

Е. В. Воронина¹, А. В. Крюков¹

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ КРИВЫХ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И МГНОВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Нелинейные вольтамперные характеристики выпрямительных электровозов приводят к значительным гармоническим искажениям в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) переменного тока. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики решение проблемы пониженного качества электроэнергии по критерию несинусоидальности форм кривых токов и напряжений должно базироваться на применении компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования режимов СЭЖД, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения.

В статье представлены результаты исследований, направленных на реализацию метода визуализации результатов определения несинусоидальных режимов тяговых сетей (ТС), основанного на построении форм кривых токов, напряжений и мгновенных мощностей на токоприемниках электроподвижного состава. Получаемые графические зависимости позволяют анализировать энергетические процессы в ТС и более обоснованно подходить к определению параметров устройств для уменьшения гармонических искажений в системах тягового электроснабжения.

Моделирование проведено в программном комплексе Fazonord для схемы СЭЖД, включающей четыре тяговых подстанции и три межподстанционные зоны контактной сети 25 кВ. Внешняя сеть была представлена пятью линиями электропередачи напряжением 110 кВ. Рассматривалось три режимных ситуации: движение трех поездов с массами 12000 т с интервалами 41 мин; четырех поездов с массами 9000 т с интервалом 24 мин; шести поездов с массами 6000 т с интервалами 16 мин.

По результатам исследований может быть сделан вывод о том, что на основе применения компьютерных технологий, разработанных в ИргУПСе, могут быть построены формы кривых токов, напряжений и мощностей. На их базе можно обоснованно подходить к решению задач улучшения качества электроэнергии.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, несинусоидальные режимы, формы кривых токов, напряжений и мгновенных мощностей.

Е. V. Voronina¹, A. V. Kryukov¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

DETERMINATION OF THE SHAPES OF CURRENT, VOLTAGE AND INSTANT POWER CURVES WHEN SIMULATING NON-SINUSOIDAL MODES OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Abstract. Nonlinear current-voltage characteristics of rectifier electric locomotives lead to significant harmonic distortions in the power supply systems of AC railways. In the context of digitalization of the transport electric power industry, the solution to the problem of lowered quality of electricity according to the criterion of non-sinusoidal shapes of currents and voltages should be based on the use of computer technologies that can be implemented on the basis of methods and tools for modeling the modes of power supply systems for railways developed at the Irkutsk State Transport University.

The article presents the results of studies aimed at implementing a method for visualizing the results of determining non-sinusoidal modes of traction networks, based on the construction of the shapes of curves of currents, voltages and instantaneous powers on pantographs of electric rolling stock. The resulting graphical dependencies make it possible to analyze energy processes in traction networks and more reasonably approaches the determination of the parameters of devices to reduce harmonic distortions in traction power supply systems.

The simulation was carried out in the Fazonord software package for a scheme that includes four traction substations and three inter-substation zones of a 25 kV overhead contact network. The external network was represented by five 110 kV power transmission lines. Three regime situations were considered: the movement of three trains with a mass of 12000 tons at intervals of 41 minutes, four - with a mass of 9000 tons at an interval of 24 minutes and six - with a mass of 6000 tons at intervals of 16 minutes.

Based on the results of the research, it can be concluded that, based on the use of computer technologies developed at the Irkutsk State Transport University, the shapes of the curves of currents, voltages and powers can be constructed. On their basis, one can reasonably approach the solution of problems of improving the quality of electricity.

Key words: traction power supply systems, non-sinusoidal modes, waveforms of currents, voltages and instantaneous powers.

Введение

В системах тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог переменного тока наблюдаются значительные гармонические искажения, уровни которых зачастую значительно превышают допустимые нормы. Наличие высших гармоник (ВГ) может приводить к целому ряду негативных эффектов и поэтому задача снижения гармонических искажений имеет несомненную актуальность. Для решения этой задачи необходимо проведение детального анализа процессов в электрических сетях, питающих потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками [1–10]. Прежде всего это касается энергетических процессов [11-23]. Однако, как утверждается в работе [24], многолетние исследования [1–20] проблемы мощности при наличии ВГ не привели к созданию строго обоснованной теории.

Один из подходов к решению задач анализа процессов в СТЭ при наличии гармонических искажений может базироваться на методах визуализации, позволяющих получать графические зависимости, характеризующие формы кривых токов, напряжений и мгновенных мощностей. Ниже представлены результаты, направленные на реализацию одного из аспектов данного подхода, связанные с разработкой способов построения форм кривых на токоприемниках подвижного состава. Для построения данных графических зависимостей использовались технологии компьютерного моделирования, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения [25].

Результаты моделирования

Построение форм кривых проводилось для схемы СЭЖД, включающей четыре тяговых подстанции и три межподстанционные зоны контактной сети 25 кВ [26]. В качестве инструмента использовался программный комплекс Fazonord [3], в котором реализована методика моделирования несинусоидальных режимов. Фрагмент схемы расчетной модели показан на рис. 1.

