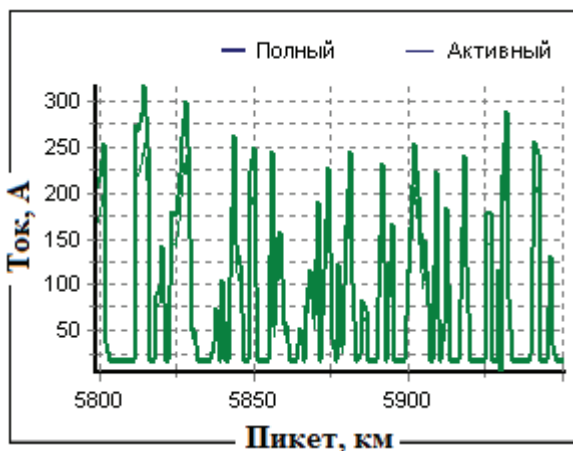
а)



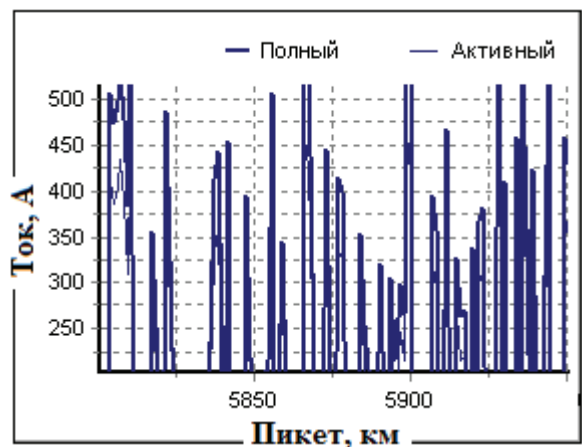
б)

Рис. 5. Графики движения поездов:

а - вариант 1; б - вариант 2



а)



б)

Рис. 6. Токовые профили:

а - нечетный поезд массой 3200 т; б - четный поезд массой 6000 т

Т а б л и ц а 1

Сводные показатели по модулям напряжений U_1, U_2 для варианта 1

Параметр	$U_1, \text{кВ}$		Различие, %	$U_2, \text{В}$		Различие, %
	25	2×25		25	2×25	
Минимум	67,40	67,600	-0,30	20,4	44,5	-54,2
Ср. значение	67,90	68,066	-0,24	259	258	0,39
Максимум	68,08	68,230	-0,22	857	827	3,63
С. к. о.	0,188	0,180	4,44	235	226	3,98

Т а б л и ц а 2

Сводные показатели по углам $\varphi_{U1}, \varphi_{U2}$ для варианта 1

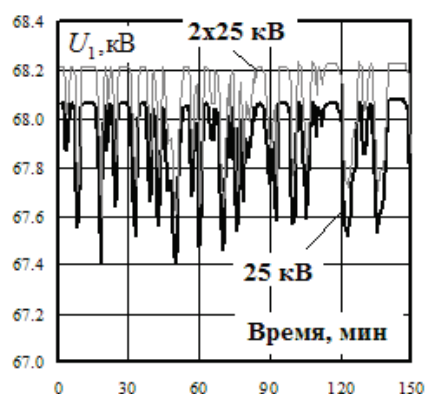
Параметр	$\varphi_{U1}, \text{рад}$		Различие, %	$\varphi_{U2}, \text{рад}$		Различие, %
	25	2×25		25	2×25	
Минимум	-0,014	-0,015	-6,67	-2,41	-3,133	-23,08
Ср. значение	-0,009	-0,009	0,00	-0,42	-0,469	-10,45
Максимум	-0,007	-0,007	0,00	1,73	3,050	-43,28
С. к. о.	0,002	0,002	0,00	1,44	1,736	-17,05



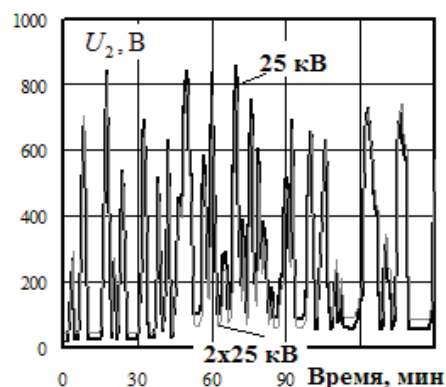
Таблица 3

Сводные показатели по комплексному коэффициенту несимметрии k_{2U} для варианта 1

