

Е. В. Воронина¹, А. В. Крюков¹

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. В электрических сетях общего назначения, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) магистральных железных дорог, электрифицированных на переменном токе, наблюдаются заметные искажения качества электроэнергии (ЭЭ) по критериям отклонений напряжений, несимметрии и несинусоидальности. Особенно остро проблемы низкого качества ЭЭ проявляется в сетях, питающихся от ТП восточных участков Транссиба; при этом, максимальные значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности k_{2U} могут достигать 6...7 %; аналогичные данные по суммарным коэффициентам гармонических составляющих k_U равны 8...10 %. В условиях цифровизации электроэнергетики, включая транспортную, решение проблемы пониженного качества ЭЭ требует применения компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе.

В статье представлены результаты исследований, направленных на изучение энергетических характеристик несинусоидальных режимов в системах тягового электроснабжения. По результатам этих исследований может быть сделан вывод о том, что на основе применения компьютерных технологий, разработанных в ИрГУПСе, могут быть определены временные зависимости, отвечающие активным, реактивным и полным мощностям, генерируемым (потребляемым) электровозами на высших гармониках. На базе этих данных можно обоснованно подходить к определению параметров устройств, предназначенных для улучшения качества электроэнергии.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, несинусоидальные режимы, энергетические характеристики.

E.V. Voronina¹, A.V. Kryukov¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

ENERGY CHARACTERISTICS OF NON-SINUSOIDAL MODES IN TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Abstract. In electrical networks adjacent to the traction substations of the main railways electrified with alternating current, noticeable distortions in the quality of electricity are observed according to the criteria of voltage deviations, asymmetry and non-sinusoidality. Especially acute problems of low quality EE are manifested in networks powered by traction substations of the eastern sections of the Trans-Siberian Railway; at the same time, the maximum values of the asymmetry coefficients in the reverse sequence k_{2U} can reach 6 ... 7%; similar data on the total coefficients of harmonic components k_U are equal to 8 ... 10%. In the context of the digitalization of the electric power industry, including the transport one, the solution of the problem of reduced quality of electric power requires the use of computer technologies, which can be implemented on the basis of methods and tools for modeling railroad power supply systems developed at the Irkutsk State Transport University.

The article presents the results of studies aimed at studying the energy characteristics of non-sinusoidal modes in traction power supply systems. Based on the results of these studies, it can be concluded that based on the use of computer technologies developed at the Irkutsk State Transport University, time dependencies corresponding to the active, reactive and full capacities generated (consumed) by electric locomotives at higher harmonics can be determined. Based on these data, one can reasonably approach the determination of the parameters of devices designed to improve the quality of electricity.

Keywords: traction power supply systems, non-sinusoidal modes, energy characteristics.

Введение. Пониженное качество электроэнергии (ЭЭ) по критериям отклонений напряжений, несимметрии и несинусоидальности наблюдается в электрических сетях, питающих тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог. В восточных регионах России эта проблема приобретает особую остроту. Это вызвано тем, что системообразующие электрические сети в данных регионах непосредственно связаны с ТП Транссиба [1–3]. Вследствие значительных величин тяговых нагрузок, а также из-за пониженных уровней

мощностей короткого замыкания на шинах высокого напряжения некоторых ТП показатели качества ЭЭ существенно превышают допустимые значения. Так, например, результаты измерений показывают, что средние значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности k_{2U} лежат в пределах 3...4 %, а максимальные – 6...7 %; аналогичные данные по суммарным коэффициентам гармонических составляющих k_U равны: 5...6 и 8...10 %.

Решение проблемы пониженного качества электроэнергии в современных условиях требует применения компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе [1,3]. Однако в указанных работах основное внимание уделялось нормативным показателям качества электроэнергии, а энергетические процессы, связанные с качеством ЭЭ, практически не рассматривались. Ниже представлены результаты компьютерных исследований, направленных на изучение энергетических характеристик несинусоидальных режимов в системах тягового электроснабжения (СТЭ).

Методика моделирования. В ИрГУПСе предложена методология расчета несинусоидальных режимов в фазных координатах [3], которая сводится к решению следующих систем линейных и нелинейных уравнений:

$$\mathbf{F}[\mathbf{X}(\omega_1)] = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{Y}(\omega_3)\dot{\mathbf{U}}(\omega_3) = \dot{\mathbf{I}}(\omega_3);$$

...

$$\mathbf{Y}(\omega_{41})\dot{\mathbf{U}}(\omega_{41}) = \dot{\mathbf{I}}(\omega_{41}),$$

где ω_k – частоты высших гармоник (ВГ), $k = 3, 5, \dots, 41$; $\omega_k = k\omega$; $\omega = 314$ 1/с; $\mathbf{Y}(\omega_k)$ – матрица проводимостей расчетной модели сети, рассчитанная для частоты ω_k ; $\dot{\mathbf{U}}(\omega_k)$ – искомые напряжения в узловых точках сети, которые находятся в результате расчета режима на частоте ω_k ; $\dot{\mathbf{I}}(\omega_k)$ – вектор токов источников ВГ.

