

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2024-1-60-71

## Учет динамики изменений нагрузок стационарных потребителей при моделировании систем тягового электроснабжения

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, А.Е. Крюков<sup>3d</sup><sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 10.01.2024, принята 09.02.2024

Цель представленных в статье исследований состоит в разработке методов и средств для учета динамики изменений нагрузок стационарных потребителей при моделировании систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД). При реализации цифровых моделей использовались технологии определения режимов СЭЖД в фазных координатах и программный продукт Fazonord, версия 5.3.2.9-2024. Расчеты выполнялись для схемы, включающей следующие элементы: три линии сети 220 кВ энергоснабжающей организации; три тяговых подстанции (ТП) с трансформаторами ТДТНЖ-40000–230/27,5/6, два участка контактной сети протяженностью 50 км. Рассматривалось движение пяти поездов массой 3 200 т в нечетном направлении и такого же числа составов 6 000 т — в четном. Моделирование режимов на основной частоте и частотах высших гармоник проведено в двух вариантах, при стабильных и изменяющихся во времени нагрузках стационарных потребителей электроэнергии. Проанализированы следующие показатели: уровни напряжений на токоприемниках электропоездов, коэффициенты несимметрии на шинах 220 кВ, гармонические искажения на выводах 6 кВ районных обмоток ТП, токи и температуры проводов, питающих ЛЭП, потери мощности в трансформаторах, напряженности электромагнитных полей ЛЭП 220 кВ. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что для адекватного моделирования режимов СЭЖД требуется корректный учет вариаций стационарных нагрузок. Такой подход будет наиболее востребован при реализации киберфизических СЭЖД, основанных на масштабной интеграции вычислительных ресурсов в процессы передачи, преобразования и потребления электроэнергии. Предложенная технология моделирования может использоваться на практике при определении режимов и нагрузочной способности СЭЖД, а также при разработке мероприятий по улучшению показателей качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог; моделирование; учет вариаций нагрузок стационарных потребителей.

## Taking into account the dynamics of changes in loads of stationary consumers when modeling traction power supply systems

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, A.E. Kryukov<sup>2d</sup><sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 10.01.2024, accepted 09.02.2024

The purpose of the research presented in the article is to develop methods and tools for taking into account the dynamics of changes in loads of stationary consumers when modeling railway power supply systems. When implementing digital models, technologies for determining modes in phase coordinates and the Fazonord software product, version 5.3.2.9-2024, are used. Calculations are performed for a scheme that includes the following elements: three lines of a 220 kV network of an energy supply organization; three traction substations, two sections of a contact network with a length of 50 km. The movement of five trains weighing 3200 tons in an odd direction and the same number of trains weighing 6000 tons in an even direction are considered. Modeling of modes at the fundamental frequency and frequencies of higher harmonics is carried out in two versions: with stable and time-varying loads of stationary electricity consumers. The following indicators are analyzed: voltage levels on the current collectors of electric locomotives, asymmetry coefficients on 220 kV buses, harmonic distortions at the 6 kV terminals of regional windings of traction substations, currents and tempera-

tures of the wires supplying power lines, power losses in transformers, electromagnetic field strengths of 220 kV power lines. The results obtained lead to the conclusion that adequate modeling of power supply systems requires correct consideration of variations in stationary loads. This approach will be most in demand when implementing cyber-physical power supply systems based on large-scale integration of computing resources into the processes of transmission, conversion and consumption of electricity. The proposed modeling technology can be used in practice when determining the modes and load capacity of systems power supply, as well as in developing measures to improve power quality indicators.

**Keywords:** railway power supply systems; modeling; accounting for variations in loads of stationary consumers.

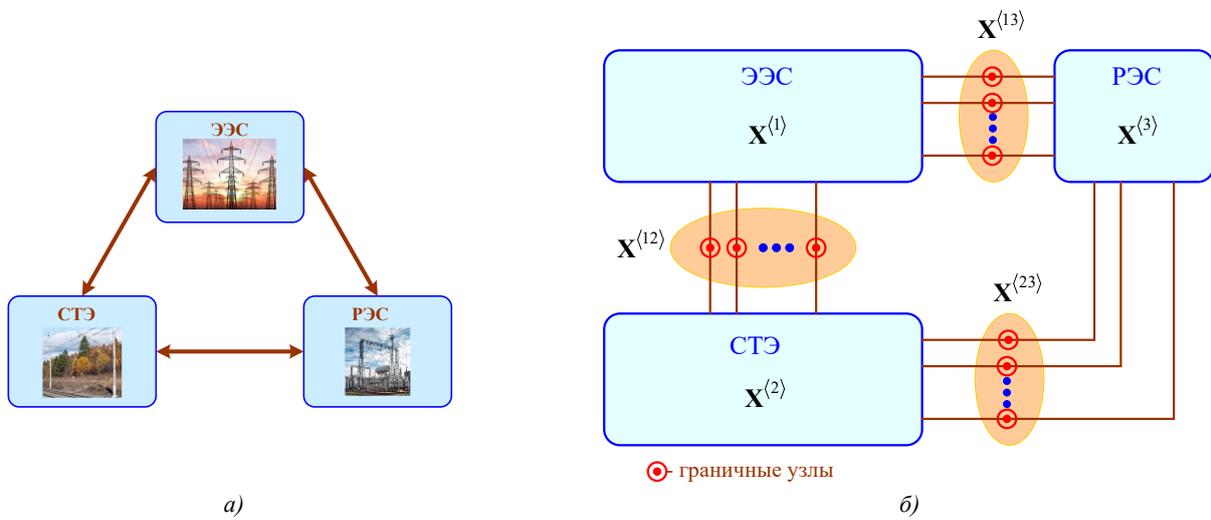
**Введение.** В систему электроснабжения железной дороги  $S_{RPSS}$  входят три сложных сегмента (рис. 1):

$$S_{RPSS} = S_{EPS} \cup S_{TPSS} \cup S_{PSA},$$

где  $S_{EPS}$  — электроэнергетическая система (ЭЭС), выступающая в роли основного источника питания;  $S_{TPSS} = S_{TPSS}^{(25)} \cup S_{TPSS}^{(2 \times 25)}$  — система тягового электроснабже-