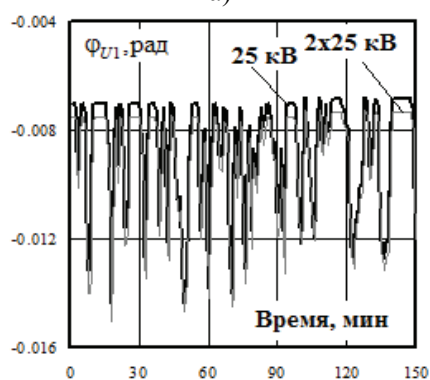
Параметр	$k_{2U}, \%$			$\beta_2 = \phi_{U2} - \phi_{U1}, \text{рад}$		
	25 кВ	2x25 кВ	Различие, %	25 кВ	2x25 кВ	Различие %
Минимум	0,030	0,070	-57,14	-2,397	-3,133	-23,49
Ср. значение	0,383	0,381	0,52	-0,407	-0,469	-13,22
Максимум	1,270	1,220	4,10	1,739	3,050	-42,98
С. к. о.	0,348	0,333	4,50	1,437	1,736	-17,22



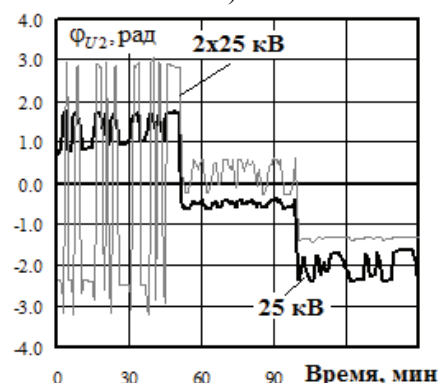
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Зависимости модулей и фаз напряжений прямой и обратной последовательностей на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

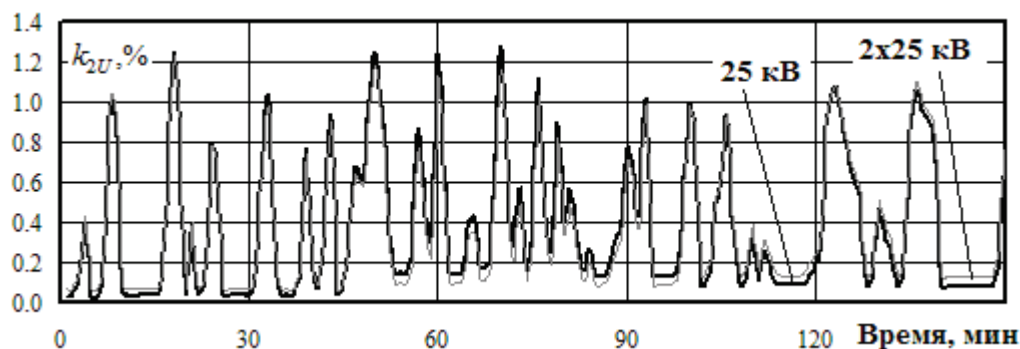


Рис. 8. Зависимость коэффициента k_{2U} на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

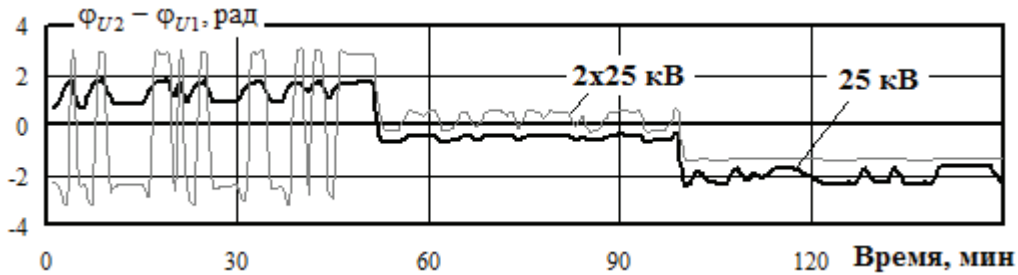


Рис. 9. Зависимость разности фаз напряжений обратной и прямой последовательностей на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