По результатам расчета несинусоидального режима могут быть определены активные и реактивные мощности на высших гармониках для источников ВГ и других элементов сети

$$P_k = U_k I_k \cos(\varphi_k - \psi_k); \quad (1)$$

$$Q_k = U_k I_k \sin(\varphi_k - \psi_k), \quad (2)$$

где I_k , φ_k – модуль и фаза k -й гармоники тока; U_k , ψ_k – модуль и фаза k -й гармоники напряжения.

Результаты моделирования. Анализ энергетических характеристик проводился применительно к схеме СТЭ, включающей три межподстанционные зоны. В качестве инструмента использовался программный комплекс Fazonord [3], в котором реализована описанная выше методика моделирования. Фрагмент схемы расчетной модели показан на рис. 1.

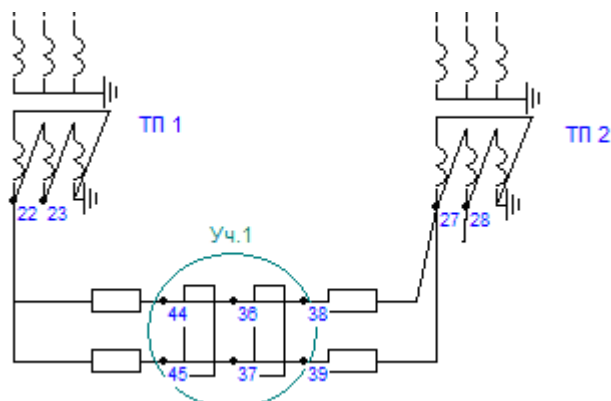


Рис. 1. Фрагмент схемы расчетной модели

Рассматривалось движение трех поездов массами 12000 т с интервалами 41 мин, четырех – с массами 9000 т с интервалом 24 мин и шести – с массами 6000 т с интервалами 16

мин (рис. 2). Токвые профили поездов показаны на рис. 3. Электроснабжение ТП осуществлялось от линий электропередачи 110 кВ, получающих питание от двух подстанций электроэнергетической системы.