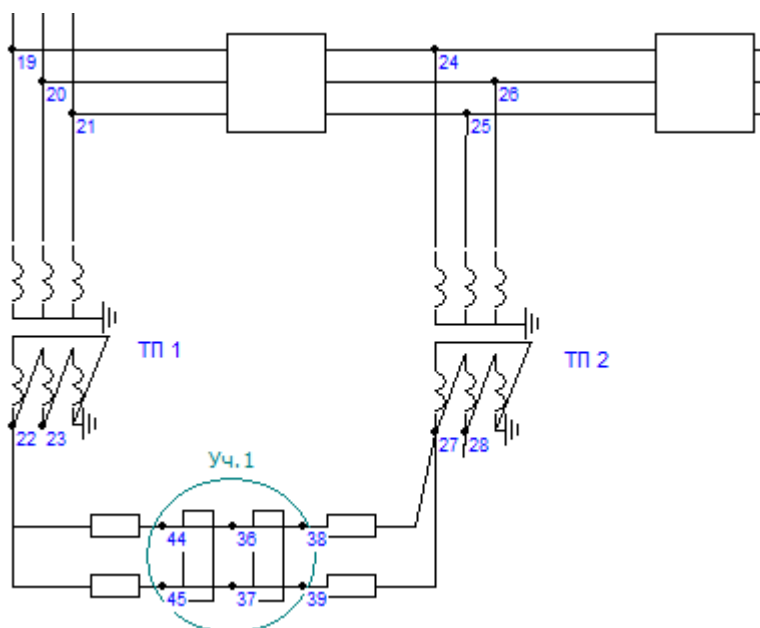
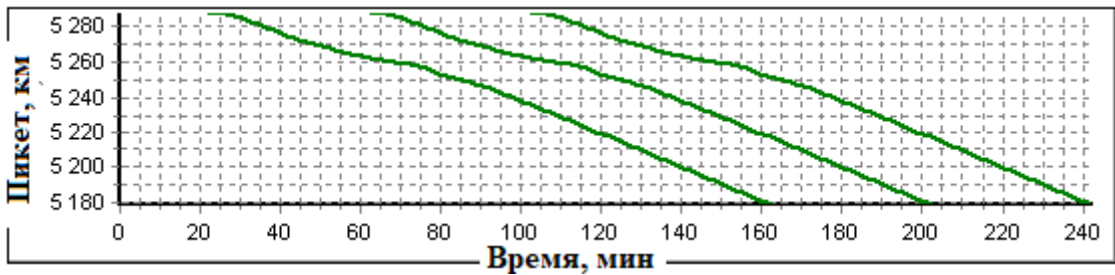


Рис. 1. Фрагмент схемы расчетной модели

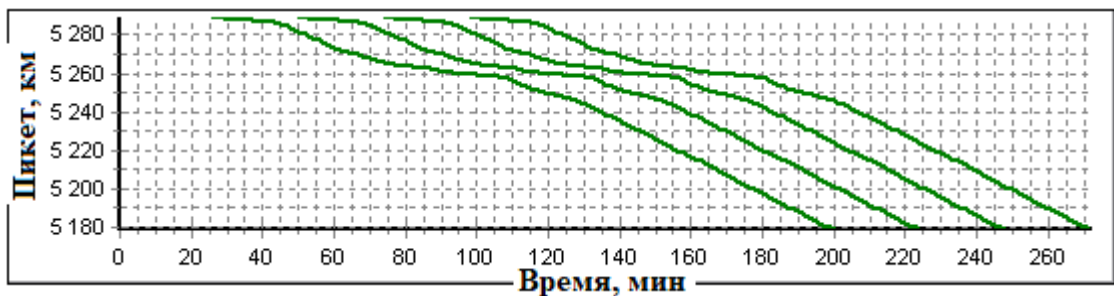
Рассматривалось движение трех поездов массами 12000 т с интервалами 41 мин, четырех поездов с массами 9000 т с интервалом 24 мин и шести поездов с массами 6000 т

с интервалами 16 мин (рис. 2). Спектр гармоник тока электровозов представлен на рис. 3. Токовые профили поездов показаны на рис. 4. Электроснабжение ТП осуществлялось по линиям электропередачи 110 кВ, получающих питание от двух подстанций электроэнергетической системы.

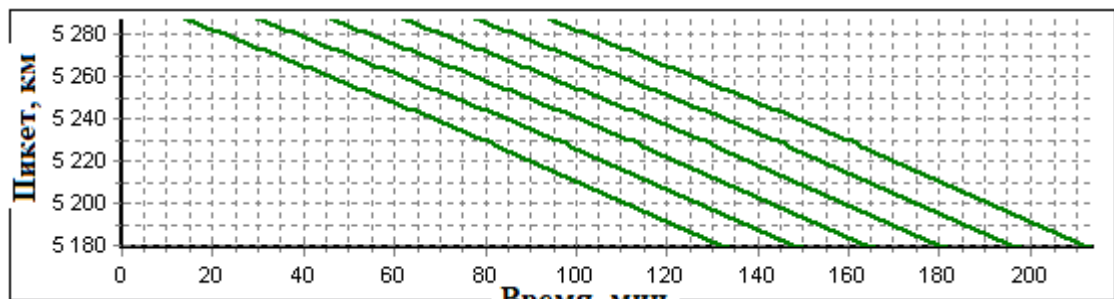
Графические зависимости, характеризующие формы кривых напряжений, токов и мощностей на токоприемнике первого поезда, строились для момента времени 90 минут, при котором анализируемый участок был полностью заполнен поездами.