На рис. 10, 11 представлены амплитудно-фазовые характеристики коэффициентов k_{2U} и углов между векторами обратной и прямой последовательностей. На рис. 10 показаны амплитудно-фазовые характеристики (АФХ). Графики конечных разностей, характеризующих скорости вариации величин k_{2U} и β , приведены на рис. 11.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Величины коэффициентов k_{2U} для СЭЖД 25 и 2×25 кВ при движении одного поезда отличаются незначительно. Различия по фазовому параметру β_2 более существенны и достигают по максимумам 43 %.

2. На временных зависимостях $\beta_2 = \beta_2(t)$ и АФХ выделяются три участка, отвечающих нахождению поезда в одной из трех МПЗ. Резкие изменения характера вариаций угла β_2 происходят при прохождении поездом нейтральной вставки, так как при этом меняется фазировка подключения тяговой нагрузки.

3. Размах колебаний параметра β_2 и скорость его изменения в СЭЖД 2×25 кВ значительно больше, чем в системе 25 кВ, однако модуль коэффициента несимметрии остается весьма небольшим.

Результаты моделирования для варианта 2 в интервале времени от 60 мин до 220 мин, когда поезда пакета заполняют весь расчетный участок, приведены в табл. 4-6 и проиллюстрированы на рис. 12 - 16.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. При увеличенных размерах движения частота прохождения поездами нейтральных вставок возрастает и зависимости $\beta_2 = \beta_2(t)$, а также АФХ приобретают некоторую периодичность.

2. Средние величины угла β_2 в системах 25 кВ при одинаковых графиках движения поездов могут превышать аналогичный показатель для СЭЖД 2×25 кВ в несколько раз. Макси-

мальные значения показателя β_2 практически совпадают.

3. При значительных вариациях разности фаз β_2 величины модулей коэффициента несимметрии остаются небольшими и не превышают нормально допустимых пределов. Поэтому контроль амплитудных и фазовых составляющих комплексного коэффициента несимметрии должен выполняться совместно.