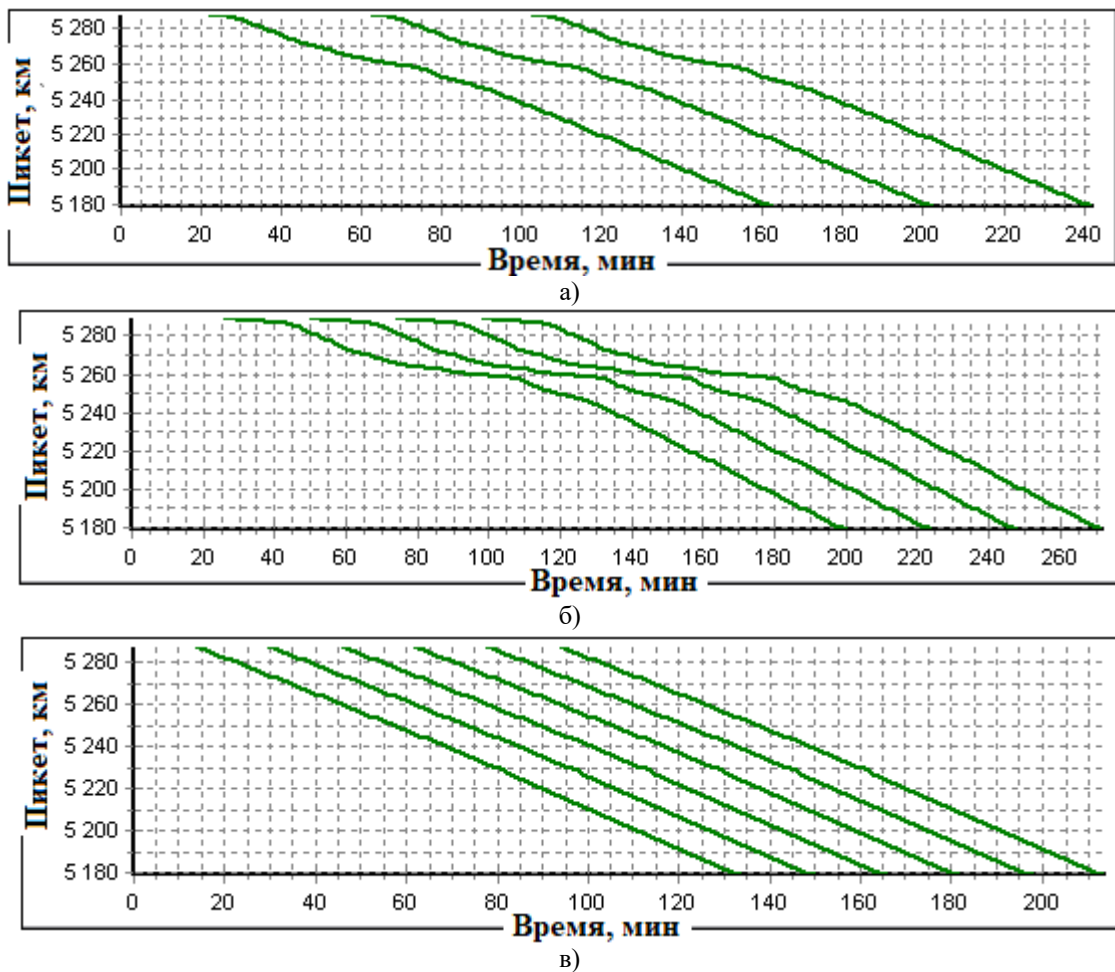
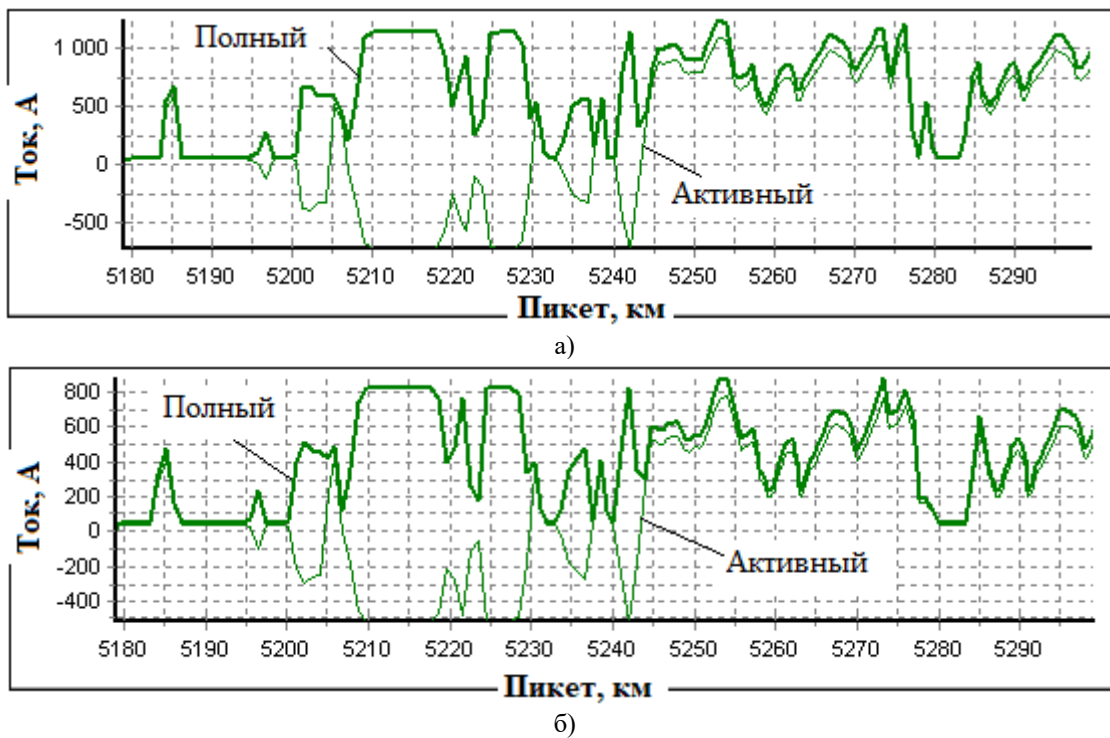
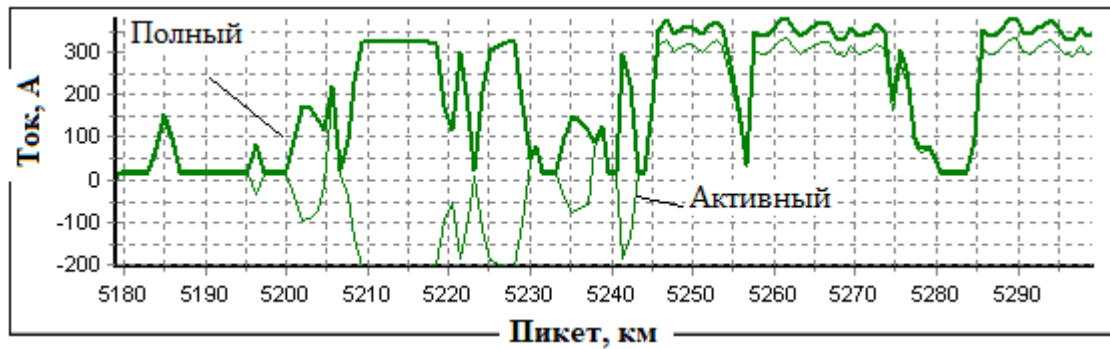


Рис. 2. Графики движения: а – 12000 т; б – 9000 т; в – 6000 т





в)

Рис. 3. Токвые профили:
а – 12000 т; б – 9000 т; в – 6000 т

Результаты моделирования представлены на рис. 4–14 в табл. 1. На рис. 4 и 5 показаны временные зависимости суммарного коэффициента гармоник k_U и его произведения на аналогичный параметр для токов k_I . На рис. 6 приведены зависимости максимальных и средних значений указанных параметров от массы поездов.