ния (СТЭ);  $S_{PSA} = \bigcup_k S_{PSA}^{(k)}$  — районы электроснабжения стационарных потребителей;  $S_{TPSS}^{(25)}$  — СТЭ с тяговыми сетями (ТС) 25 кВ;  $S_{TPSS}^{(2 \times 25)}$  — СТЭ с ТС 2×25 кВ.

Перечисленные сегменты активно взаимодействуют друг с другом по силовым и информационным каналам (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Взаимодействие подсистем (а) и вектора их параметров (б):  $X$  — векторы параметров режима

Каждому сегменту отвечает следующее кортежное определение [1]:

$$S = \{\{e_l\}, \{Com\}, F\},$$

где  $\{e_l\} = \{e_{l_e}\} \cup \{e_{l_i}\}$  — элементы, образующие  $S_{RPSS}$ ;  $\{e_{l_e}\}$  — силовые устройства, осуществляющие передачу и преобразование энергии: линии электропередачи, трансформаторы, контактные сети и др.;  $\{e_{l_i}\}$  — устройства для получения, обработки и передачи информации;  $\{Com\}$  — связи, которые определяют силовую и энергетическую структуры  $S_{RPSS}$ ;  $F$  — функция  $S_{RPSS}$ , отвечающая эмерджентному свойству, не присутствующему отдельным элементам.

Функция  $F$  состоит в полном и бесперебойном обеспечении электроэнергией (ЭЭ) процессов перевозок и потребности стационарных объектов. Тогда можно записать следующие балансовые соотношения:

$$\begin{aligned} (\forall t_k \in T_H) P_{\Sigma}(t_k) &= P_{\Sigma T}(t_k) + P_{\Sigma HP}(t_k) + \Delta P(t_k); \\ Q_{\Sigma}(t_k \in T_H) &= Q_{\Sigma T}(t_k) + Q_{\Sigma HP}(t_k) + \Delta Q(t_k), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T_H = T - T_A, T_A, T$  — соответственно периоды нормальной работы, аварийных ситуаций и существования системы;  $P_{\Sigma}(t_k), P_{\Sigma T}(t_k), P_{\Sigma HP}(t_k)$  — активные мощно-

сти: поставляемые, потребляемые электроподвижным составом и стационарными потребителями;  $\Delta P(t_k)$  — потери;  $Q_{\Sigma}(t_k), Q_{\Sigma T}(t_k), Q_{\Sigma HP}(t_k), \Delta Q(t_k)$  — аналогичные показатели для реактивной мощности.

Реализация (1) должна выполняться при соблюдении следующих условий:

1) максимально возможная эффективность, т. е.:

$$Z_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $Z_{\Sigma}$  — затраты на передачу и распределение ЭЭ;

2) оптимальная надежность электроснабжения, т. е.:

$$P_{off} \rightarrow \min \text{ при } Z_{\Sigma} \rightarrow \text{opt} \quad (3)$$

или

$$T_A \rightarrow \min,$$

где  $p_{off}$  — вероятность отключения потребителей;

3) соблюдение нормативных требований по показателям качества электроэнергии (ПКЭ):

$$G \in G_D, \quad (4)$$

где  $G$  — вектор ПКЭ;  $G_D$  — область допустимых значений ПКЭ.

В современных условиях, характеризующихся мас-

штабным внедрением цифровизации [2], особую актуальность приобретает задача разработки методов и средств моделирования режимов СЭЖД, без которых обеспечить эффективное выполнение условий (2) – (4) невозможно. Актуальность этой задачи подтверждается большим числом работ по данной тематике, часть из которых приведена в библиографическом списке к этой статье. Так, например, в [3–6] для моделирования СЭЖД используется подход, основанный на применении *Matlab-Simulink*. В [7] проведен анализ методов определения режимов при пропуске поездов значительной массы и сформулированы задачи дальнейших исследований. В [8] рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности СТЭ 25 кВ. Имитационная модель СТЭ переменного тока для оценки качества электроэнергии описана в [9]. Анализ программного обеспечения для расчета аварийных режимов в СТЭ выполнен в [10]. Вопросы моделирования СТЭ для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами рассмотрены в [11]. Подход к решению задачи определения режимов СТЭ, оснащенных накопителями энергии, сформулирован в [12]. В [13] дана оценка эффективности работы релейных защит СТЭ на основе определения режимов. Результаты моделирования СТЭ переменного тока при пропуске поездов повышенной массы приведены в [14]. Вопросы усовершенствования средств для расчета режимов СТЭ рассмотрены в [15]. Задачи имитационного моделирования динамических процессов в СТЭ описаны в [16]. В [17] предложено использовать среду *Multisim* для определения режимов СТЭ 2×25 кВ. Вопросы расчета пропускной способности на основе моделирования СТЭ рассмотрены в [18]. Задача анализа транзита ЭЭ из системы внешнего электроснабжения решена в [19]. Способы повышения эффективности использования энергии рекуперации описаны в [20]. Результаты определения режимов нагрузки постов секционирования при наличии накопителей энергии представлены в [21]. Задачи математического моделирования СТЭ описаны в [22]. Вопросы анализа процессов в ТС, оснащенных инерционными накопителями, рассмотрены в [23]. Этапы определения режимов СТЭ представлены в [24]. В [25] дана оценка эффективности использования энергии рекуперации, полученная на основе определения режимов. Общая математическая модель СТЭ представлена в [26]. Результаты расчета эквивалентной нагрузки СТЭ приведены в [27]. Влияние СТЭ на ПКЭ региональной электросети проанализировано в [28]. Результаты исследования адаптивности СТЭ при эксплуатации тяжеловесных поездов приведены в [29].