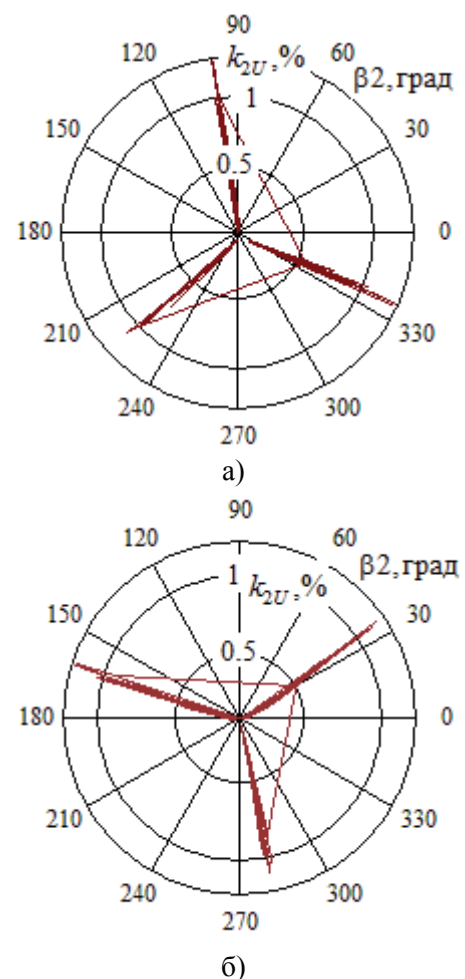


Рис. 10. Амплитудно-фазовые характеристики: а) 25 кВ; б) 2×25 кВ

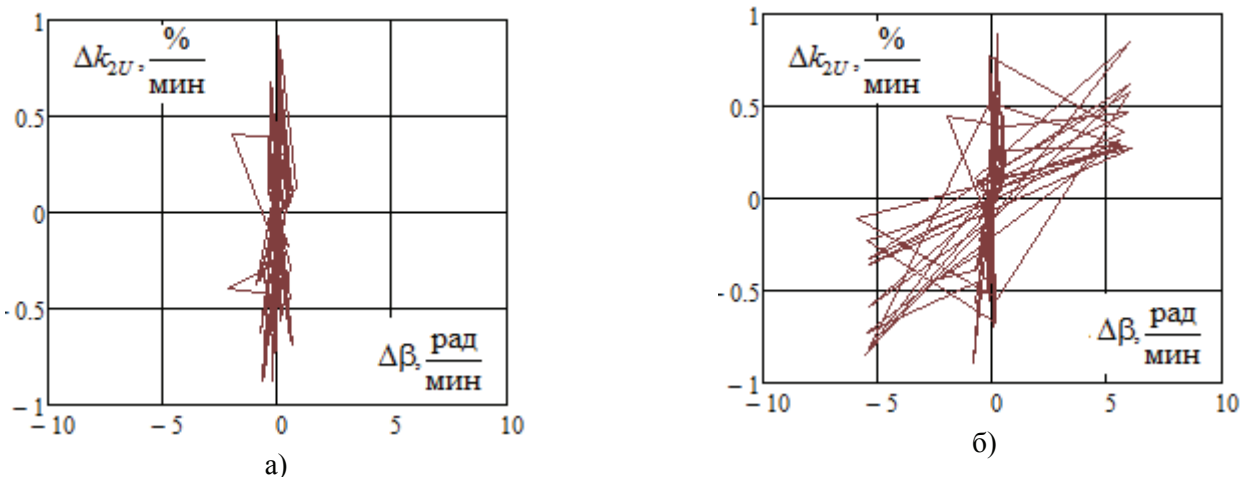
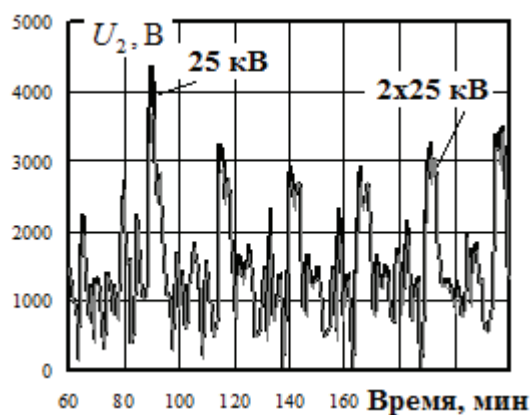


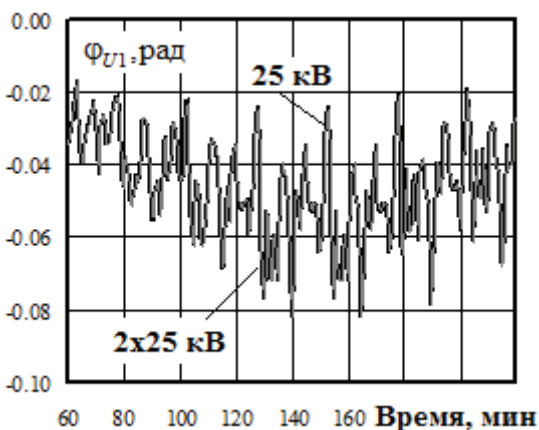
Рис. 11. Графики конечных разностей, характеризующих скорости вариации величин:
а) 25 кВ; б) 2x25 кВ



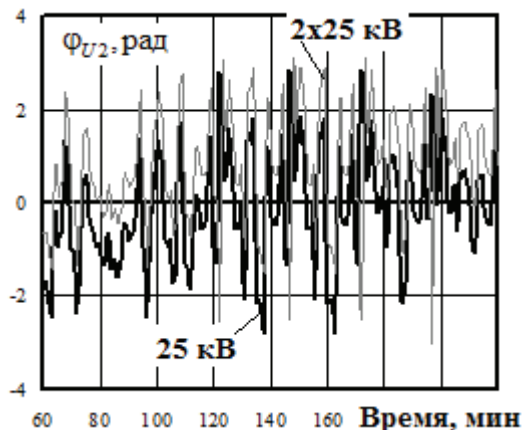
а)



б)



в)



г)

Рис. 12. Зависимости модулей и фаз напряжений прямой и обратной последовательностей на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