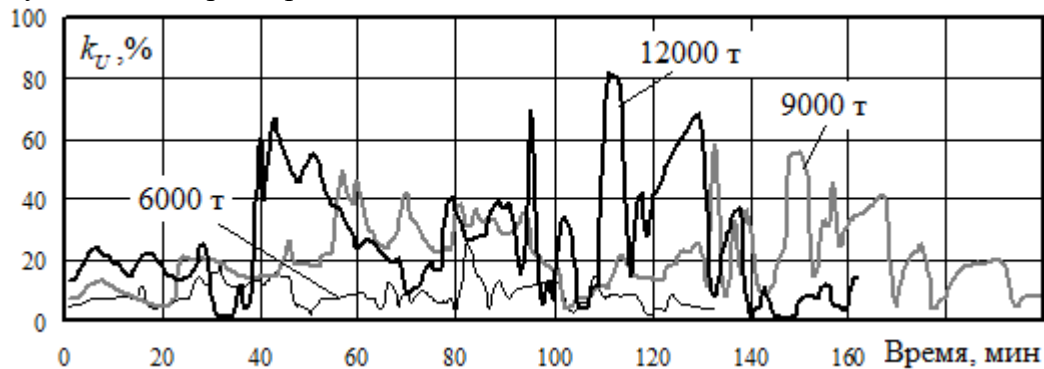


Рис. 4. Вариации суммарных коэффициентов гармоник на токоприемниках

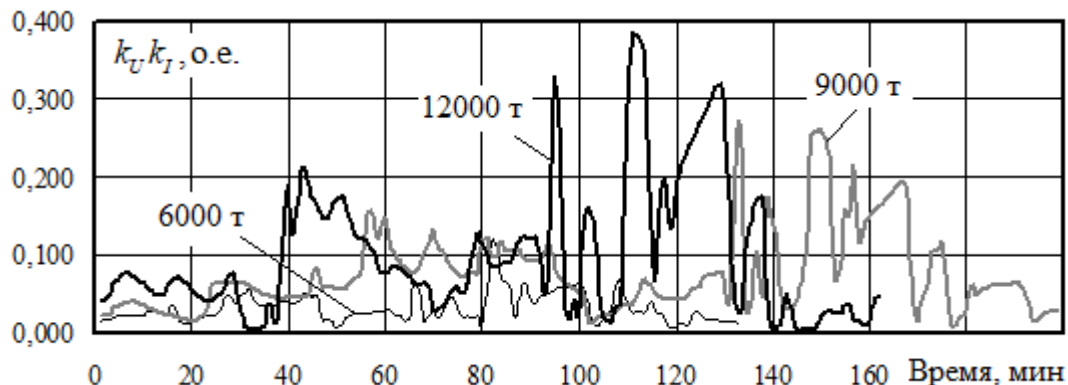


Рис. 5. Вариации произведений коэффициентов гармоник токов и напряжений



Рис. 6. Зависимости параметра $\kappa = k_U k_I$ от массы поезда

На рис. 7, 8 приведены временные зависимости активных мощностей, потребляемых (генерируемых) локомотивами на основной частоте (рис. 7) и частотах высших гармоник (рис. 8).

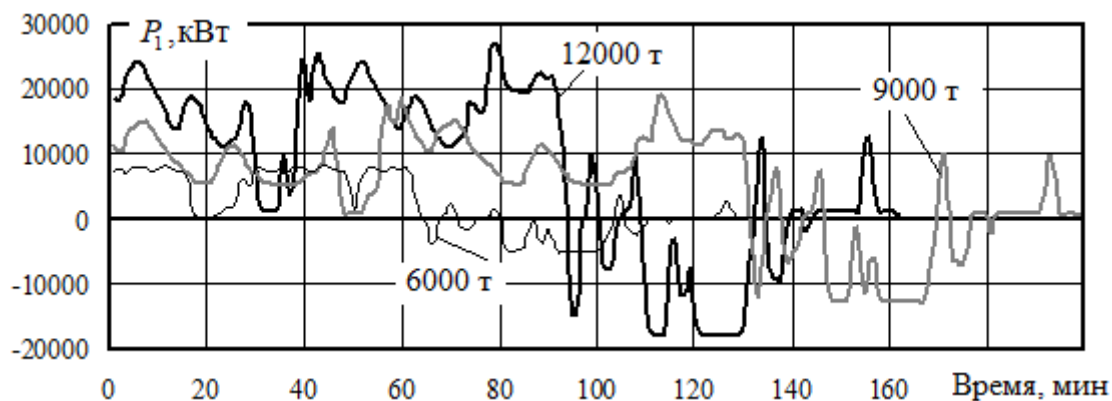


Рис. 7. Временные зависимости активных мощностей, потребляемых ЭПС на основной частоте

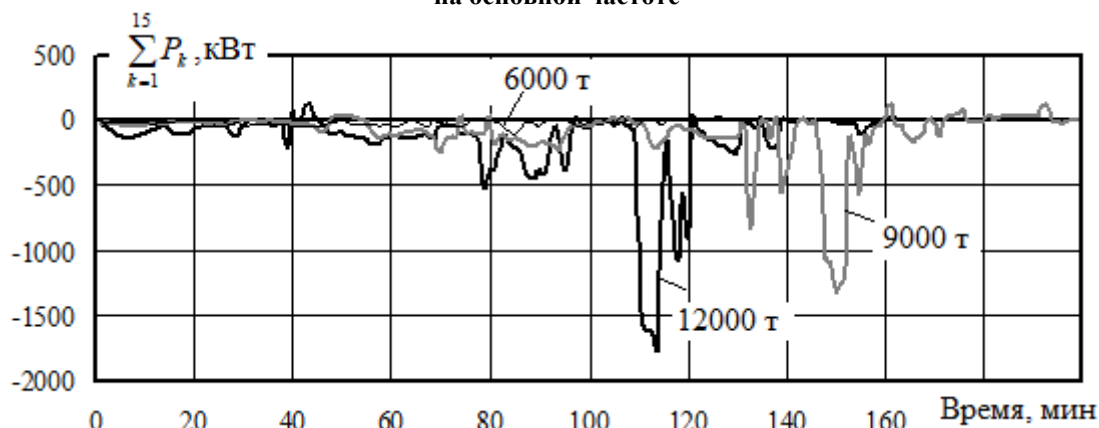


Рис. 8. Временные зависимости активных мощностей, потребляемых ЭПС на частотах высших гармоник

