

Анализ процессов в системах тягового электроснабжения при наличии гармонических искажений

Ю.Н. Булатов^{1а}, А.В. Крюков^{2, 3b}, Е.В. Воронина^{2с}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^а bulatovyura@yandex.ru, ^б and kryukov@mail.ru, ^с eka7erina.voronina@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^с <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>

Статья поступила 01.10.2023, принята 17.11.2023

В электрических сетях общего назначения, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) магистральных железных дорог, электрифицированных на переменном токе, наблюдается заметное ухудшение качества электроэнергии (ЭЭ) по критериям отклонений напряжений, несимметрии и несинусоидальности. Помимо этого, нелинейные вольтамперные характеристики выпрямительных электровозов приводят к значительным гармоническим искажениям в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. Особенно остро проблема низкого качества ЭЭ проявляется в сетях, примыкающих к 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 находятся в диапазоне 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, а также 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 учета электроэнергии на подвижном составе. 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 напряжениям на токоприемниках поездов, активным, реактивным и полным мощностям, генерируемым (потребляемым) электровозами на высших гармониках, а также построены формы кривых токов, напряжений и мощностей.

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

Analysis of processes in traction power supply systems in the presence of harmonic distortion

Yu.N. Bulatov^{1а}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, E.V. Voronina^{2с}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^а bulatovyura@yandex.ru, ^б and kryukov@mail.ru, ^с eka7erina.voronina@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^с <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>

Received 01.10.2023, accepted 17.11.2023

In general-purpose electrical networks adjacent to traction substations (TS) of mainline railways electrified with alternating current, there is a noticeable deterioration in the quality of electricity according to the criteria of voltage deviations, asymmetry and non-sinusoidality. In addition, the nonlinear current-voltage characteristics of rectifying electric locomotives lead to significant harmonic distortions in AC railway power supply systems. The problem of low quality energy efficiency is especially acute in networks adjacent to the TS of the eastern sections of the Trans-Siberian Railway; at the same time, the maximum values of the asymmetry coefficients for the negative sequence k_{2U} can reach 6...7%; similar data on the total coefficients of harmonic components k_U are in the range of 8...10%. In the context of digitalization of the electric power industry, including transport, solving the problem of reduced energy quality requires the use of computer technologies, which can be implemented on the basis of methods and tools for modeling railway power supply systems developed at Irkutsk State Transport University. The article presents the results of research aimed at studying the energy characteristics of non-sinusoidal modes in traction power supply systems, as well as the implementation of a method for visualizing the results of determining non-sinusoidal modes of traction networks, based on constructing the shapes of curves of currents, voltages and instantaneous powers on current collectors of electric vehicles. composition. The resulting graphical dependencies make it possible to analyze

energy processes in the vehicle and take a more reasonable approach to determining the parameters of electricity metering devices on rolling stock. Based on the results of these studies, it can be concluded that, based on the use of computer technologies developed at Irkutsk State Transport University, time dependencies can be determined that correspond to the voltages on train pantographs, active, reactive and total powers generated (consumed) by electric locomotives at higher harmonics, and also constructed the shapes of current, voltage and power curves.

Keywords: traction power supply systems; non-sinusoidal modes; shapes of curves of currents, voltages and instantaneous capacities.

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].

В последние годы проведены исследования, создающие методологический фундамент для дальнейшего изучения сложной проблемы анализа энергетических процессов в СТЭ.

Так, например, в статье [24] представлено исследование резонансных явлений в СТЭ, а также их воздействия на стабильность тяговой сети. В ней рассмотрено влияние гармоник в СТЭ на электрооборудование подвижного состава. По результатам моделирования, полученным с использованием программной системы *MATLAB*, проведенному сравнению, а также исследованию коэффициента гармонических искажений показано, как сказывается увеличение нагрузки на генерацию гармоник в СТЭ. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что измерение и мониторинг качества электроэнергии в сетях электрических железных дорог является сложной проблемой, требующей дополнительного изучения.

В работе [25] представлена цифровая система сбора данных: она была разработана и внедрена для измерений на борту различных локомотивов в нескольких странах ЕС. Ее отличительными особенностями являются простота установки и эксплуатации, а также надежность. Приведенные в работе результаты иллюстрируют характеристики исследуемых явлений, различные источники выбросов и особенности тягового источника питания, а также подчеркивают важность синергетического подхода к реализации методов анализа спектров, а также частотно-временного представления стационарных и нестационарных компонентов.

С учетом влияния внешней сети установленное электрооборудование определяет гармонический состав напряжения [26]. При его изменении следует ожидать вариации показателей качества электрической энергии, включая параметры несинусоидальных режимов. Это связано с тем, что каждый тип электроприемников в разной степени влияет на гармонический состав тока и напряжения. Даже при стабильном напряжении нагрузки изменение состава оборудования приводит к вариациям спектра гармоник токов и напряжений.

В статье [27] описаны потенциальные проблемные области, касающиеся качества электроэнергии в СТЭ переменного тока и возможные средства компенсации. Сделан вывод о том, что уровни помех в СТЭ в ближайшие годы будут выше, чем в системах электроснабжения общего пользования.

В статье [28] представлен краткий обзор проблем с качеством электроэнергии в системе тягового электро-снабжения и описаны подходы к их решению.

Результаты исследования, описанные в работе [29], показали, что проблема высокого уровня гармонических искаже-

ний в сетях, питающих тяговые подстанции, может быть полностью решена при замене существующих тяговых двигателей на асинхронные электродвигатели нового поколения с четырехквadrантными преобразователями.

Электрифицированные железные дороги питаются от специализированных тяговых подстанций, которые создают нелинейные нагрузки для внешней сети. Наличие гармоник может снизить коэффициент мощности на 1...5 % на шинах высокого напряжения ТП. В статье [30] рассмотрены гармоники, обусловленные выпрямителями традиционных СТЭ 3 кВ. Моделирование проведено в *Matlab-Simulink* для двух сценариев с целью анализа потоков мощности в различных рабочих условиях.

В статье [31] представлено исследование качества электроэнергии в сети 132 кВ, питающей тяговую подстанцию Арлингтон. Показано, что суммарный коэффициент гармоник превысил допустимый предел для сетей высокого напряжения. Для решения этой проблемы предложено использовать три стратегии: фильтрация гармоник, применение выпрямителей нового поколения и фазосдвигающий трансформатор.