а)



б)

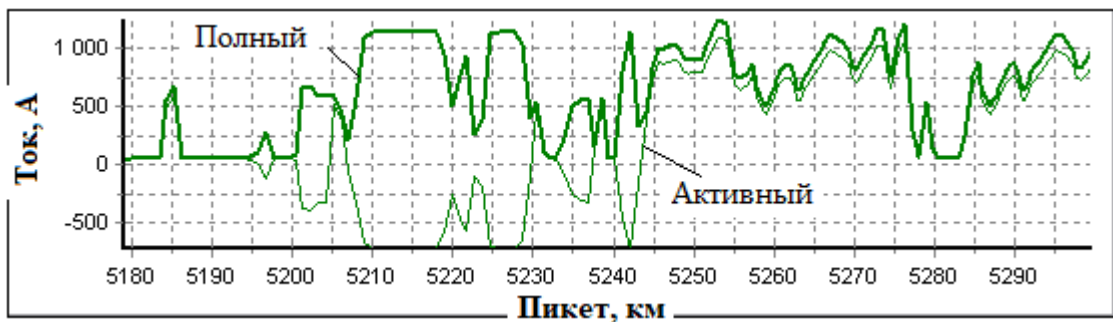


в)

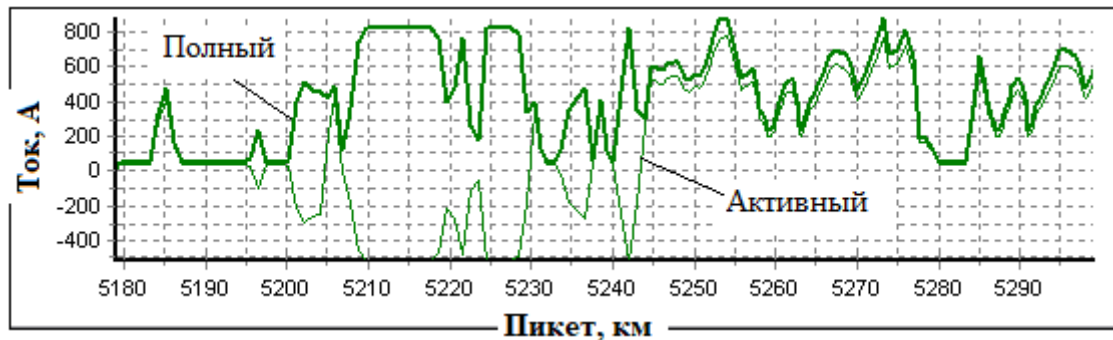
Рис. 2. Графики движения: а – 12000 т; б – 9000 т; в – 6000 т



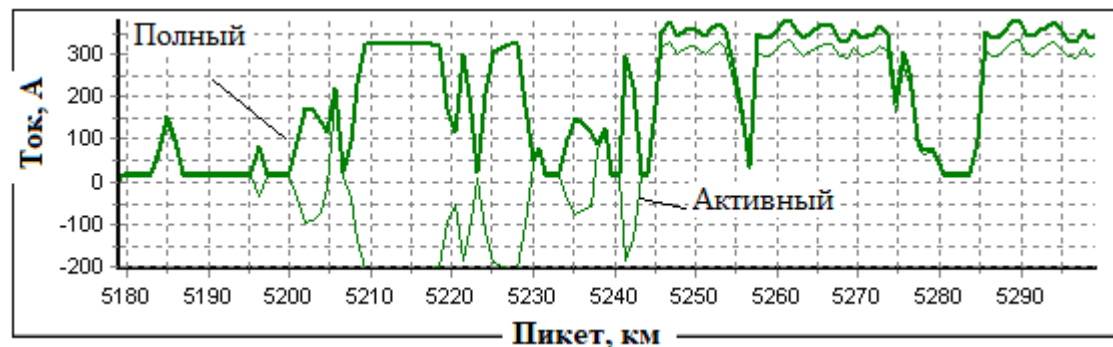
Рис. 3. Спектр гармоник тока электровозов



а)



б)



в)

Рис. 4. Токовые профили: а – 12000 т; б – 9000 т; в – 6000 т

Результаты моделирования несинусоидальных режимов в виде модулей и фаз токов, а также модулей и фаз напряжений на токоприемнике электровоза первого поезда представлены в табл. 1 и проиллюстрированы в виде графиков, показанных на рис. 5.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Наименьшие по величине гармонические искажения напряжений наблюдаются для наиболее легкого поезда массой 6000 т.

2. С ростом массы поездов потребляемые на основной частоте токи возрастают.

3. Относительные различия токов отдельных гармоник для поездов разных масс с ростом их порядковых номеров уменьшаются.