Т а б л и ц а 4

Сводные показатели по модулям напряжений U_1, U_2 для варианта 2

Параметр	$U_1, \text{кВ}$		Различие, %	$U_2, \text{В}$		Различие, %
	25	2×25		25	2×25	
Минимум	59,77	61,170	-2,29	43,1	50,8	-15,16
Ср. значение	64,31	64,743	-0,67	1459	1373	6,26
Максимум	67,20	67,410	-0,31	4335	3677	17,90
С. к. о.	1,513	1,316	14,97	828	773	7,12



Таблица 5

Сводные показатели по углам $\varphi_{U1}, \varphi_{U2}$ для варианта 2

Параметр	$\varphi_{U1}, \text{рад}$		Различие, %	$\varphi_{U2}, \text{рад}$		Различие, %
	25	2x25		25	2x25	
Минимум	-0,082	-0,082	0,0	-2,731	-2,954	-7,55
Ср. значение	-0,046	-0,046	0,0	-0,125	0,786	-116
Максимум	-0,016	-0,016	0,0	2,745	2,981	-7,92
С. к. о.	0,014	0,014	0,0	1,236	1,260	-1,90

Таблица 6

Сводные показатели по комплексному коэффициенту несимметрии k_{2U} для варианта 2

Параметр	$k_{2U}, \%$			$\beta_2 = \varphi_{U2} - \varphi_{U1}, \text{рад}$		
	25 кВ	2x25 кВ	Различие %	25 кВ	2x25 кВ	Различие %
Минимум	0,070	0,080	-12,50	-2,684	-2,908	-7,70
Ср. значение	2,282	2,129	7,19	-0,079	0,832	-109
Максимум	6,920	5,780	19,72	2,798	3,032	-7,72
С. к. о.	1,323	1,219	8,53	1,24	1,263	-1,82

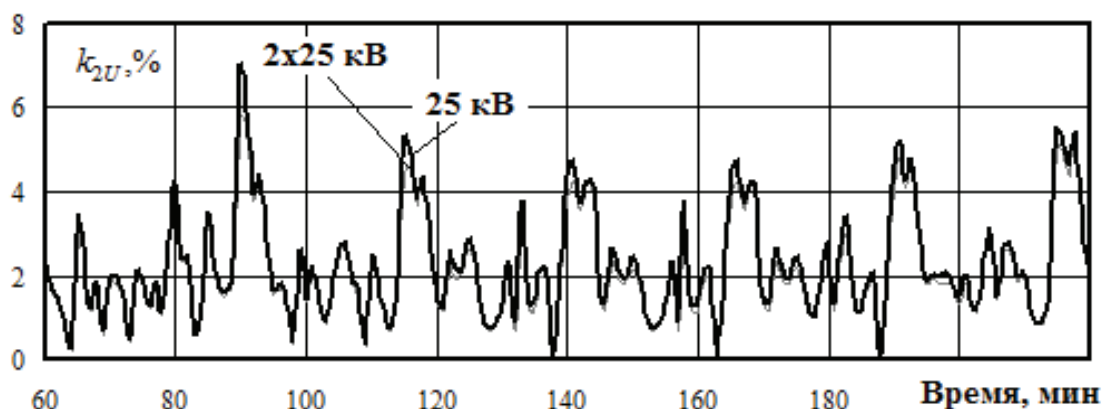
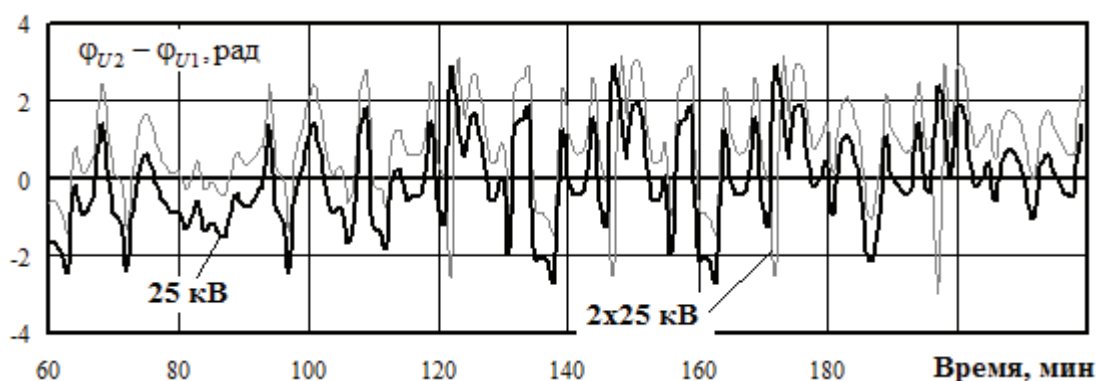
Рис. 13. Зависимость коэффициента k_{2U} на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