На рис. 9 представлены временные зависимости коэффициента k_p , который определяется по формуле

$$k_p = \left| \frac{\sum_{k=1}^{15} P_k}{P_1} \right| \cdot 100 .$$

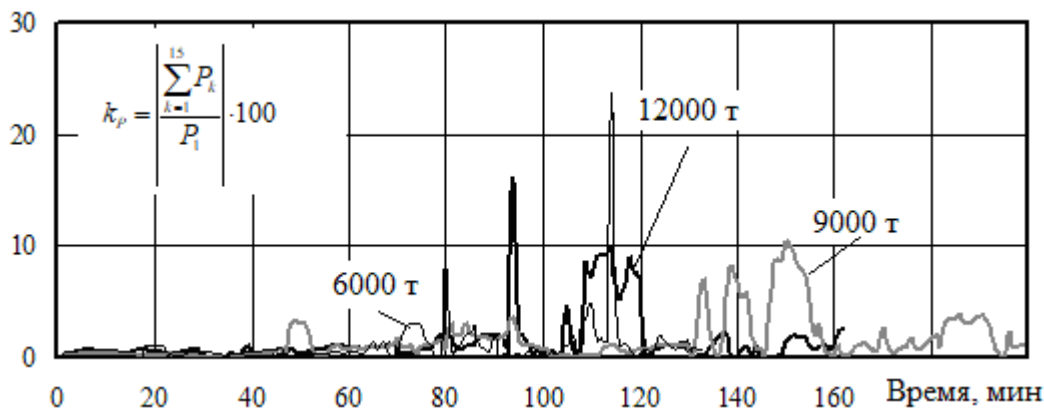


Рис. 9. Временные зависимости параметра k_p

На рис. 10 приведены зависимости k_p , который характеризует соотношение между активными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, от массы поезда.

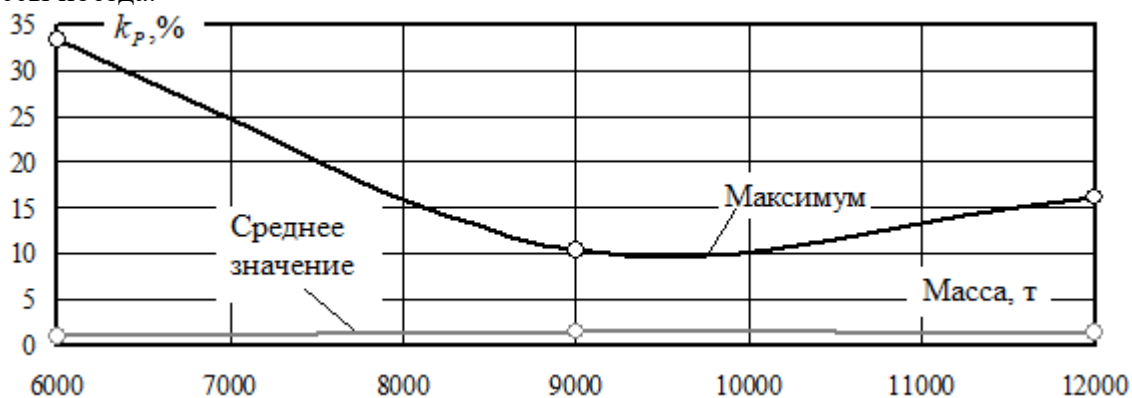


Рис. 10. Зависимости параметра k_p от массы поезда

На рис. 11-13 представлены временные зависимости реактивных мощностей и коэффициента k_Q , который определялся по формуле

$$k_Q = \left| \frac{\sum_{k=1}^{15} Q_k}{Q_1} \right| \cdot 100.$$

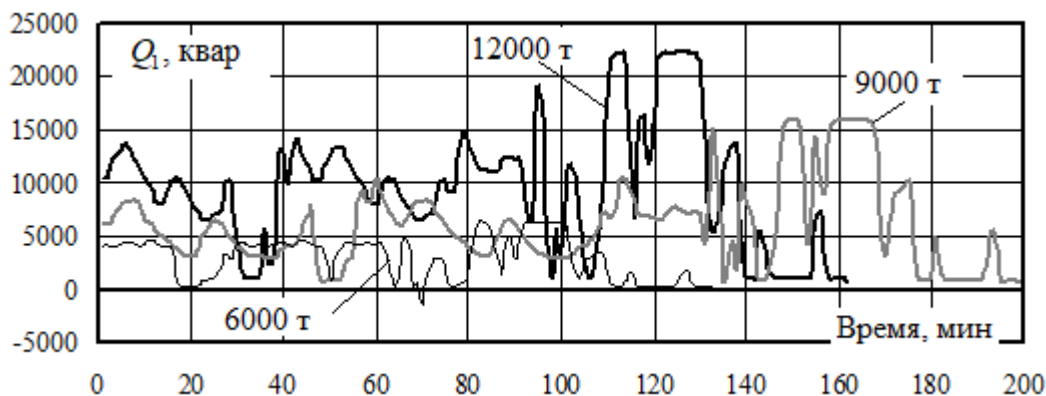


Рис. 11. Временные зависимости реактивных мощностей, потребляемых ЭПС на основной частоте