В работе [32] утверждается, что при практической эксплуатации электроэнергетических систем неизбежны аномальные режимы, характеризующиеся значительной несинусоидальностью и несимметрией. В настоящее время большой процент потребителей электрической энергии имеет нелинейные вольтамперные характеристики, которые ухудшают качество электроэнергии. Разработанная авторами модель позволяет анализировать динамическое изменение токов высших гармоник, что дает возможность оценить влияние нелинейной нагрузки на электрооборудование при различных комбинациях доли потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками.

Актуальность исследования, описанного в статье [33], определяется необходимостью изучения несинусоидальных режимов распределительных сетей для получения дополнительной информации об эффективности передачи электроэнергии. Выявлены статистические свойства гармоник напряжений и токов. Изучены статистические распределения модулей высших гармоник напряжений. Определена зависимость одно- и многомодальных статистических распределений и качества сглаживания.

В статье [34] описана методика компьютерного моделирования, позволяющая определить перегрузку конденсаторных батарей при наличии токов высших гармоник. Показано, что задача прогнозирования перегрузки может быть решена путем моделирования несинусоидального режима для планируемого объема движения поездов.

В статье [35] утверждается, что при использовании частотно-регулируемых электроприводов возникает проблема их негативного воздействия на распределительную сеть. В качестве примера приведены результаты измерений показателей качества электроэнергии на вводе железнодорожной тяговой подстанции. Показано, что суммарные гармонические искажения напряжений могут превышать их допустимые значения в течение 100 % времени измерения.

Работа [36] посвящена анализу параметров несинусоидальных режимов. Эти параметры включают компоненты

полной мощности при наличии гармоник напряжения и тока. С помощью математического моделирования определены зависимости составляющих полной мощности, изменяющиеся при вариации несинусоидальных режимов. Эти зависимости можно рассматривать как теоретическую основу для выбора и обоснования типа и структуры фильтрующего устройства как части автоматизированной системы контроля и улучшения качества электроэнергии, а также для настройки параметров существующих фильтрующих устройств для повышения их производительности.

В статье [37] рассматривается влияние электрооборудования подвижного состава на контактную сеть. Приведены подробные сведения о компонентах, которые могут влиять на гармонические искажения: однофазный тяговый трансформатор, асинхронные тяговые двигатели, силовые инверторы и преобразователи, статические силовые преобразователи и контактная сеть. Проанализированы экспериментальные результаты, касающиеся аспектов неустойчивости из-за электрического резонанса на частоте 800 Гц, и определены условия, обеспечивающие их предотвращение. Эксперименты, проведенные до и после внедрения разработанного фильтра, подтвердили правильность его проектирования и реализации. Было выявлено общее влияние фильтра на гармоники.

Для решения задач анализа процессов в СТЭ при наличии гармонических искажений в современных условиях требуется применения компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе [38; 39].

Ниже представлены результаты, направленные на реализацию одного из аспектов данного подхода, связанные с разработкой способов построения форм кривых на токоприемниках подвижного состава, а также результаты компьютерных исследований, направленных на изучение энергетических характеристик несинусоидальных режимов в системах тягового электроснабжения.

Постановка задачи. В ИрГУПСе предложена методология расчета несинусоидальных режимов в фазных координатах [39], которая сводится к решению следующих систем линейных и нелинейных уравнений:

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

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

...

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

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:

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

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

где φ_k — фаза k -й гармоники напряжения; ψ_k — фаза k -й гармоники тока.

Анализ энергетических характеристик проводился применительно к схеме СТЭ, включающей четыре тяговых подстанции и три межподстанционные зоны. В качестве инструмента использовался программный комплекс *Fazonord* [39], в котором реализована описанная выше методика моделирования.

Рассматривалось движение трех поездов массами 12 000 т с интервалами 41 мин, четырех — с массами 9 000 т с интервалом 24 мин и шести — с массами 6 000 т с интервалами 16 мин (рис. 1). Токковые профили поездов показаны на рис. 1. Электроснабжение ТП осуществлялось от линий электропередачи 110 кВ, получающих питание от двух подстанций электроэнергетической системы.

Результаты моделирования. Результаты моделирования несинусоидальных режимов в виде модулей и фаз токов и напряжений на токоприемнике электровоза первого поезда представлены в табл. 1 и проиллюстрированы в виде графиков, показанных на рис. 2. Формы кривых напряжений и токов, построенные по данным табл. 1, представлены на рис. 3. 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 высших гармоник вплоть до пятнадцатой:

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

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

На рис. 4 представлены временные зависимости, характеризующие формы кривых мгновенных мощностей. В соответствии с рекомендациями работы [19] для их построения использовались следующие соотношения:

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

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

На рис. 5–7 показаны временные зависимости напряжения на токоприемнике первого поезда, суммарного коэффициента гармоник k_U и его произведения на аналогичный параметр для токов k_I . На рис. 8 приведены зависимости максимальных и средних значений указанных параметров от массы поездов.

На рис. 9, 10 приведены временные зависимости активных мощностей, потребляемых локомотивами на основной частоте (рис. 9) и частотах высших гармоник (рис. 10).

На рис. 11 представлены временные зависимости коэффициента k_P , который определялся по формуле:

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

На рис. 12 приведены зависимости k_P , который характеризует соотношение между активными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, от массы поезда.

На рис. 13–15 представлены временные зависимости реактивных мощностей и коэффициента k_Q , который рассчитывался по формуле:

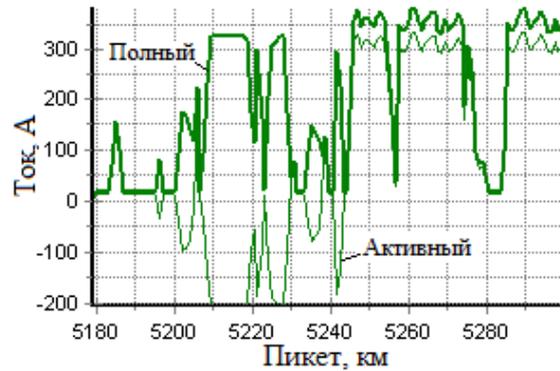
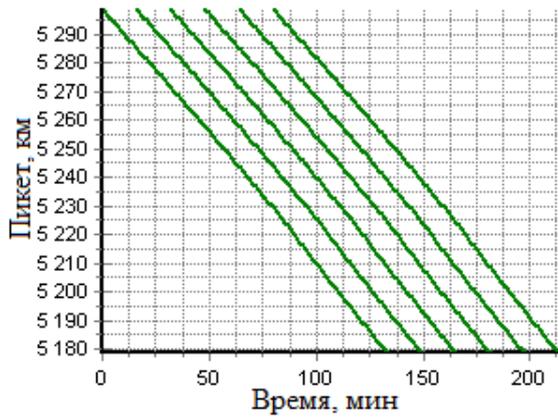
$$k_Q = \left| \frac{\sum_{k=1}^{15} Q_k}{Q_1} \right| \cdot 100.$$