Анализ представленных публикаций показывает, что в них рассмотрены многие важные аспекты проблемы моделирования СЭЖД, что создает фундамент для дальнейших исследований, направленных на совершенствование методов и алгоритмов. По мнению авторов, основные усилия должны быть приложены к задаче корректного учета взаимодействий ЭЭС, СТЭ и РЭС. Эффективный подход к ее решению может быть основан на применении фазных координат и решетчатых схем замещения [30; 31] с использованием концепции киберфизических систем электроснабжения, описанных в [32; 33]. Ниже приведены результаты работ по созданию цифровых моделей СЭЖД, обеспечиваю-

щих корректный учет динамики изменений нагрузок стационарных потребителей [34].

**Методика и результаты моделирования.** При определении режимов СЭЖД возникают затруднения, связанные с ее особенностями, состоящими в следующем:

- значительная пространственная распределенность;
- структурная разнородность, вызванная тем, что СТЭ однофазная, а сети ЭЭС и РЭС трехфазные;
- пульсация активной мощности в ТС;
- наличие потребителей электроэнергии, перемещающихся в пространстве;
- существенная несимметрия напряжений в сетях ЭЭС и РЭС, примыкающих к тяговым подстанциям;
- значительные гармонические искажения.

В наиболее общем виде модель СЭЖД может быть представлена так:

$$\frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} = \Phi_i[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)], \quad (5)$$

где  $\mathbf{X}(t)$  — переменные, характеризующие режим;  $\Phi_i$  — нелинейный оператор;  $\mathbf{Y}(t)$  — вектор, включающий активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок.

Применение модели (5) для определения стационарных режимов нецелесообразно. Наиболее приемлемый подход состоит в использовании имитационных методов [30; 31], которые реализуются на основе концепции мгновенных схем; при этом рассматриваемый интервал  $T_M$  разбивается на небольшие отрезки  $\Delta t$ . На каждом из них параметры  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  считаются постоянными, и формируется следующая нелинейная система уравнений:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k) = \mathbf{0}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k$  — векторы  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ , отвечающие  $k$ -й мгновенной схеме.

Методы моделирования, предложенные в [30; 31] и реализованные в программном комплексе *Fazonord*, позволяют выполнять определение режимов СЭЖД, включающей СТЭ, ЭЭС и РЭС. Ниже представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния динамики изменения нагрузок ЭЭС и РЭС (рис. 2) на режимы СЭЖД. Расчеты выполнялись для схемы СЭЖД, включающей следующие элементы: три линии 220 кВ сети ЭЭС; такое же число ТП с трансформаторами ТДТНЖ-40000–230/27,5/6, два участка ТС протяженностью 50 км. Рассматривалось движение пяти поездов массой 3 200 т в нечетном направлении и такого же количества составов массой 6 000 т — в четном. График и токовые профили электровозов показаны на рис. 3.

Моделирование осуществлялось в двух вариантах. В первом учитывалась динамика изменений активных и реактивных нагрузок, приложенных к шинам 6 кВ всех ТП. В качестве примера на рис. 4 приведены фрагменты графиков нагрузок фазы А районной обмотки ТП 1. Статистические характеристики графиков нагрузки представлены в табл. 1. Во втором варианте нагрузки задавались постоянными по табл. 2. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 5–15.