Формы кривых напряжений и токов, построенные по данным табл. 1, представлены на рис. 6. Для улучшения восприятия приведенных графических зависимостей на них приведены только токи и напряжения для первой, третьей, пятой и седьмой гармоник. Однако при определении результирующих напряжений и токов учитывался спектр рассматриваемых ВГ вплоть до пятнадцатой

$$u_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^{15} u_k(t); i_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^{15} i_k(t).$$

Сводные данные по токам и напряжениям гармоник

№ гармоники	Масса поезда, т	U , В	φ , град	I , А	θ , град
1	6000	26,31	59,24	124,77	-61,14
3		1,31	63,6	53,89	176,58
5		0,84	-5,22	11,59	54,29
7		0,84	164,95	11,44	-67,99
9		0,85	83,65	11,27	169,73
11		0,63	-79,52	7,9	47,44
13		0,96	-148,38	7,27	-74,84
15		0,90	54,48	5,54	162,88
1	9000	23,63	110,82	526,66	81,24
3		4,78	145,79	152,84	-116,29
5		2,79	-53,55	53,03	46,18
7		2,00	106,66	26,77	-151,34
9		1,97	-93,31	20	11,13
11		1,71	66,59	13,74	173,6
13		1,54	-133,63	9,98	-23,92
15		1,35	25,99	7,11	138,55
1	12000	21,56	44,73	1148,47	15,53
3		4,51	-52,48	333,35	46,58
5		4,21	-31,04	115,67	77,64
7		3,10	25,54	58,4	108,7
9		1,79	48,17	43,62	139,75
11		2,58	61,87	29,96	170,81
13		2,53	119,51	21,77	-158,14
15		1,20	145,38	15,5	-127,08

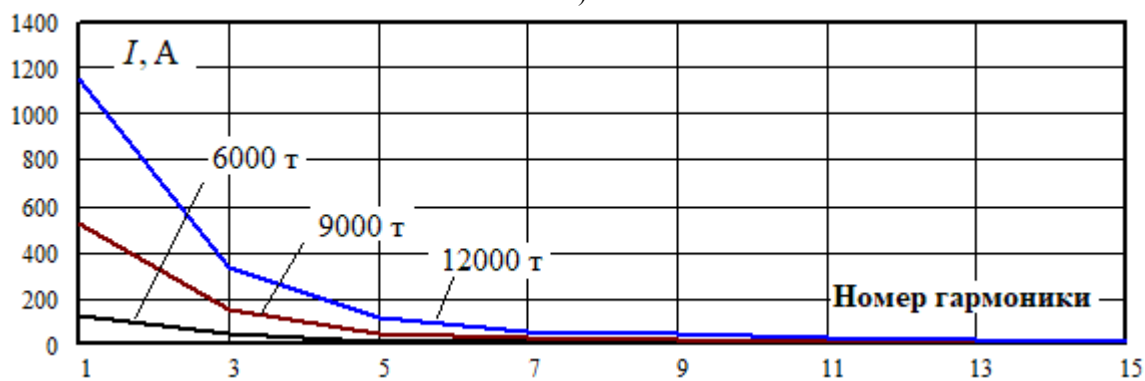
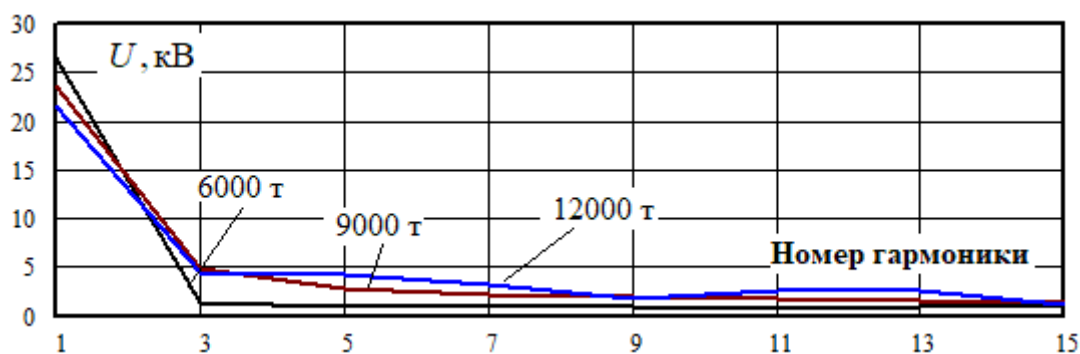