Активные и реактивные мощности на частотах ВГ определялись по классической методике, предложенной в работах

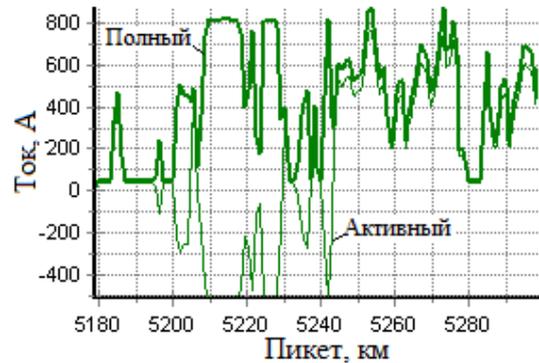
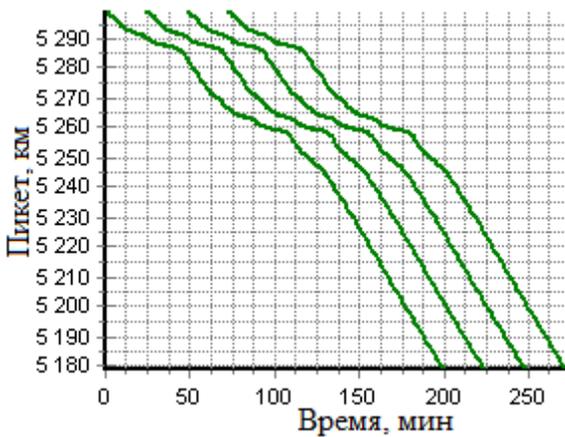
[2–4]. Следует отметить, что полученные результаты позволяют рассчитывать энергетические показатели на основе других подходов, например, изложенных в работах [5–23].

Кроме того, возможен расчет полных мощностей и так называемых мощностей искажения D (табл. 2).

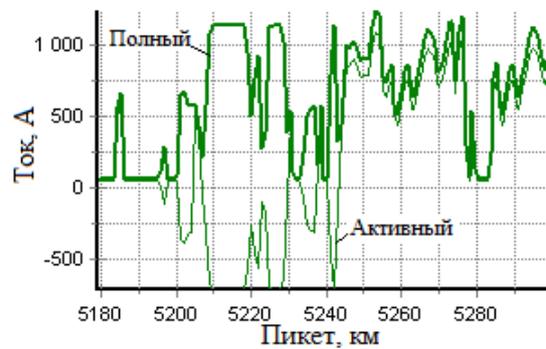
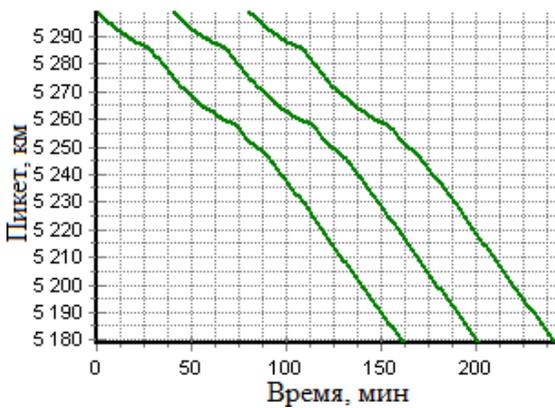
На рис. 13 приведены зависимости коэффициента k_Q , который характеризует соотношение между реактивными мощностями, потребляемыми (генерируемыми) на основной частоте и частотах ВГ, от массы поезда.



a)



б)



в)

Рис. 1. График движения и токовые профили: а — 6 000 т; б — 9 000 т; в — 12 000 т

Таблица 1. Сводные данные по токам и напряжениям гармоник

№ гармоники	Масса поезда, <i>m</i>	<i>U</i> , В	φ_k , град.	<i>I</i> , А	ψ_k , град.
1	6 000	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	9 000	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	12 000	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