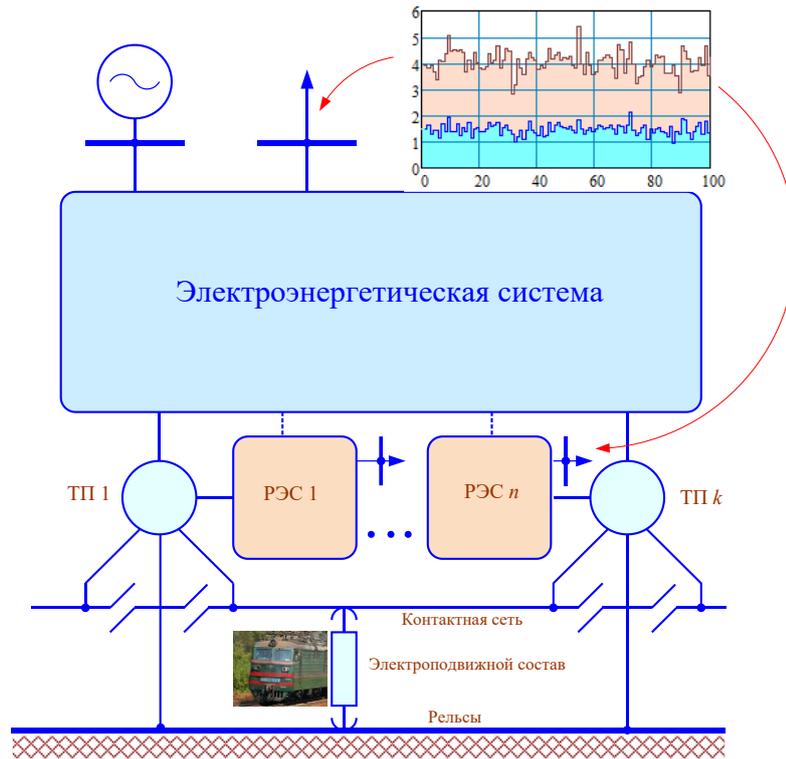


Рис. 2. Структура схемы СЭЖД

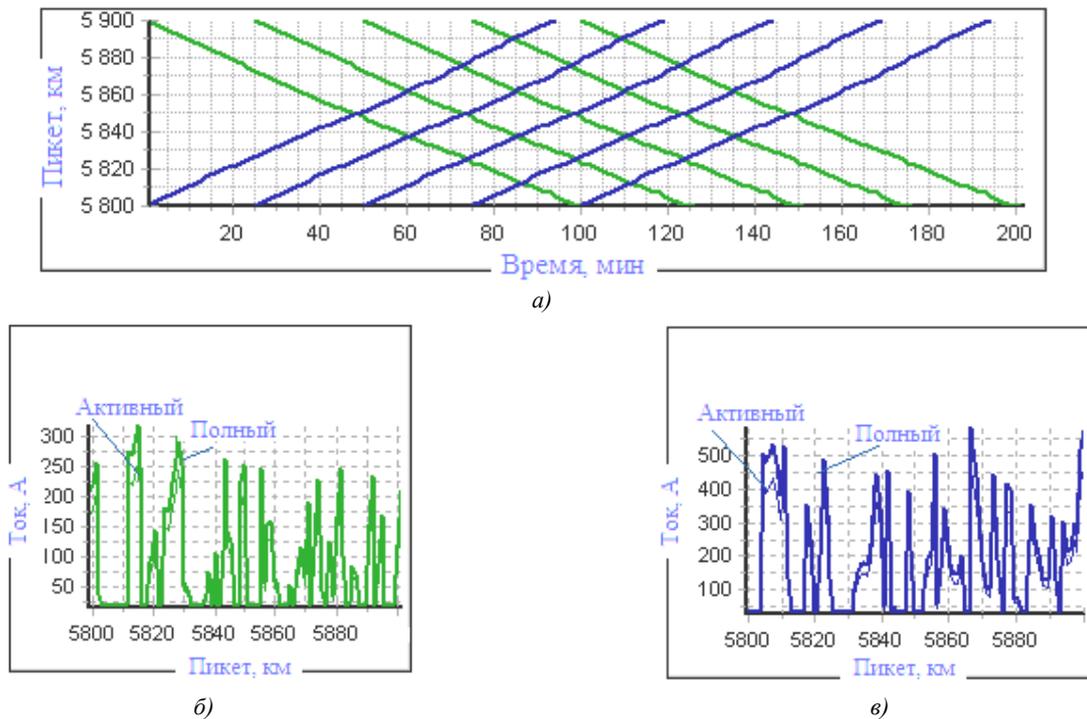


Рис. 3. График движения (а) и токовые профили нечетного (б) и четного (в) поездов: масса нечетного состава 3 200 т, четного — 6 000 т

На рис. 5 приведены зависимости напряжения на токоприемнике электровоза первого нечетного поезда от времени для двух описанных выше вариантов учета стационарных нагрузок. Максимальные различия достигают 4 %, средние — 1,7 %. На рис. 6 показаны вариации линейных напряжений на шинах 6 кВ ТП 3. Их

совмещенные графики для двух вариантов моделирования представлены на рис. 7. Максимальные различия по вариантам расчета равны: по фазе А — 3,5 %; по фазе В — 6,3 %; по фазе С — 3,6 %.

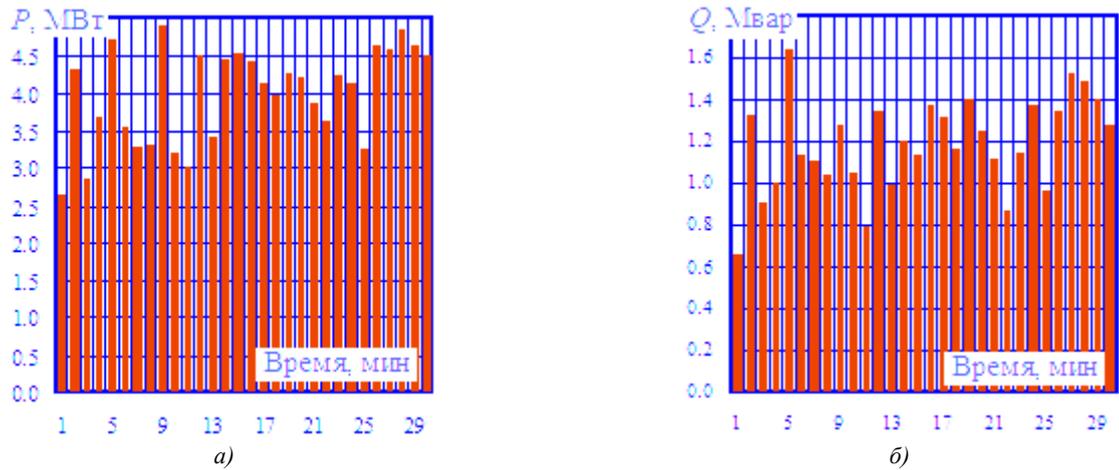


Рис. 4. Фрагменты графиков активной (а) и реактивной (б) нагрузок фазы А районной обмотки 6 кВ ТП 1