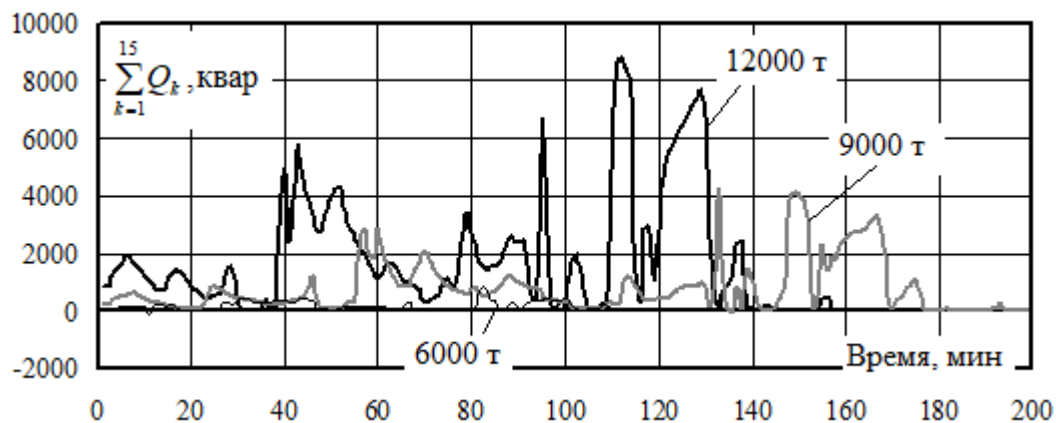


Рис. 12. Временные зависимости активных мощностей, потребляемых ЭПС на частотах высших гармоник

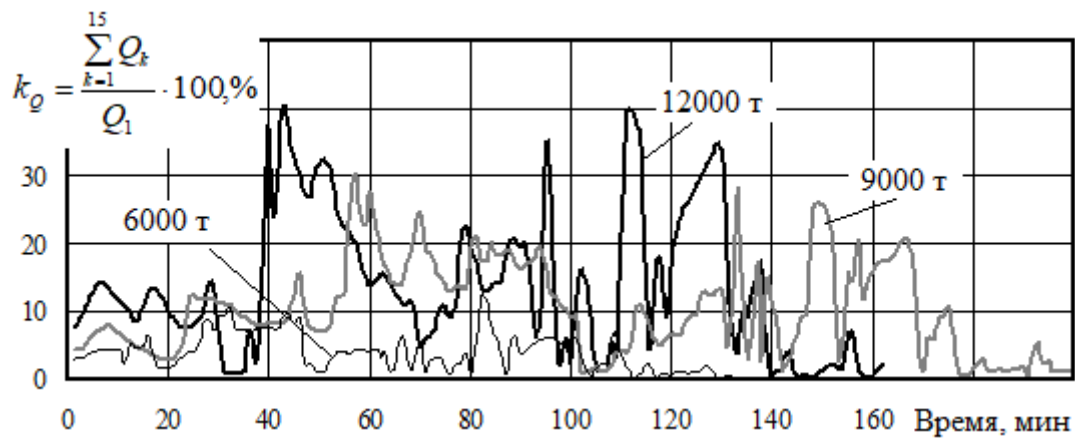


Рис. 13. Временные зависимости параметра k_Q

Активные и реактивные мощности на частотах ВГ определялись по классической методике, предложенной в работах [5-7]. Следует отметить, что полученные результаты позволяют рассчитывать энергетические показатели на основе других подходов, например, изложенных в работах [4-27]. Кроме того, возможен расчет полных мощностей и так называемых мощностей искажения D (табл. 1).

На рис. 14 приведены зависимости коэффициента k_Q который характеризует соотношение между реактивными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, от массы поезда.