Рис. 5. Напряжения (а) и токи (б) гармонических составляющих

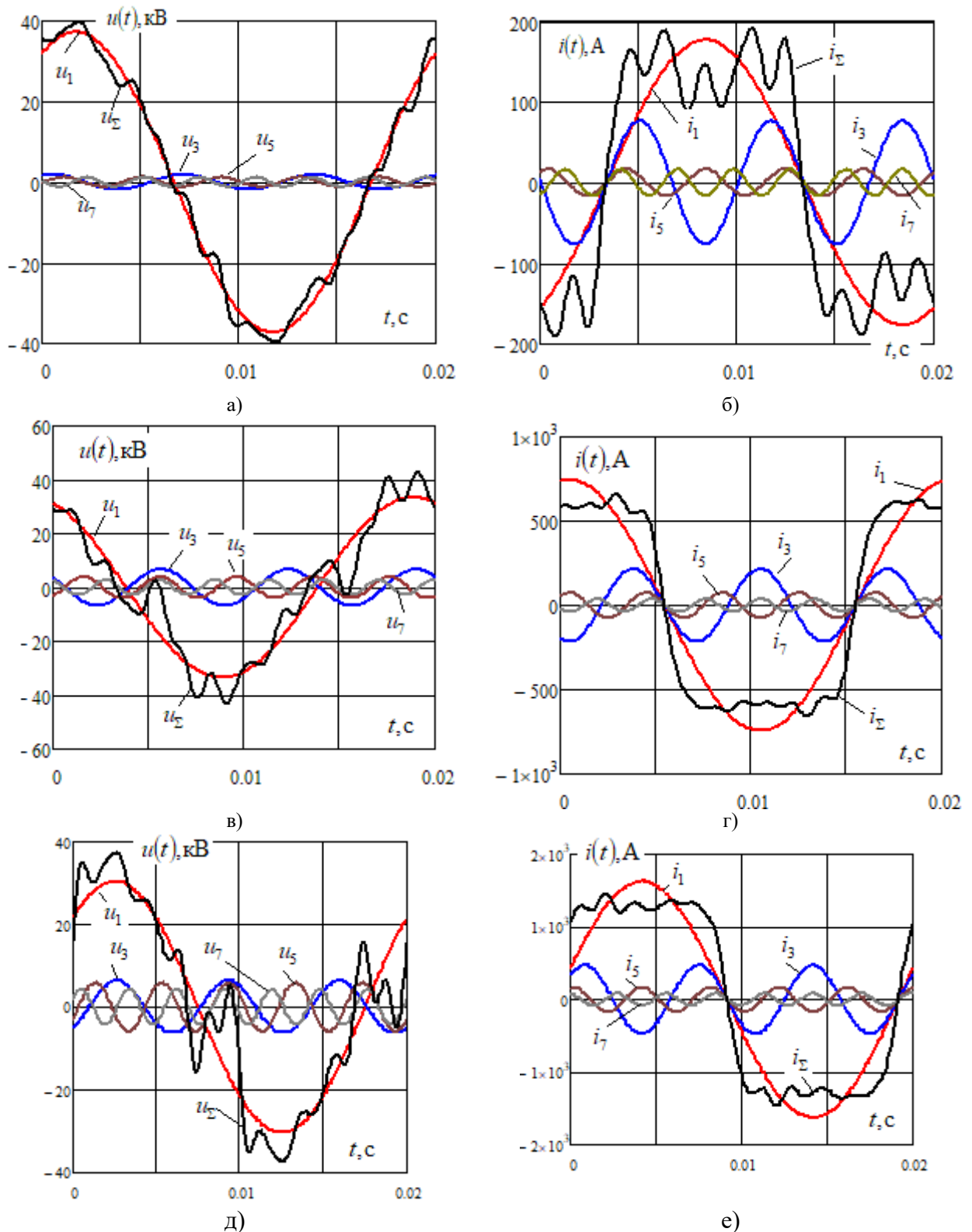


Рис. 6. Кривые токов и напряжений: а, в, д – напряжения; б, г, е – токи; а, б – поезда массой 6000 т; в, г – 9000 т; д, е – 12000 т; нижний числовой индекс в обозначениях величин соответствует номеру гармоники

Из анализа приведенных на рис. 6 зависимостей могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Диаграммы изменений результирующих напряжений для поездов массами 9000 и 12000 т характеризуются многократными пересечениями оси абсцисс за время, равное периоду основной частоты.

2. Кривые результирующих токов для поездов массами 9000 и 12000 т имеют формы, близкие к прямоугольным.

На рис. 7 представлены временные зависимости, характеризующие формы кривых мгновенных мощностей. В соответствии с рекомендациями работы [19] для их построения использовались следующие соотношения:

$$s_1(t) = u_1(t)i_1(t);$$

$$s_{\Sigma}(t) = \left(\sum_{k=1}^{15} u_k(t) \right) \left(\sum_{k=1}^{15} i_k(t) \right).$$