Таблица 1. Статистические характеристики графиков нагрузки

ТП	Показатель	А		В		С	
		$P$ , МВт	$Q$ , Мвар	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар
ТП 1	Минимум	1,82	0,53	1,75	0,48	1,95	0,60
	Среднее значение	4,05	1,20	3,91	1,20	3,92	1,38
	Максимум	5,92	1,94	5,72	1,82	5,84	2,37
	Размах	4,10	1,41	3,97	1,34	3,89	1,77
	СКО	0,81	0,28	0,74	0,26	0,65	0,27
ТП 2	Минимум	1,91	0,61	1,49	0,45	1,91	0,56
	Среднее значение	2,97	0,98	3,02	0,90	3,00	0,96
	Максимум	4,24	1,46	4,43	1,36	3,88	1,51
	Размах	2,33	0,85	2,94	0,92	1,96	0,95
	СКО	0,42	0,19	0,49	0,18	0,45	0,17
ТП 3	Минимум	2,71	0,84	3,03	0,87	2,76	0,76
	Среднее значение	4,16	1,36	4,08	1,47	4,15	1,30
	Максимум	5,42	1,85	5,32	2,09	5,58	1,73
	Размах	2,71	1,01	2,29	1,23	2,82	0,97
	СКО	0,55	0,22	0,43	0,25	0,52	0,22

Примечание. СКО — среднеквадратическое отклонение

Таблица 2. Статистические характеристики графиков нагрузки

ТП	А		В		С	
	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар
ТП 1	4	1,5	4	1,5	4	1,5
ТП 2	3	2	3	2	3	2
ТП 3	4	2	4	2	4	2

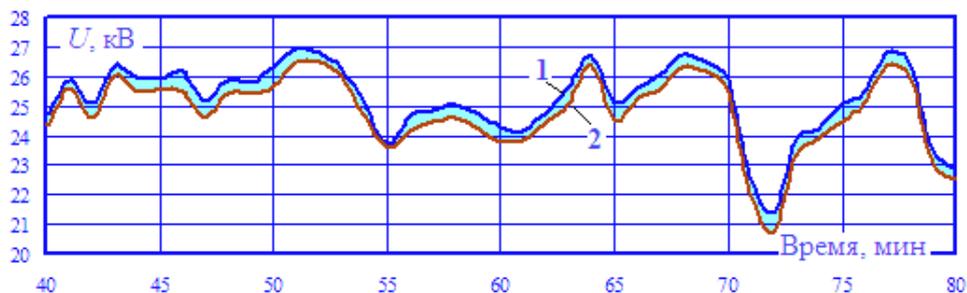
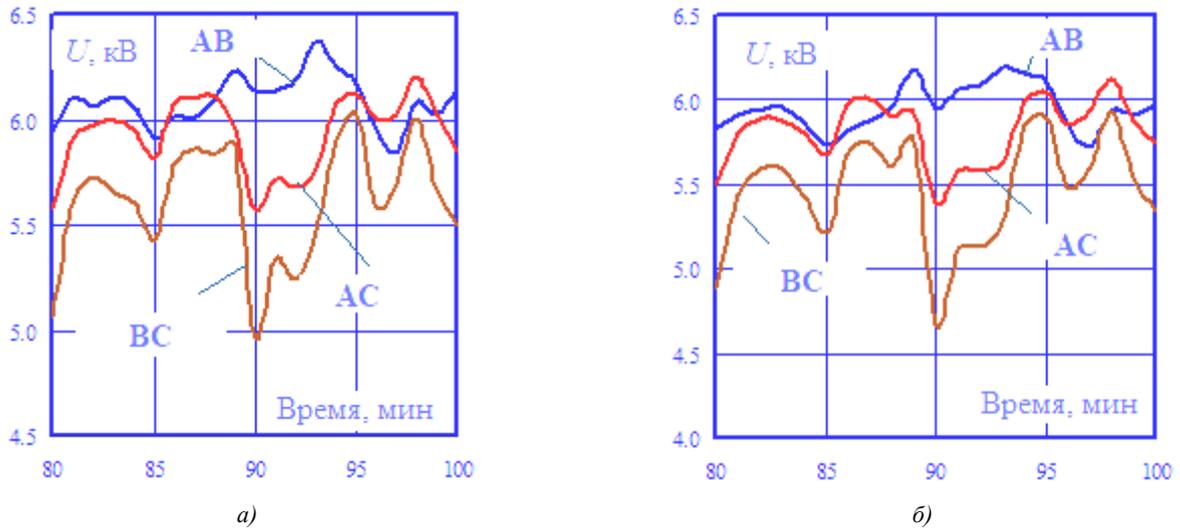
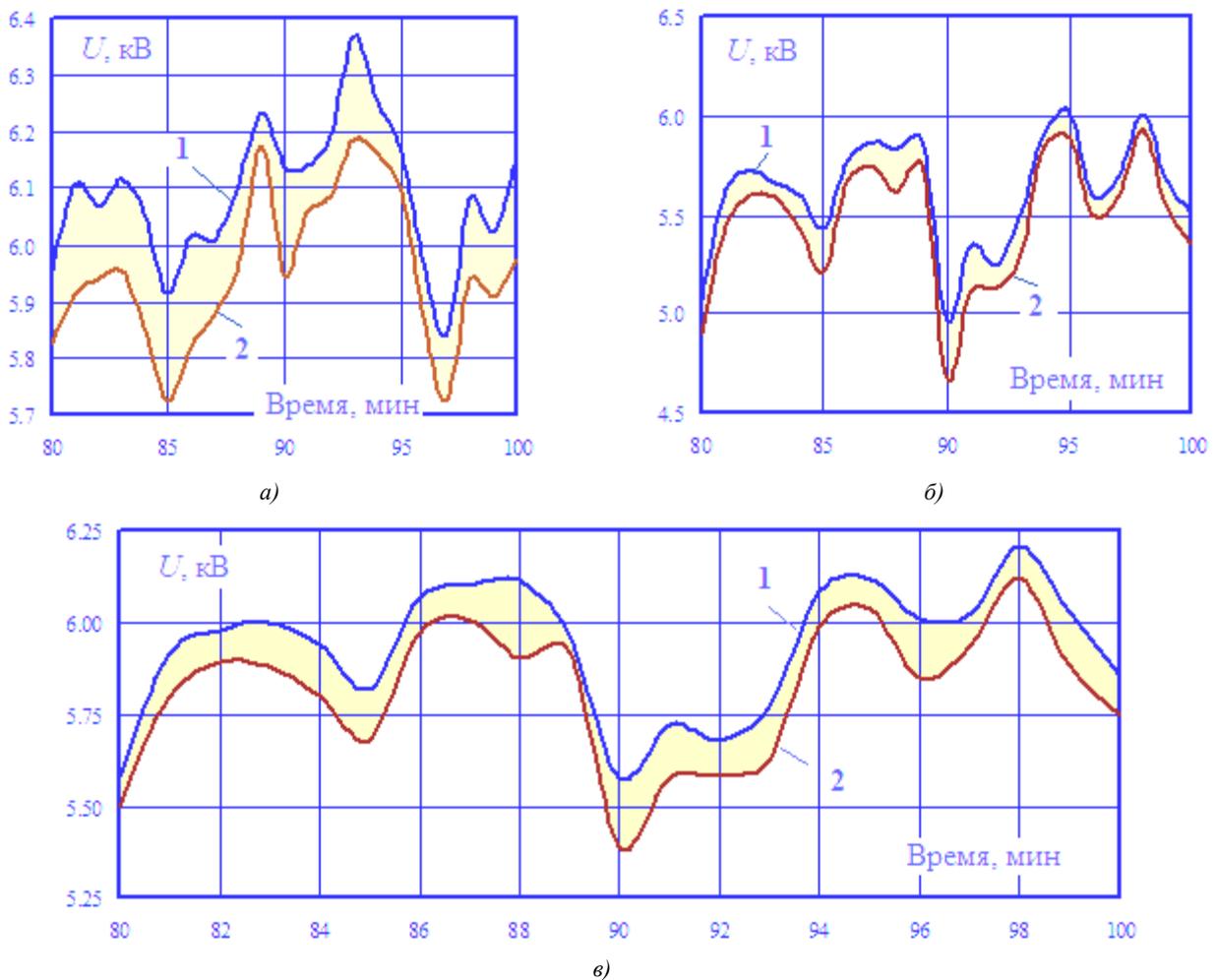