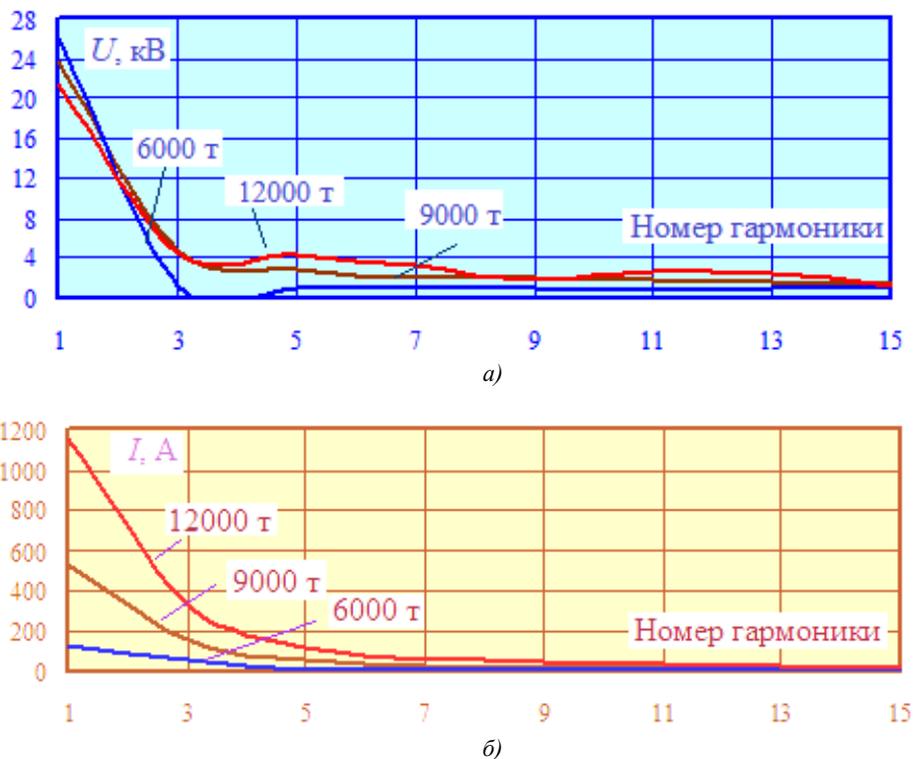


Рис. 2. Напряжения (а) и токи (б) гармонических составляющих

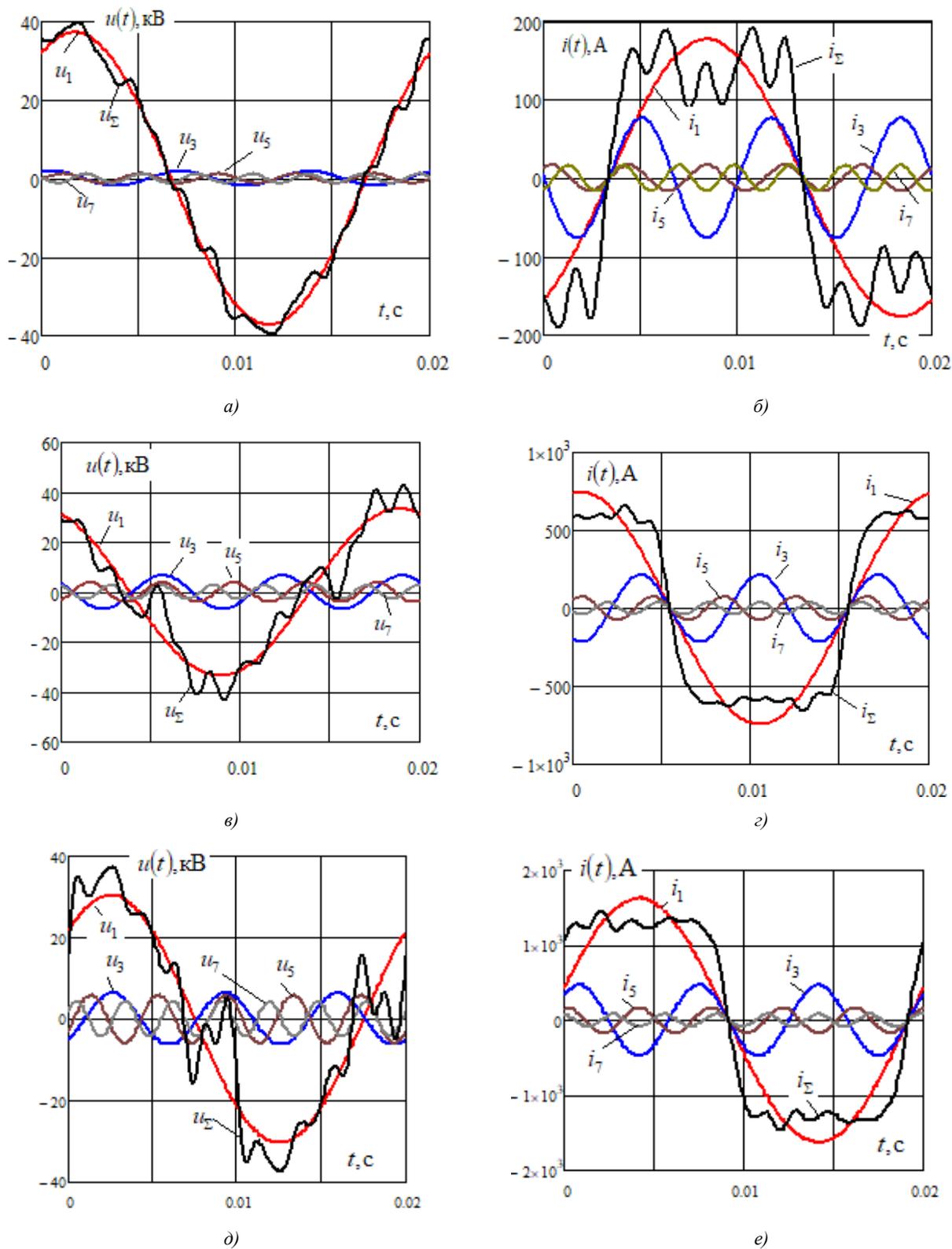


Рис. 3. Кривые токов и напряжений: *a, б* — напряжения; *б, г, e* — токи; *a, б* — поезда массой 6 000 т; *в, г* — 9 000 т; *д, e* — 12 000 т; нижний числовой индекс в обозначениях величин соответствует номеру гармоники