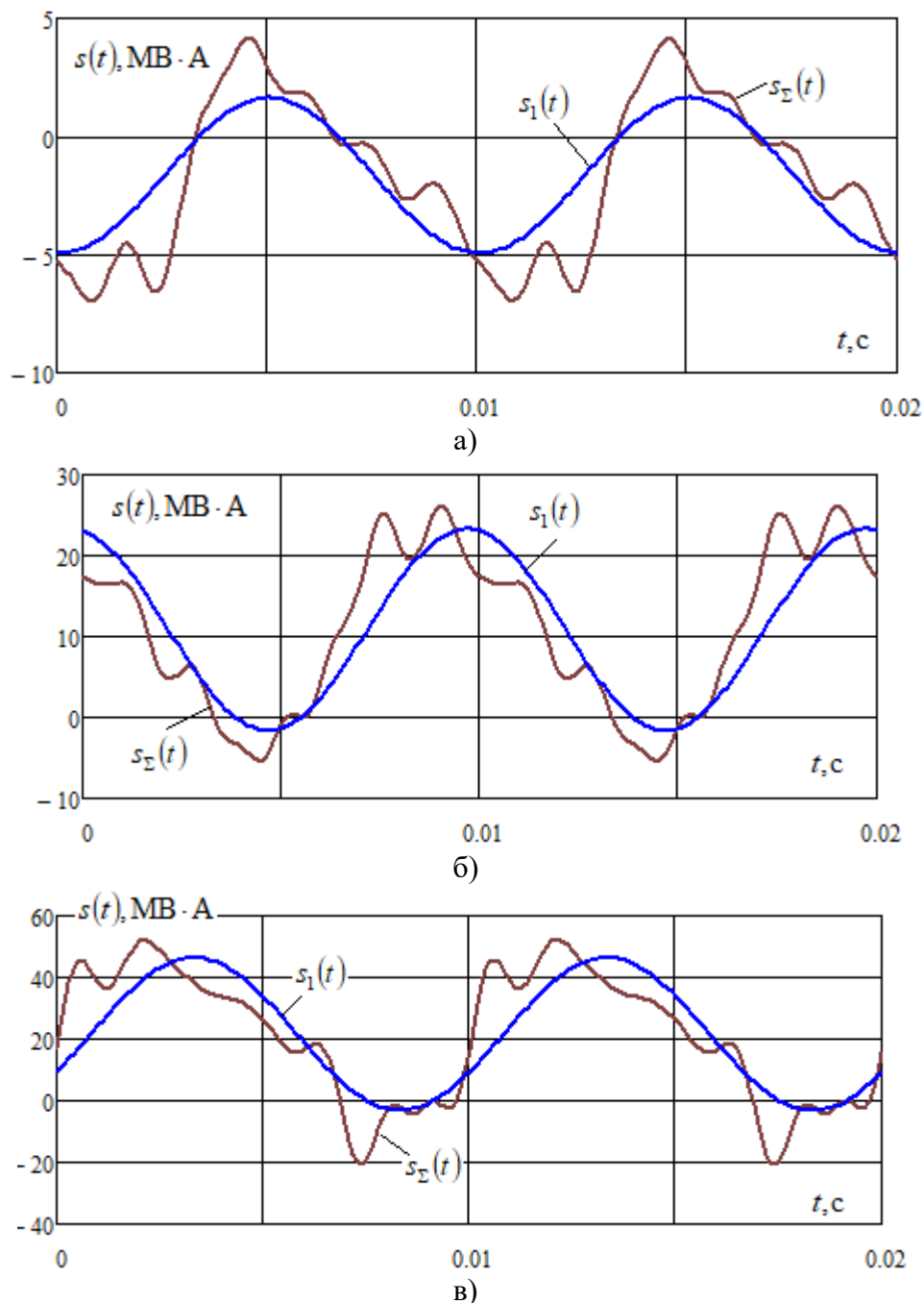


Рис. 7. Кривые мгновенных мощностей на основной гармонике $s_1(t)$ и с учетом высших гармоник $s_{\Sigma}(t)$ для поездов массами: а – 6000 т, б – 9000 т, в – 12000 т

Из-за наличия высших гармоник токов и напряжений формы кривых мгновенных мощностей существенно отличаются от синусоид двойной частоты. Величины отклонений оценивались на основе интеграла

$$\delta = \frac{1}{T} \int_0^T (s_1(t) - s_2(t)) dt,$$

где $T = 0,02$ с.

Зависимость величины δ от массы поезда показана на рис. 8, из которого можно сделать вывод о том, что отклонения формы кривой мгновенной мощности от синусоиды двойной частоты с ростом массы поезда возрастают по нелинейному закону.

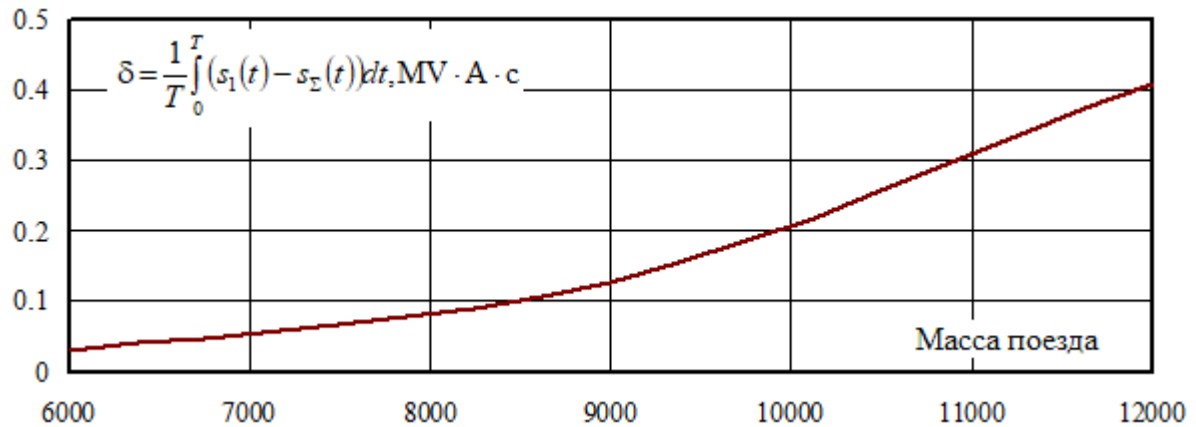


Рис. 8. Зависимости величины δ от массы поезда

На рис. 9 приведены графики результирующих мощностей для всех рассмотренных электровозов, позволяющие анализировать изменение форм кривых мгновенных мощностей при вариациях масс поездов.