Рис. 5. Изменение напряжения на токоприемнике первого поезда: 1 — вариация стационарных нагрузок учитывается; 2 — стационарные нагрузки стабильны



**Рис. 6.** Изменение линейных напряжений на шинах 6 кВ ТП 3: *а* — вариации нагрузок учитываются; *б* — нагрузки приняты стабильными



**Рис. 7.** Совмещенные графики напряжений: *а* — линейное напряжение между фазами А и В; *б* — то же для В и С; *в* — то же для А и С; *1* — вариация стационарных нагрузок учитывается; *2* — стационарные нагрузки стабильны

На рис. 8 приведены графики, характеризующие уровни несимметрии на шинах 220 кВ ТП 3, наиболее удаленной от источника питания. На основе представленных результатов можно сделать вывод о том, что максимумы коэффициентов  $k_{2U}$  в обоих вариантах мо-

делирования превышают предельно допустимое значение 4 %. На рис. 9 показаны графики вариации перетока  $P$  активной мощности и потерь  $\Delta P$  в головной ЛЭП 220 кВ. Средние значения  $P$  практически равны в обоих вариантах моделирования. Для  $\Delta P$  этот показатель

при учете вариаций нагрузок уменьшается на 6 %. На рис. 10 проиллюстрирована динамика изменений токов

головной ЛЭП. На рис. 11 показаны совмещенные графики токов фазы А для двух вариантов расчета.

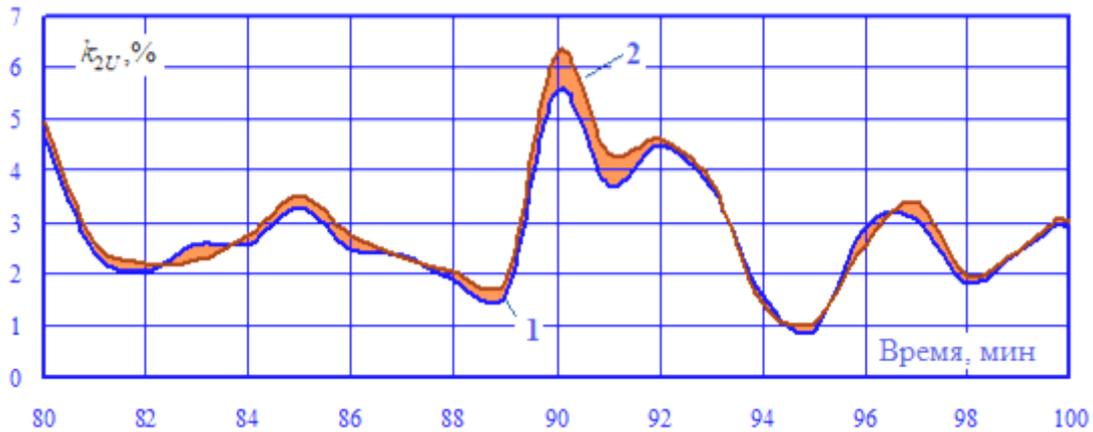


Рис. 8. Изменение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП 3: 1 — вариации нагрузок учитываются; 2 — нагрузки приняты стабильными