Рис. 14. Зависимость разности фаз напряжений обратной и прямой последовательностей на шинах высокого напряжения ТПЗ от времени

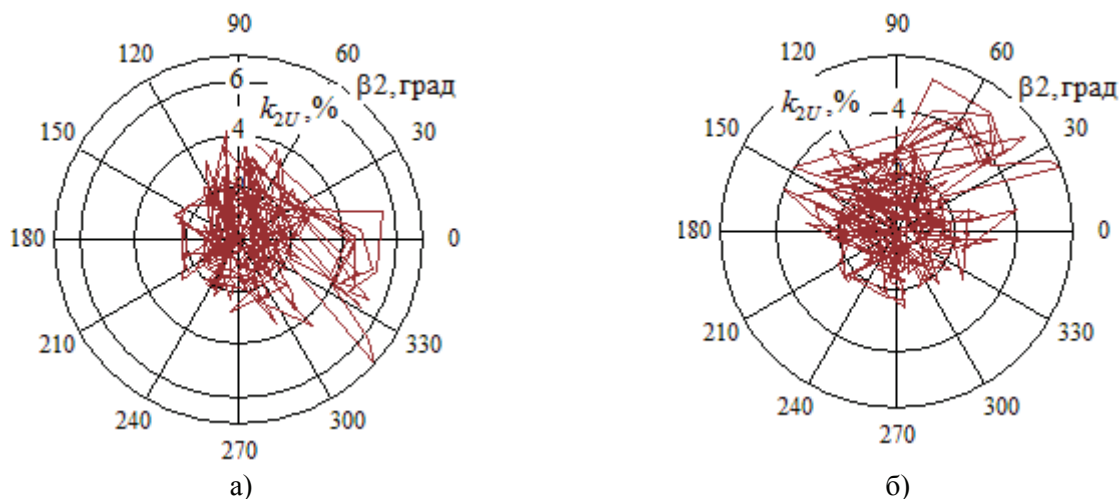


Рис. 15. Амплитудно-фазовые характеристики:

а - 25 кВ; б - 2×25 кВ

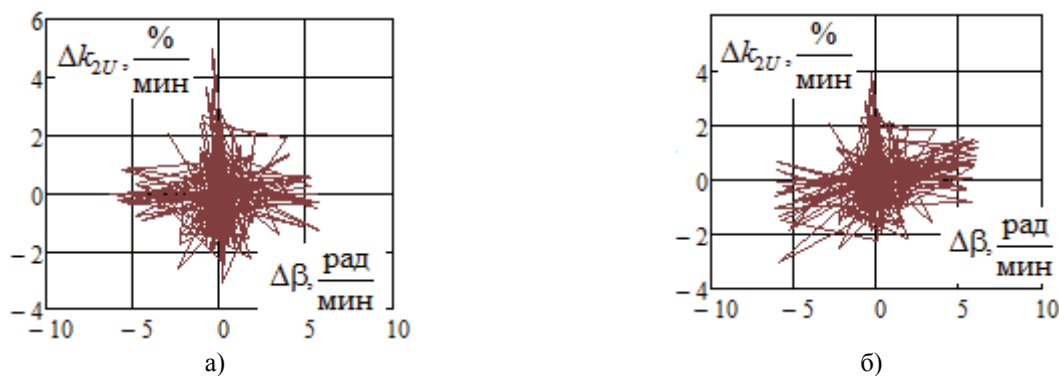


Рис. 16. Графики конечных разностей, характеризующие скорости вариации величин:

а - 25 кВ; б - 2×25 кВ

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. При увеличенных размерах движения частота прохождения поездами нейтральных вставок возрастает и зависимости $\beta_2 = \beta_2(t)$, а также АФХ приобретают некоторую периодичность.