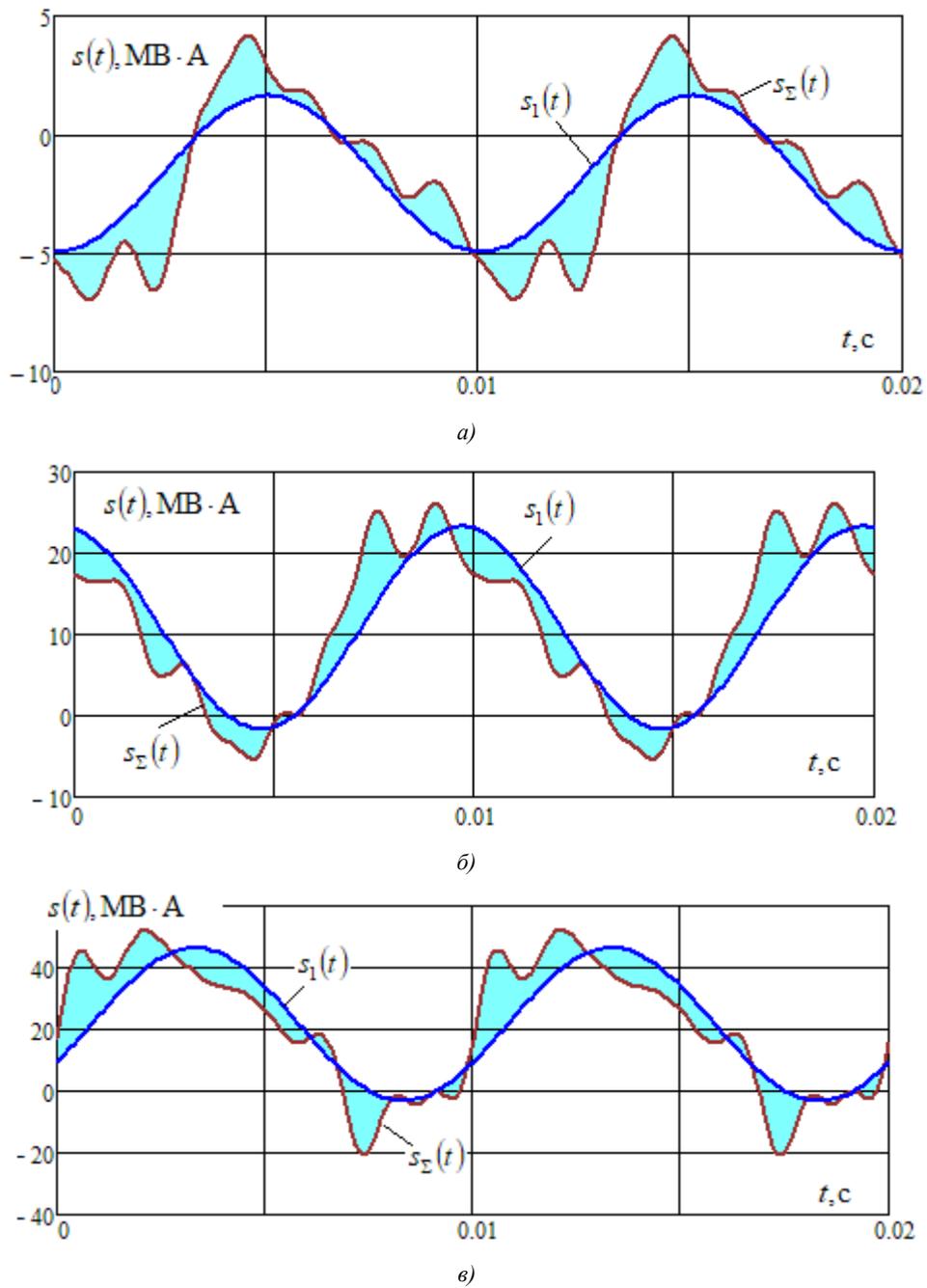


Рис. 4. Кривые мгновенных мощностей на основной гармонике $s_1(t)$ и с учетом высших гармоник $s(t)$ для поездов массой: а — 6 000 т; б — 9 000 т; в — 12 000 т

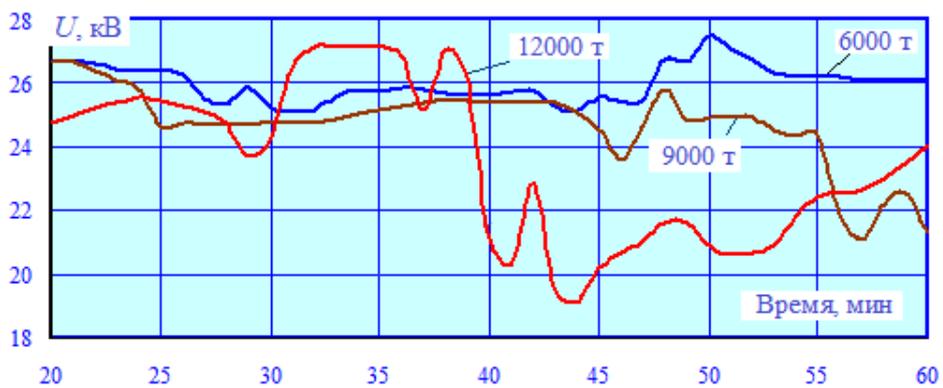


Рис. 5. Напряжение на токоприемнике первого поезда

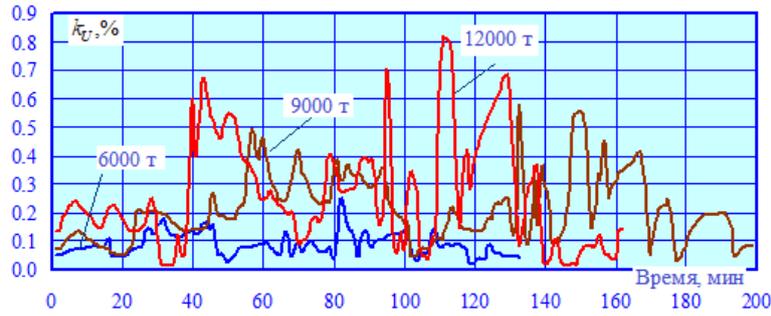


Рис. 6. Вариации суммарных коэффициентов гармоник на токоприемниках

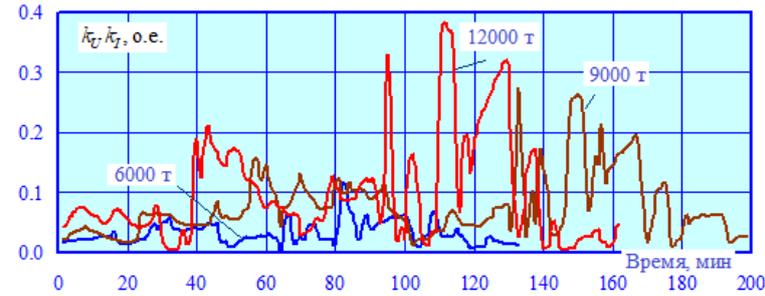


Рис. 7. Вариации произведений коэффициентов гармоник токов и напряжений

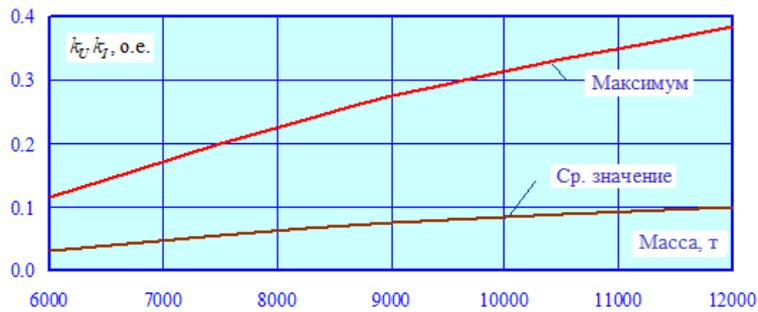


Рис. 8. Зависимости параметра $k_U \cdot k_I$ от массы поезда

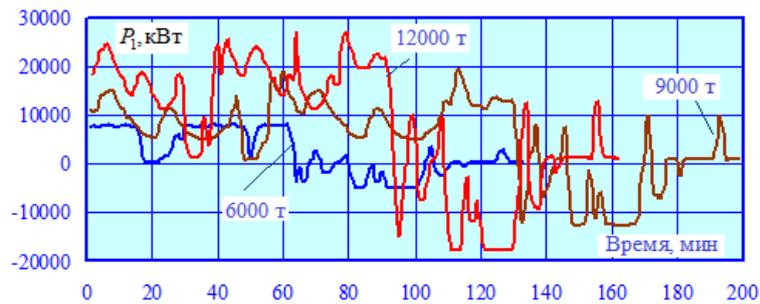


Рис. 9. Временные зависимости активных мощностей, потребляемых локомотивами на основной частоте