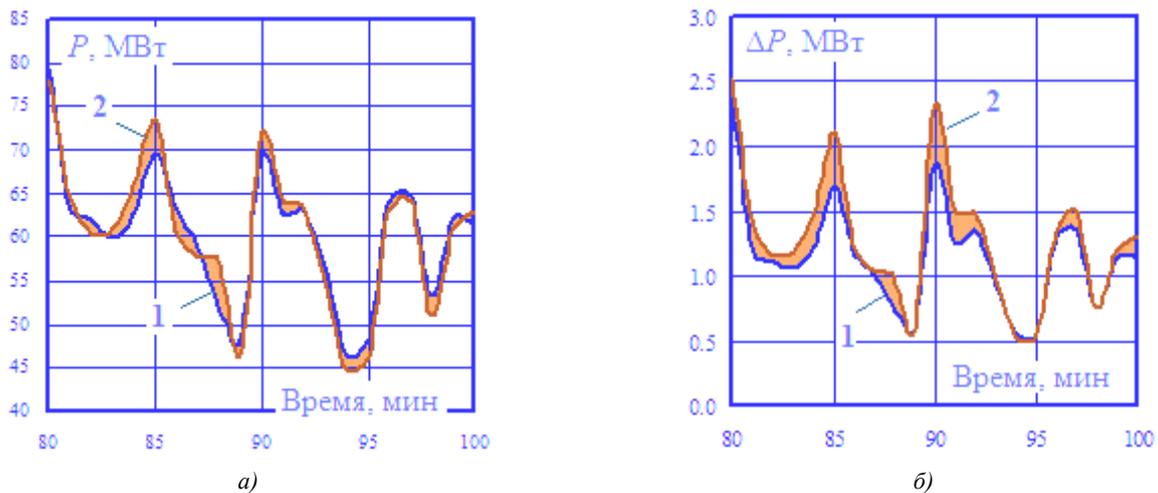


Рис. 9. Перетоки мощности (а) и потери (б) в головной ЛЭП: 1 — вариации нагрузок учитываются; 2 — нагрузки приняты стабильными

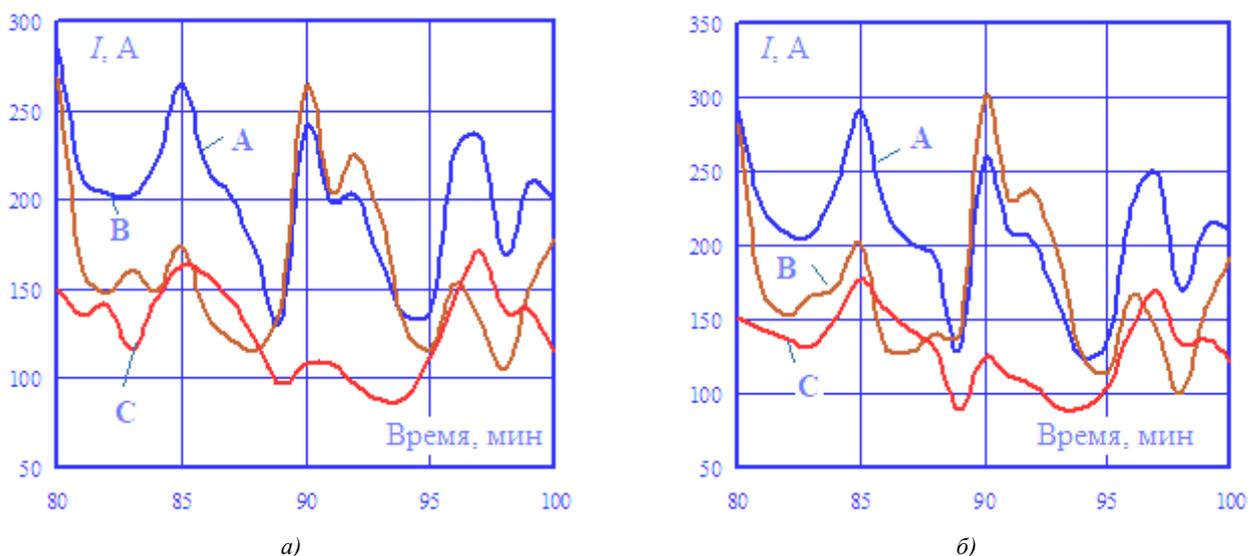
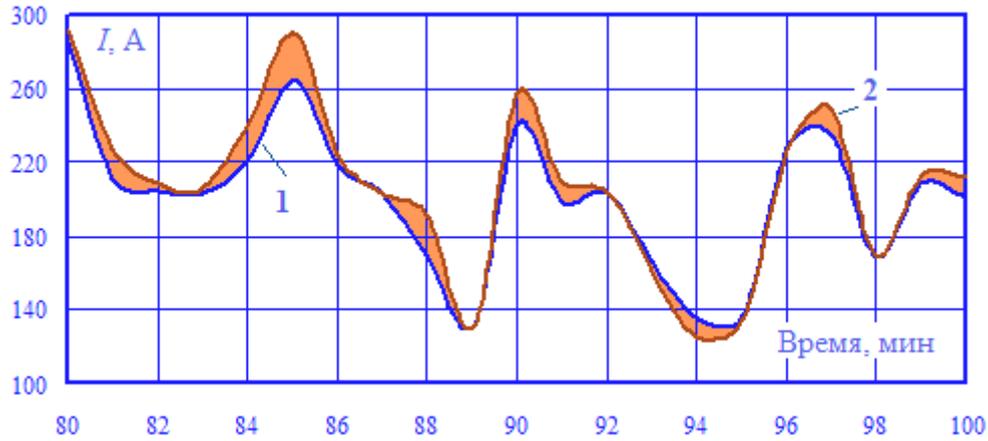


Рис. 10. Токи головной ЛЭП: а — вариации нагрузок учитываются; б — нагрузки приняты стабильными

При учете вариаций стационарных нагрузок максимумы токов равны: 286 А для фазы А; 268 А для фазы В; 170 А для фазы С. Аналогичные параметры при ста-

бильных нагрузках выше на 2...11 %: 291 А для фазы А; 300 А для фазы В; 177 А для фазы С.