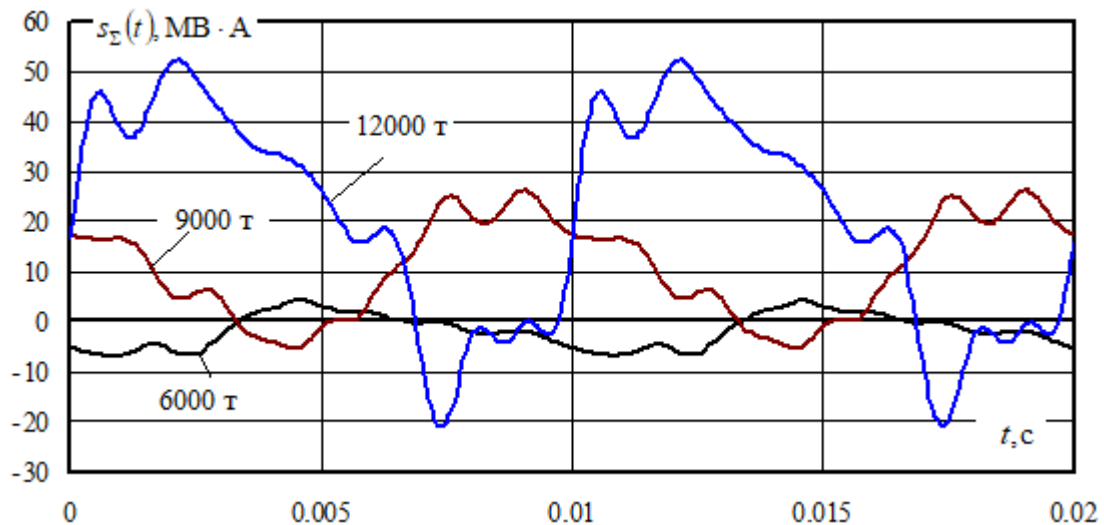


Рис. 9. Кривые мгновенных мощностей на частотах высших гармоник

Заключение. Представленный метод визуализации результатов определения несинусоидальных режимов позволяет проводить анализ процессов в СТЭ при наличии гармонических искажений. Он может быть полезным при разработке средств подавления гармонических искажений в СЭЖД. Представленные способы визуализации могут быть распространены на другие элементы систем внешнего и тягового электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баланс энергий в электрических цепях / Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. [и др.]. Киев: Наукова думка, 1992. 312 с.

2. Будеяну К. И. К вопросу о явлениях искажения в электрических машинах и аппаратах // Журнал электротехники энергетики. № 2. 1956. С. 39-50.
3. Budeanu C. Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive si deformante // Electricitatea/ No. 2. 1951. P. 13-19, No. 3. 1951. P. 6-11.
4. Budeanu C. Probleme de la presence des puissances reactives dans les installation de production et distribution d'energie electrique // Rap. et discuss. sur la puissance reactive. 1929. Pt. 3. P. 117-218.
5. Fryze S. Wirk-Blind-und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nichtsinusformigen verlauf von strom und Spannung // Elektrotechn. Z. 1932. 25. P. 596-599; 26. P. 6325-627; 29. P. 700-702.
6. Czanecki L. S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems // Rozprawy Electrotechnice. 1985. 31. No. 3, 4. P. 16-24.
7. Quade W. Wirk-, Blind-und Scheinleistung bei Wechselfromen mit beliebiger Kurveform// Arch. Elektrotechn. No. 28. 1934. P. 130-138.
8. Rozenzweig I. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektory jako metoda analizy ukladow wielofazowych // Czasopismo Techniczne. 1939. No. 6. S. 77-82. No. 7. P. 89-94. No. 9. P. 106-110. No. 10. P. 120-125. No. 11. P. 137-141. No. 12. P. 151-156.
9. Лурье Л. С. Дискуссии. Терминология теоретической электротехники // Электричество. № 5. 1954. С. 84-85.
10. Edelman H. Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung, bei periodischen Stromen und Spannungen in funktionalanalytischer Sicht // Siemens Forsh. – und Entwicklungsber. 1981. No. 1. P. 16-24.
11. Fisher H. Blindleistungs compensation bei nichtperiodischen Stromen und Spannungen // ETZ– Arch. 1982. 4. No. 4. P. 127-131.
12. Пухов Г. Е. Теория мощности системы периодических многофазных токов // Электричество. № 2. 1953. С. 56-61.
13. Curtis H. L., Silsbee F. B. Definitions of Power and Related Quantities // Trans. AIEE/ 1953. 54. P. 394-404.
14. Shepherd W., Zakikhani P. Power factor correction in nonsinusoidal systems by the use of capacitance // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. 16. No. 6. P. 1850-1861.
15. Shepherd W., Zakikhani P. Suggest definition of reactive power in nonsinusoidal systems // Proc. IEEE. 1972. 119. No. 9. P. 1361-1362. No. 5. P. 389-390.
16. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems // Proc. IEEE. 1973. 120. No. 7. P. 796-798. No. 5. P. 390-391.
17. Emanuel A. E. Energetical factors in power systems with nonlinear loads // Arch. Elektrotechn. 1977. 59. No. 3. P. 183-189.
18. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
19. Мощность переменного тока // А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э. П. Трейманис [и др.]. Рига, 1993. 292 с.
20. Чаплыгин Е. Е., Калугин Н. Г. Теория мощности в силовой электронике. М., 2006. 24 с.
21. Костин Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2010. Вип. 34. С. 73-76.
22. Жемеров Г. Г., Ильина Щ. В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Электротехника и электромеханика. № 6. 2007. С. 63-65.
23. Агунов М. В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами их эффективность. Кишнев – Тольятти, 1997. 84 с.
24. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

25. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
26. Воронина Е. В., Крюков А. В. Энергетические характеристики несинусоидальных режимов в системах тягового электроснабжения [Электронный ресурс] // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. № 2(8). 2020. Режим доступа: <http://mnv.irkgups.ru/toma/28-20>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус., англ. (дата обращения: 12.05.2020).