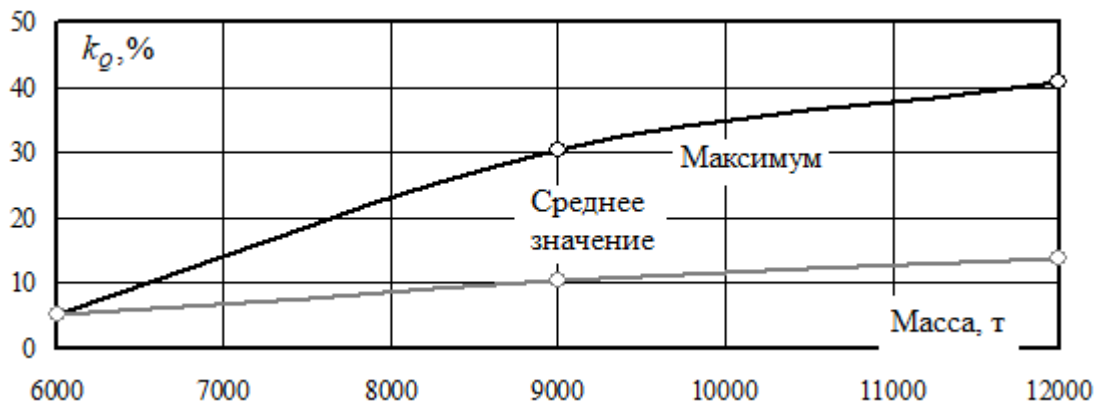


Рис. 14. Зависимости параметра k_Q от массы поезда

Таблица 1

Сводные данные

Параметр	Показатель	Масса поездов, т		
		6000	9000	12000
Полная мощность, S , кВ·А	Ср. значение	5461,91	11424,03	18780,21
	Максимум	10053,87	25726,82	40514,38
	Минимум	373,74	1085,29	1032,42
Активная мощность P , кВт	Ср. значение	2316,92	5061,64	7665,75
	Максимум	8252,20	18938,42	26560,32
	Минимум	-5139,99	-14069,45	-19476,41
Реактивная мощность Q , квар	Ср. значение	3125,48	6774,68	11382,96
	Максимум	7107,62	19995,32	30932,85
	Минимум	220,46	658,87	622,42
Мощность искажения D , кВ·А	Ср. значение	1676,65	3511,27	6329,40
	Максимум	3350,27	9594,49	17485,96
	Минимум	108,70	224,00	268,50

Расчеты параметров, приведенных в табл. 1, выполнялись по следующим формулам:

$$S = S_1 \sqrt{1 + k_I^2 + k_U^2 + k_U^2 k_I^2};$$

$$P = P_1 + \sum_{k=1}^{15} P_k;$$

$$Q = Q_1 + \sum_{k=1}^{15} Q_k;$$

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$$

где $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$;

На рис. 15 представлены результаты разведочного анализа данных в виде матричного графика, иллюстрирующего корреляции между параметрами $k_U, k_{UI} = k_I k_U, k_P, k_Q$.

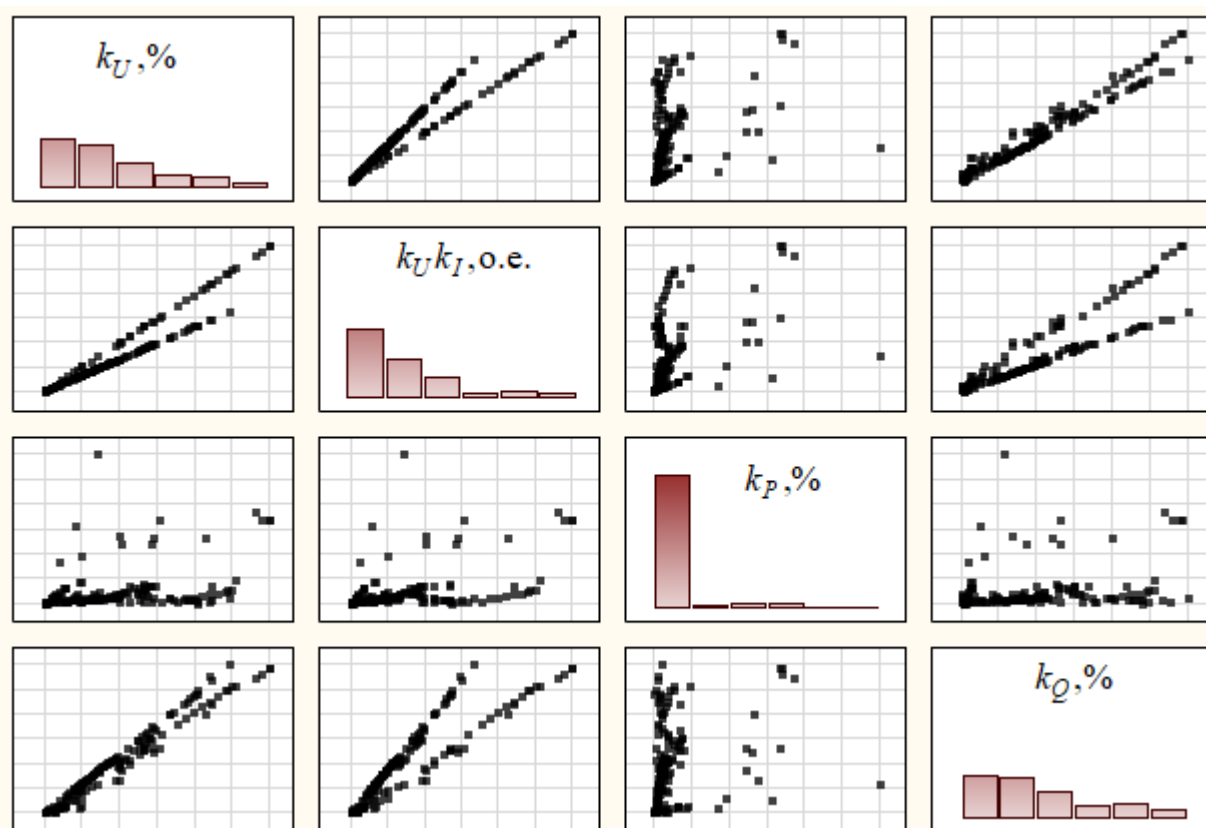


Рис. 15. Матричный график

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Максимальные значения параметра k_P , характеризующего соотношение между активными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, лежат в диапазоне 10..33 %. Зависимость k_P от массы поезда имеет нелинейный характер с минимумом, отвечающим массе 9000 т. Характер этой зависимости для средних значений имеет максимум в той же точке (рис. 10).