2. Средние величины угла β_2 в системах 25 кВ при одинаковых графиках движения поездов могут превышать аналогичный показатель для СЭЖД 2×25 кВ в несколько раз. Максимальные значения показателя β_2 практически совпадают.

3. При значительных вариациях разности фаз β_2 величины модулей коэффициента несимметрии остаются небольшими и не превышают нормально допустимых пределов. Поэтому контроль амплитудных и фазовых составляющих комплексного коэффициента несимметрии должен выполняться совместно.

Предложенный подход обладает универсальностью и может быть использован для исследования процессов несимметрии в специфических

и перспективных системах тягового электроснабжения [7–11]:

СЭЖД повышенного напряжения [11, 12];

СЭЖД с экранирующими и усиливающими проводами [13];

СЭЖД с симметрирующими трансформаторами [14, 15];

СЭЖД с коаксиальными кабелями [10];

СЭЖД с отсасывающими трансформаторами, включенными в рассечку рельсов или обратного провода [16];

СЭЖД с регулируемыми симметрирующими устройствами [17–21].

Наряду с определением параметров β_2 для напряжений могут быть вычислены аналогичные показатели для токов.

Заключение

Разработанная компьютерная технология позволяет получать подробную информацию о динамике процессов, характеризующих несимметрию в системах электроснабжения железных дорог.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Силаев М.А., Тульский В.Н., Карташев И.И. Влияние быстрых изменений несимметрии напряжений на вибрационные характеристики асинхронных двигателей // Электротехника. № 6. 2014. С. 43-50.
2. Силаев М.А., Тульский В.Н. Исследование перемежающейся несимметрии напряжения и разработка способа её измерения // Управление качеством электрической энергии. М.: Радуга, 2014. С. 305-312.
3. Церазов А.Л. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: 1962. 182 с.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. 273 с.
5. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИРГУПС, 2011. 170 с.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems // Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. P. 504-508.
7. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
8. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
9. 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. № 8. 2002. С. 40-46.
10. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Принципы построения систем электроснабжения железных дорог. М.: Теплотехник, 2014. 166 с.
11. Котельников А.В. Электрификация железных дорог: мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. 104 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность тяговых сетей повышенного напряжения // Электробезопасность. № 4. 2016. С. 4-11.
13. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Электромагнитная безопасность в тяговых сетях с расщепленными экранящими и усиливающими проводами // Вестник РГУПС. № 4(68). 2017. С. 142-152.
14. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent Traction Power Supply System // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 692. Springer, Cham. P. 91-99.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдеев И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. М.: Берлин: Директ-Медиа, 2017. 168 с.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оборудованных отсасывающими трансформаторами // Вестник ИРГТУ. Т. 21. № 8. 2017. С. 92-102.
17. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
18. Multiple SVC installations for traction load balancing in Central Queensland. ABB Application Note A02-0134 E, 2011-03.
19. Amar Alsulami. Balancing Asymmetrical Load Using a Static Var Compensator. Master of Science Thesis. Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2014. 90 p.
20. Adrian Pana (2011). Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation, Power Quality and Monitoring, Analysis and Enhancement, Dr. Ahmed Zobaa (Ed.), ISBN: 978-953-307-330-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com>. Дата обращения 05.03.2018.
21. Mohamed M. Saied. Circuit for Balancing Harmonic-Polluted Three-Phase Networks. Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XVI, No. 1, 2013. P. 19-24.