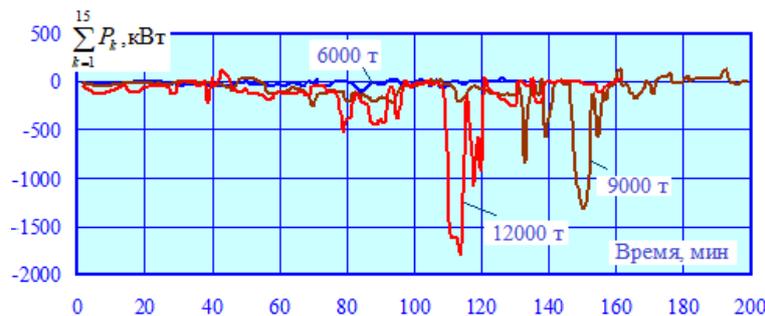


Рис. 10. Временные зависимости активных мощностей, потребляемых локомотивами на частотах ВГ

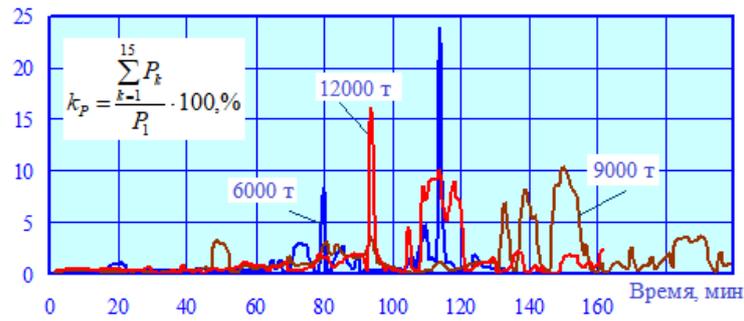


Рис. 11. Временные зависимости параметра k_p

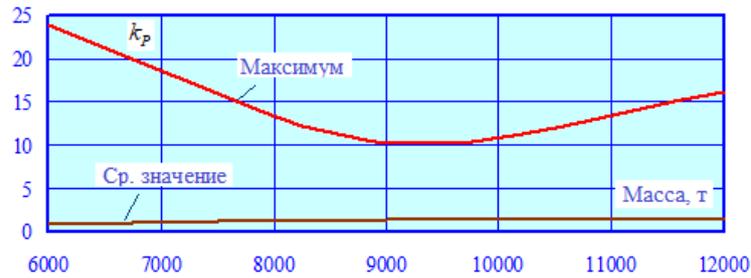


Рис. 12. Зависимости параметра k_p от массы поезда

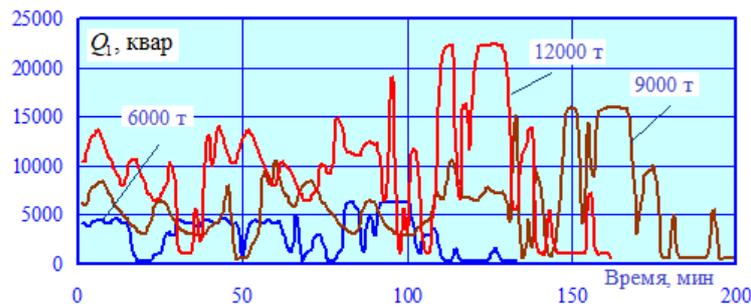


Рис. 13. Временные зависимости реактивных мощностей, потребляемых локомотивами на основной частоте

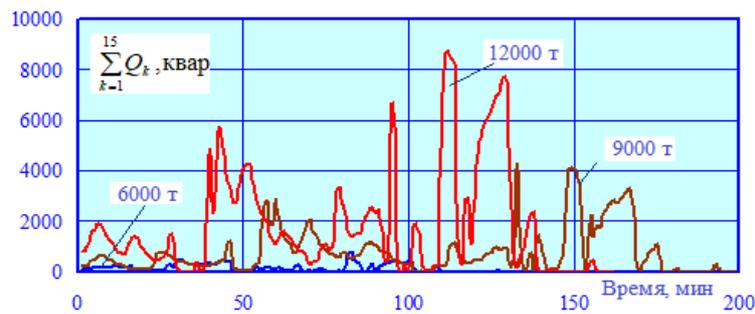


Рис. 14. Временные зависимости реактивных мощностей, потребляемых локомотивами на частотах ВГ

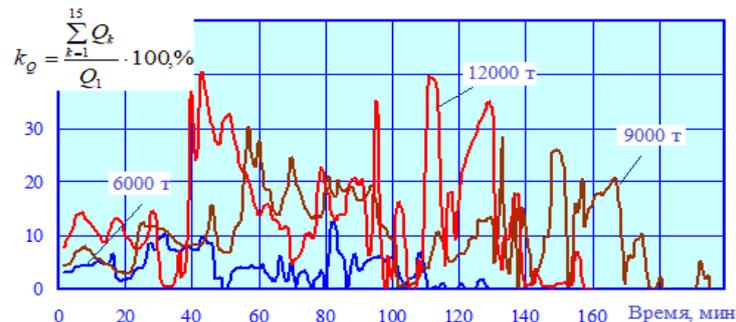


Рис. 15. Временные зависимости параметра k_Q

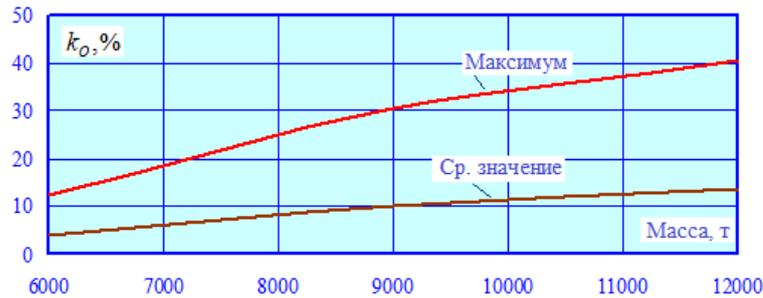
Рис. 16. Зависимости параметра k_Q от массы поезда