2. Максимальные значения параметра k_Q , характеризующего соотношение между реактивными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, лежат в диапазоне 5..40 %. Зависимости максимальных и средних значений k_Q от массы поезда имеет монотонно возрастающий характер (рис. 14).

3. Наблюдается корреляция между следующими показателями: k_U и k_{UI} ; k_U и k_Q ; k_{UI} и k_Q (рис. 15).

Полученные результаты достаточно полно характеризуют процессы электропотребления в несинусоидальных режимах СТЭ. Для более подробного описания этих процессов воз-

можно использование подходов к определению мощностей при наличии гармонических искажений, рассмотренных в работах [4–27].

Заключение. Результаты проведенных компьютерных исследований показали, что на основе методов моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе, возможно определение временных зависимостей, отвечающих активным, реактивным и полным мощностям, генерируемым (потребляемым) электровозами на высших гармониках. На базе этих данных можно обоснованно подходить к определению параметров устройств, предназначенных для улучшения качества электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.А. Ушаков, В.А. Алексеенко. Иркутск : ИрГУПС, 2012. 129 с.
2. Мустафа Г.М., Гусев С.И., Ершов А.М. и др. Расчет мощности активного фильтро-симметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сковородино // Электрические станции. № 3. 2015. С. 46 – 53.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
4. Баланс энергий в электрических цепях / Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. [и др.]. Киев: Наукова думка, 1992. 312 с.
5. Будяну К. И. К вопросу об явлениях искажения в электрических машинах и аппаратах // Журнал электротехники энергетики. № 2. 1956. С. 39-50.
6. Budeanu C. Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive si deformante // Electricitatea/ No. 2. 1951. P. 13-19, No. 3. 1951. P. 6-11.
7. 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.
8. Fryze S. Wirk-Blind-und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nichtsinusformigen verfahren von strom und Spannung // Elektrotechn. Z. 1932. 25. S. 596-599; 26. S. 6325-627; 29. S/ 700-702.
9. Czanecki L. S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems // Rozprawy Electrotechnice. 1985. 31. No. 3, 4. S. 16-24.
10. Quade W. Wirk-, Blind-und Scheinleistung bei Weshselstromen mit beliebiger Kurveform// Arch. Elektrotechn. No. 28. 1934. S. 130-138.
11. Rozenzweig I. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektory jako metoda analizy ukladow wielofazowych // Czasopismo Techniczne. 1939. No. 6. S. 77-82. No. 7. S. 89-94. No. 8. S. 106-110. No. 9. S. 120-125. No/ 10. S. 137-141. No. 11. S. 151-156.
12. Лурье Л. С. Дискуссии. Терминология теоретической электротехники // Электричество. № 5. 1954. С. 84-85.
13. Edelman H. Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung, bei periodischen Stromen und Spannungen in funktionalanalytischer Sicht // Siemens Forsh. – und Entwicklungsber. 1981. 10. No. 1. S. 16-24.
14. Fisher H. Blindleistungs compensation bei nichtperiodischen Stromen und Spannungen //ETZ– Arch. 1982. 4. No. 4. S. 127-131.
15. Пухов Г. Е. Теория мощности системы периодических многофазных токов // Электричество. № 2. 1953. С. 56-61.
16. Curtis H. L., Silsbee F. B. Definitions of Power and Related Quantities // Trans. AIEE/ 1953. 54. P. 394-404.
17. 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.
18. 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.

19. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems // Proc. IEEE. 1973. 120. No. 7. P. 796-798. N 5. P. 390-391.
20. Emanuel A. E. Energetical factors in power systems with nonlinear loads // Arch. Elektrotechn. 1977. 59. No. 3. P. 183-189.
21. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
22. Мощность переменного тока // А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э П. Трейманис [и др.]. Рига, 1993. 292 с.
23. Чаплыгин Е. Е., Калугин Н. Г. Теория мощности в силовой электронике. М., 2006. 24 с.
24. 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.
25. Жемеров Г. Г., Ильина Ц. В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Электротехника и электромеханика. № 6. 2007. С. 63-65.
26. Агунов М. В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами их эффективность. Кишнев-Тольятти, 1997. 84 с.
27. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

REFERENCES

Информация об авторах

Воронина Екатерина Викторовна – студентка группы СОД 1-17-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eka7erina.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: eka7erina.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. Энергетические характеристики несинусоидальных режимов в системах тягового электроснабжения [Электронный ресурс] / Е. В. Воронина, А. В. Крюков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 2(8). – Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/28-20>, свободный.– Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 12.05.2020)

For citation

Voronina E.V. Energy characteristics of non-sinusoidal modes in traction power supply systems [Electronic resource] / E.V. Voronina, A.V. Kryukov // Young science of Siberia: electron. scientific journal - 2020. - No. ____ . - Access mode: <http://mnv.irkups.ru/toma/28-20>, free. - Zagl. from the screen. - Yaz. Russian, English (date of the application: 12.05.2020)