REFERENCES

1. Balance of energies in electrical circuits / Tonkal V. Ye., Novoseltsev A. V., Denisjuk S. P. [and others]. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 312 p.
2. Budyanu K. I. On the issue of distortion phenomena in electrical machines and apparatuses // Journal of electrical engineering. No. 2. 1956. P. 39-50.
3. Budeanu C. Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive si defornante // Electricitatea / No. 2.1951.P. 13-19, No. 3.1951. P. 6-11.
4. Budeanu C. Probleme de la presența des putanțelor reactive dans les installations de production et distribution d'energie electrgue // Rap. et discuss. sur la puissance reactive. 1929. Pt. 3. P. 117-218.
5. Fryze S. Wirk-Blind-und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusformigen verfaf von strom und Spannung // Elektrotechn. Z 1932 25 P. 596-599; 26 P. 6325-627; 29. P. 700-702.
6. Czanecki L. S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems // Rozprawy Electrotechnize. 1985.31.No. 3, 4. P. 16-24.
7. Quade W. Wirk-, Blind-und Scheinleistung bei Weshselstromen mit beliebiger Kurveform // Arch. Elektrotechn. No. 28, 1934, P. 130-138.
8. Rozenzweig I. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektory jako metoda analizy ukladow wielofazowych // Czasopismo Techniczne. 1939. No. 6. P. 77-82. No. 7. S. 89-94. No. P. 106-110. No. 9. P. 120-125. No. 10. P. 137-141. No. 11. P. 151-156.
9. Lurie LS Discussions. The terminology of theoretical electrical engineering // Electricity. No. 5. 1954. S. 84-85.
10. Edelman H. Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung, bei periodischen Stromen und Spannungen in funktionalanalytischer Sicht // Siemens Forsh. - und Entwicklungsber. 1981. No. 1. P. 16-24.
11. Fisher H. Blindleistungs compensation bei nichtperiodischen Stromen und Spahungen // ETZ– Arch. 1982. 4. No. 4. P. 127-131.
12. Pukhov G. E. Power theory of a system of periodic multiphase currents. Electricity. No. 2. 1953. P. 56-61.
13. Curtis H. L., Silsbee F. B. Definitions of Power and Related Quantities // Trans. AIEE / 1953. 54. P. 394-404.
14. Shepherd W., Zakikhani P. Power factor correction in nonsinusoidal systems by the use of capacitance // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973.16. 6.P. 1850-1861.
15. Shepherd W., Zakikhani P. Suggest definition of reactive power in nonsinusoidal systems // Proc. IEEE. 1972.119. No. 9. P. 1361-1362. No. 5. P. 389-390.
16. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems // Proc. IEEE. 1973.120. No. 7.P. 796-798. No. 5. P. 390-391.
17. Emanuel A. E. Energetical factors in power systems with nonlinear loads // Arch. Elektrotechn. 1977.59. 3. P. 183-189.
18. Maevsky OA Energy indicators of valve converters. Moscow: Energiya, 1978.320 p.
19. Power of alternating current // A. F. Krogeris, K. K. Rashevits, E. P/ Treimanis [and others]. Riga, 1993.292 p.
20. Chaplygin E. E., Kalugin N. G. Theory of power in power electronics. M., 2006.24 p.

21. Kostin N. A. Reactive power in devices of electric traction systems // Visn. Dnipropetr. nat. un-tu zalozn. transport im. acad. V. Lazaryan. D., 2010. No. 34. P. 73-76.
22. Zhemerov G. G., Ilyina Shch. V. Frize power theory and modern power theories // Electrical engineering and electromechanics. No. 6. 2007. P. 63-65.
23. Agunov M. V. Energy processes in electrical circuits with non-sinusoidal modes and their efficiency. Kishinev-Togliatti, 1997. 84 p.
24. Zhezhelenko I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. M.: Energoatomizdat, 2000. 331 p.
25. V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov. Complexly asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
26. Voronina E. V., Kryukov A. V. Energy characteristics of non-sinusoidal modes in traction power supply systems [Electronic resource] // Young science of Siberia: electron. scientific magazine. No. 2 (8). 2020. Access mode: <http://mnv.irkups.ru/toma/28-20>, free. Title from the screen. Language Russian, English (date of access: 12.05.2020).

Информация об авторах

Воронина Екатерина Викторовна – студентка группы СОД 1-17-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ekaterina.voronina@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электроэнергетики транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Authors

Ekaterina Viktorovna Voronina – student of the TSS 1-17-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ekaterina.voronina@yandex.ru

Andrey Vasilyevich Kryukov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electric Power of Transport, Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Для цитирования

Воронина Е. В. Определение форм кривых токов, напряжений и мгновенных мощностей при моделировании несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения [Электронный ресурс] / Е. В. Воронина, А. В. Крюков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – № __. – Режим доступа: http://mnv.irkups.ru/toma/____, свободный.– Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: ____)

For citation

Voronina E. V. Determination of the curves of currents, voltages and instantaneous powers when modeling non-sinusoidal modes of traction power supply systems [Electronic resource] / E. V. Voronina, A. V. Kryukov // Young science of Siberia: electron. scientific journal - 2021. - No. __. - Access mode: http://mnv.irkups.ru/toma/____, free. - Title from the screen. - Language Russian, English (date of the application: ____)