Таблица 2. Сводные данные моделирования

Параметр	Показатель	Масса поездов, t		
		6 000	9 000	12 000
Полная мощность, S , кВ·А	Среднее значение	5 461,91	11 424,03	18 780,21
	Максимум	10 053,87	25 726,82	40 514,38
	Минимум	373,74	1 085,29	1 032,42
Активная мощность, P , кВт	Среднее значение	2 316,92	5 061,64	7 665,75
	Максимум	8 252,20	18 938,42	26 560,32
	Минимум	-5 139,99	-14 069,45	-19 476,41
Реактивная мощность, Q , квар	Среднее значение	3 125,48	6 774,68	11 382,96
	Максимум	7 107,62	19 995,32	30 932,85
	Минимум	220,46	658,87	622,42
Мощность искажения, D , кВ·А	Среднее значение	1 676,65	3 511,27	6 329,40
	Максимум	3 350,27	9 594,49	17 485,96
	Минимум	108,70	224,00	268,50

Расчеты параметров, приведенных в табл. 2, выполнялись по формулам:

$$S = S_1 \sqrt{1 + k_i^2 + k_v^2 + k_v^2 k_i^2};$$

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

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

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

где $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$.

Из анализа приведенных зависимостей могут быть сформулированы следующие выводы:

1. Диаграммы изменений результирующих напряжений для поездов массами 9 000 и 12 000 т характеризуются многократными пересечениями оси абсцисс за время, равное периоду основной частоты (рис. 3).

2. Кривые результирующих токов для поездов массами 9 000 и 12 000 т имеют формы, близкие к прямоугольным (рис. 3).

3. 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 9 000 т. Характер этой зависимости для средних значений имеет максимум в той же точке (рис. 12).

4. 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 имеют монотонно возрастающий характер (рис. 16).

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, а также при разработке средств подавления гармонических искажений в системах электроснабжения железных дорог.

Литература

1. Tonkal V.Ye., Novoseltsev A.V., Denisuyk S.P. Balance of energies in electrical circuits. 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. 1956. № 2. P. 39-50.
3. Budeanu C. Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive si deformatante // Electricitatea. 1951. № 2. P. 13-19.
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 min nichtsinusformigen verfaf von strom und Spannung // Elektrotechn. 1932. № 25. P. 596-599.
6. Czanecki L.S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems // Rozprawy Electro-technize. 1985. № 3, 4. P. 16-24.

7. Quade W. Wirk-, Blind- und Scheinleistung bei Weshselstromen mit beliebiger Kurveform // Arch. Elektrotechn. 1934. № 28. P. 130-138.
8. Rozenzweig I. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektory jako metoda analizy ukladow wielofazowych // Czasopismo Techniczne. 1939. № 6. P. 77-82.
9. Lurie L.S. Discussions. The terminology of theoretical electrical engineering // Electricity. 1954. № 5. P. 84-85.
10. Edelman H. Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung, bei periodischen Stromen und Spannungen in funktionalanalytischer Sicht // Siemens Forsh. und Entwicklungsber. 1981. № 1. P. 16-24.
11. Fisher H. Blindleistungs compensation bei nichtperiodischen Stromen und Spahungen // ETZ- Arch. 1982. № 4. P. 127-131.
12. Pukhov G.E. Power theory of a system of periodic multiphase currents. Electricity. 1953. № 2. 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. № 9. P. 1361-1362.
16. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems // Proc. IEEE. 1973. 120. № 7. P. 796-798.
17. Emanuel A.E. Energetical factors in power systems with nonlinear loads // Arch. El-ektrotechn. 1977. V. 59. P. 183-189.
18. Maevsky O.A. Energy indicators of valve converters. M.: Energiya, 1978. 320 p.
19. Krogeris A.F., Rashevits K.K., Treimanis E.P. Power of alternating current [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 zalizn. transport im. acad. V. Lazaryan. D. 2010. № 34. P. 73-76.
22. Zhemerov G.G., Ilyina Shch. V. Frize power theory and modern power theories // Elec-trical engineering and electromechanics. 2007. № 6. 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. Aissaoui M., Benidir M., Bouzeria H., Berroum F., Ras A.C., Mammeri I. Analysis of harmonic resonance in traction power supply system, 2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Constantine, Algeria, 2022. P. 1-5.
25. Mariscotti A. Measuring the power quality of railway networks, 2010 IEEE Instru-mentation & Measurement Technology Conference Proceedings, Austin, TX, USA, 2010. P. 686-690.
26. Avilov V.D., Tretyakov E.A. Dataware of Simulating Equipment Composition Influence on Electric Energy Quality of Railway Transport Enterprises, 2005 11th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists - Modern Technique and Technologies, Tomsk, Russia, 2005. P. 21-23.
27. Morrison R.E. Power quality issues on AC traction systems, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power.
28. Hanafy A.M., Hebala O.M., Hamad M.S. Power Quality Issues in Traction Power Systems, 2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Assiut, Egypt, 2021. P. 188-193.
29. Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Shafikov A.R. Modeling Non-Sinusoidal Modes in Electrical Networks Supplying Power to Traction Substations for Electromotives Operation with Four-Quadrant Converters, 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019. P. 394-398.
30. De Santis M., Silvestri L., Vallotto L., Bella G. Environmental and Power Quality Assessment of Railway Traction Power Substations, 2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, Singapore, 2022. P. 147-153.
31. Nel C., Ajeigbe O.A., Daniel S.P. Chowdhury Taming the total harmonic distortion on the 132kV Arlington Traction Station, 2017 IEEE PES PowerAfrica, Accra, Ghana, 2017. P. 550-554.
32. Dzhuraev S.D., Tulsy V.N., Valianskii A.V., Sultan H.M., Inoyatov B.J. Analysis of the results of higher harmonic modeling in the electric networks of the Republic of Tajikistan with various voltage levels, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 611-616.
33. Kharlov N.N., Borovikov V.S., Ushakov V.Y., Tarasov E.V., Bulyga L.L. On the issue of modeling non-sinusoidal modes of distribution networks, 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, Russia, 2016. P. 222-226.
34. Zakaryukin V.P., Cherepanov A.V., Kutsyi A.P. Non Sinusoidal Modes of Traction Power Supply Systems Equipped with Reactive Power Compensation // International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019): Proceedings of the International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport AviaENT 2019 (27 may 2019 ye.). V. 188. Irkutsk: Atlantis Press, 2019. P. 71-76.
35. Vanin V., Bulychov A., Popov M. Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load // MATEC Web of Conferences, 29 AF Polytechnicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg (19-20 nov. 2018 ye.). 29 AF Polytech-nicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg, 2018. P. 06007.
36. Sychev Y., Prokhorova V., Aladin M. The modeling and analysis of the parameters of the non-sinusoidal modes // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1753. P. 012045.
37. Nicolae P. M. Theoretical and Practical Aspects of Harmonics from a Railway Traction System Supplying Line, 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal / Power Integrity (EMCSI), Reno, NV, USA, 2020. P. 488-493.
38. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ушаков В.А., Алексеенко В.А. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.
39. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