REFERENCES

1. Silaev M.A., Tul'skii V.N., Kartashev I.I. Vliyanie bystrykh izmenenii nesimmetrii napryazhenii na vibratsionnye kharakteristiki asinkhronnykh dvigatelei [Influence of rapid changes in voltage asymmetry on the vibration characteristics of induction motors]. Elektrotekhnik, No. 6, 2014, pp. 43-50.
2. Silaev M.A., Tul'skii V.N. Issledovanie peremezhayushcheysya nesimmetrii napryazheniya i razrabotka sposoba ee izmereniya [Investigation of intermittent voltage asymmetry and development of a method for its measurement]. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii []. Moscow: Raduga Publ., 2014, pp. 305-312.
3. Tserazov A.L. Issledovanie vliyaniya nesimmetrii i nesinusoidal'nosti napryazheniya na rabotu trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the influence of unbalance and non-sinusoidal voltage on the operation of three-phase asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Ph.D. (Engineering) thesis.]. Moscow, 1962, 182 p.
4. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. un-ty Publ., 2005, 273 p.
5. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IRGUPS Publ., 2011. 170 p.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems. Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008, pp. 504-508.
7. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
8. Biesenack H., Braun E., George G. et al. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
9. Vasilyanskii A.M., Mamoshin R.R., Yakimov G.B. Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke 27,5 kV, 50 Gts [Improvement of traction power supply system for railways electrified at alternating current 27.5 kV, 50 Hz]. Zheleznnye dorogi mira [Railways of the World], No. 8, 2002, pp. 40-46.



10. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Printsipy postroeniya sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Principles of construction of power supply systems for railways]. Moscow: Teplotekhnik Publ., 2014, 166 p.
11. Kotel'nikov A.V. Elektrifikatsiya zheleznykh dorog: mirovye tendentsii i perspektivy [Electrification of railways: world trends and prospects]. Moscow: Intekst Publ., 2002, 104 p.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' tyagovykh setei povyshennogo napryazheniya [Electromagnetic safety of traction networks of increased voltage]. *Elektrobezopasnost'* [Electrical safety], No. 4, 2016, pp. 4-11.
13. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Nguen Ty. Elektromagnitnaya bezopasnost' v tyagovykh setyakh s rassheplennymi ekstra-niruyushchimi i usilivayushchimi provodami [Electromagnetic safety in traction networks with split shielding and amplifying wires]. *Vestnik RGUPS*, No. 4(68), 2017, pp. 142-152.
14. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent Traction Power Supply System. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 692. Springer, Cham, pp. 91-99.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriruyushchimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems equipped with balancing transformers]. Moscow; Berlin: Direkt-Media Publ., 2017, 168 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A. V. Modelirovanie elektromagnitnykh polei v tyagovykh setyakh, oborudovannykh otsasyvayushchimi transformatorami [Modeling of electromagnetic fields in traction networks equipped with negative boosting transformers]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], Vol. 21, No. 8, 2017, pp. 92-102.
17. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Increase the quality of energy in electrical networks]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1985, 268 p.
18. Multiple SVC installations for traction load balancing in Central Queensland. ABB Application Note A02-0134 E, 2011-03.
19. Amar Alsulami. Balancing Asymmetrical Load Using a Static Var Compensator. Master of Science Thesis. Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2014, 90 p.
20. Pana A. Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation, Power Quality and Monitoring, Analysis and Enhancement. In Dr. Ahmed Zobia (ed.), 2011. ISBN: 978-953-307-330-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com>. Access date: 05.03.2018.
21. Saied M. Mohamed. Circuit for Balancing Harmonic-Polluted Three-Phase Networks. *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal Vol. XVI, No. 1, 2013, pp. 19-24.

Информация об авторах

Authors

Закарюкин Василий Пантелеймонович - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru
Крюков Андрей Васильевич - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru
Астраханцев Леонид Алексеевич - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

Zakaryukin Vasily Panteleimonovich – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru
Kryukov Andrei Vasilievich – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Astrachancev Leonid Alexeevich – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk

Для цитирования

For citation

Закарюкин В. П. Амплитудно-фазовые характеристики несимметрии напряжений в системах электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. А. Астраханцев // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. - 2018. - Т. 58 № 2. - С. 72–82. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).72-82.

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Astrachancev L.A. Amplitudno-fazovye kharakteristiki nesimmetrii napryazhenii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Amplitude and phase characteristics of non-symmetry of voltages in the railway electric supply systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 72–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).72-82.

УДК 007.5.681.518.3

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).82-90

В. В. Демьянов, О. Б. Имарова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
 Дата поступления: 7 марта 2018 г.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ GNSS И НАПРАВЛЕНИЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. Тенденции развития современных транспортных систем ориентированы на максимальное повышение скорости движения и пропускной способности транспортных магистралей при сохранении максимальной безопасности движения. Очевидно, что эта народно-хозяйственная проблема решается только за счет автоматизации процесса управления дви-