References

1. Tonkal V.Ye., Novoseltsev A.V., Denisuyk S.P. Balance of energies in electrical circuits. 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. 1956. № 2. P. 39-50.
3. Budeanu C. Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive si defonante // Electricitatea. 1951. № 2. P. 13-19.
4. Budeanu C. Probleme de la presence des pussances reactives dans les installation de pro-duction 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. 1932. № 25. P. 596-599.

6. Czanecki L.S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems // *Rozprawy Electro-technize*. 1985. № 3, 4. P. 16-24.
7. Quade W. Wirk-, Blind- und Scheinleistung bei Weshselstromen mit beliebiger Kurveform // *Arch. Elektrotechn.* 1934. № 28. P. 130-138.
8. Rozenzweig I. Symboliczny wielowymiarowy rachunek wektory jako metoda analizy ukladow wielofazowych // *Czasopismo Techniczne*. 1939. № 6. P. 77-82.
9. Lurie L.S. Discussions. The terminology of theoretical electrical engineering // *Electricity*. 1954. № 5. P. 84-85.
10. Edelman H. Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung, bei periodischen Stromen und Spannungen in funktionalanalytischer Sicht // *Siemens Forsh. und Entwicklungsber.* 1981. № 1. P. 16-24.
11. Fisher H. Blindleistungs compensation bei nichtperiodischen Stromen und Spahungen // *ETZ- Arch.* 1982. № 4. P. 127-131.
12. Pukhov G.E. Power theory of a system of periodic multiphase currents. *Electricity*. 1953. № 2. 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. № 9. P. 1361-1362.
16. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems // *Proc. IEEE*. 1973. 120. № 7. P. 796-798.
17. Emanuel A.E. Energetical factors in power systems with nonlinear loads // *Arch. El-ektrotechn.* 1977. V. 59. P. 183-189.
18. Maevsky O.A. Energy indicators of valve converters. M.: Energiya, 1978. 320 p.
19. Krogeris A.F., Rashevits K.K., Treimanis E.P. Power of alternating current [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 zalizn. transport im. acad. V. Lazaryan. D.* 2010. № 34. P. 73-76.
22. Zhemerov G.G., Ilyina Shch. V. Frize power theory and modern power theories // *Elec-trical engineering and electromechanics*. 2007. № 6. 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. Aissaoui M., Benidir M., Bouzeria H., Berroum F., Ras A.C., Mammeri I. Analysis of harmonic resonance in traction power supply system, 2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Constantine, Algeria, 2022. P. 1-5.
25. Mariscotti A. Measuring the power quality of railway networks, 2010 IEEE Instru-mentation & Measurement Technology Conference Proceedings, Austin, TX, USA, 2010. P. 686-690.
26. Avilov V.D., Tretyakov E.A. Dataware of Simulating Equipment Composition Influence on Electric Energy Quality of Railway Transport Enterprises, 2005 11th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists - Modern Technique and Technologies, Tomsk, Russia, 2005. P. 21-23.
27. Morrison R.E. Power quality issues on AC traction systems, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power.
28. Hanafy A.M., Hebala O.M., Hamad M.S. Power Quality Issues in Traction Power Systems, 2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Assiut, Egypt, 2021. P. 188-193.
29. Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Shafikov A.R. Modeling Non-Sinusoidal Modes in Electrical Networks Supplying Power to Traction Substations for Electromotives Operation with Four-Quadrant Converters, 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019. P. 394-398.
30. De Santis M., Silvestri L., Vallotto L., Bella G. Environmental and Power Quality Assessment of Railway Traction Power Substations, 2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, Singapore, 2022. P. 147-153.
31. Nel C., Ajeigbe O.A., Daniel S.P. Chowdhury Taming the total harmonic distortion on the 132kV Arlington Traction Station, 2017 IEEE PES PowerAfrica, Accra, Ghana, 2017. P. 550-554.
32. Dzhuraev S.D., Tulsy V.N., Valianskii A.V., Sultan H.M., Inoyatov B.J. Analysis of the results of higher harmonic modeling in the electric networks of the Republic of Tajikistan with various voltage levels, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 611-616.
33. Kharlov N.N., Borovikov V.S., Ushakov V.Y., Tarasov E.V., Bulyga L.L. On the issue of modeling non-sinusoidal modes of distribution networks, 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, Russia, 2016. P. 222-226.
34. Zakaryukin V.P., Cherepanov A.V., Kutsyi A.P. Non Sinusoidal Modes of Traction Power Supply Systems Equipped with Reactive Power Compensation // *International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019): Proceedings of the International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport AviaENT 2019 (27 may 2019 ye.)*. V. 188. Irkutsk: Atlantis Press, 2019. P. 71-76.
35. Vanin V., Bulychov A., Popov M. Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load // *MATEC Web of Conferences*, 29 AF Polytechnicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg (19-20 nov. 2018 ye.). 29 AF Polytech-nicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg, 2018. P. 06007.
36. Sychev Y., Prokhorova V., Aladin M. The modeling and analysis of the parameters of the non-sinusoidal modes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1753. P. 012045.
37. Nicolae P. M. Theoretical and Practical Aspects of Harmonics from a Railway Traction System Supplying Line, 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal / Power Integrity (EMCSI), Reno, NV, USA, 2020. P. 488-493.
38. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operational management in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 129 p.
39. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex-symmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.