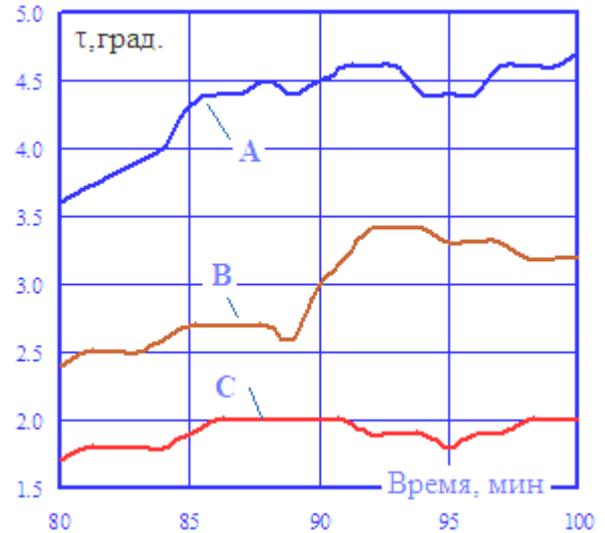
**Рис. 11.** Совмещенные графики токов фазы А для двух вариантов расчета: 1 — вариации нагрузок учитываются; 2 — нагрузки приняты стабильными

На рис. 12 показаны графики, отвечающие вариациям  $\tau$  превышений температур проводов головной ЛЭП

над температурой окружающей среды. Кривые  $\tau$  фазы А для двух вариантов расчета представлены на рис. 13.

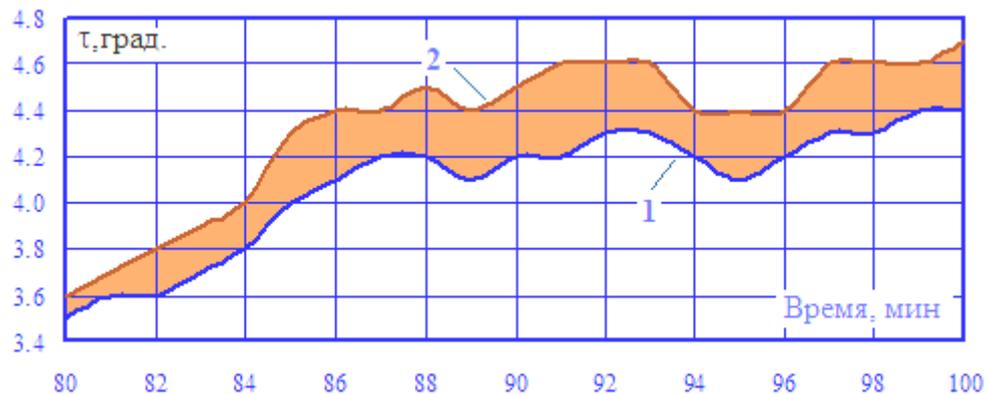


а)



б)

**Рис. 12.** Превышения температур проводов головной ЛЭП над температурой окружающей среды: а — вариации нагрузок учитываются; б — нагрузки приняты стабильными;  $\tau = \vartheta - \vartheta_0$  — разность температур  $\vartheta$  провода и окружающей среды  $\vartheta_0$

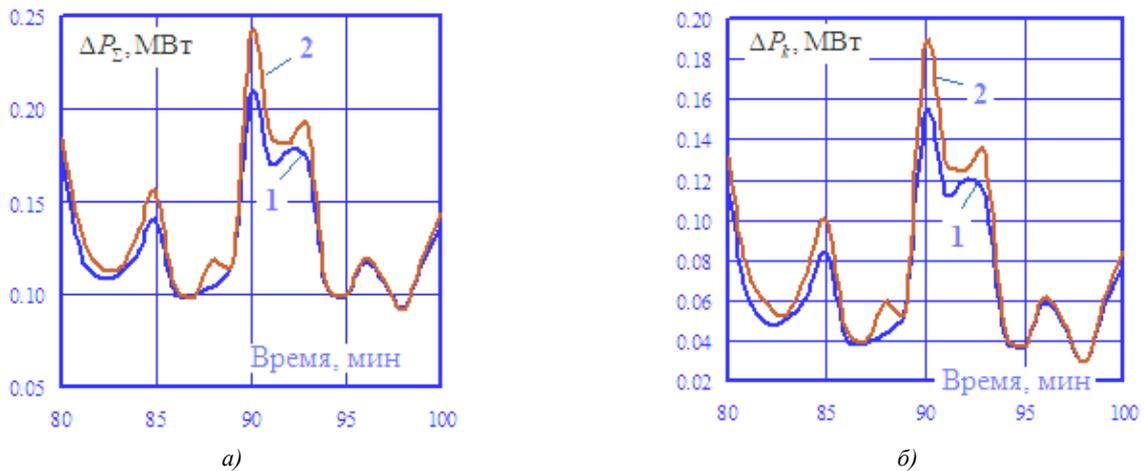


**Рис. 13.** Совмещенные графики превышений температур для фазы А при двух вариантах расчета: 1 — вариации нагрузок учитываются; 2 — нагрузки приняты стабильными

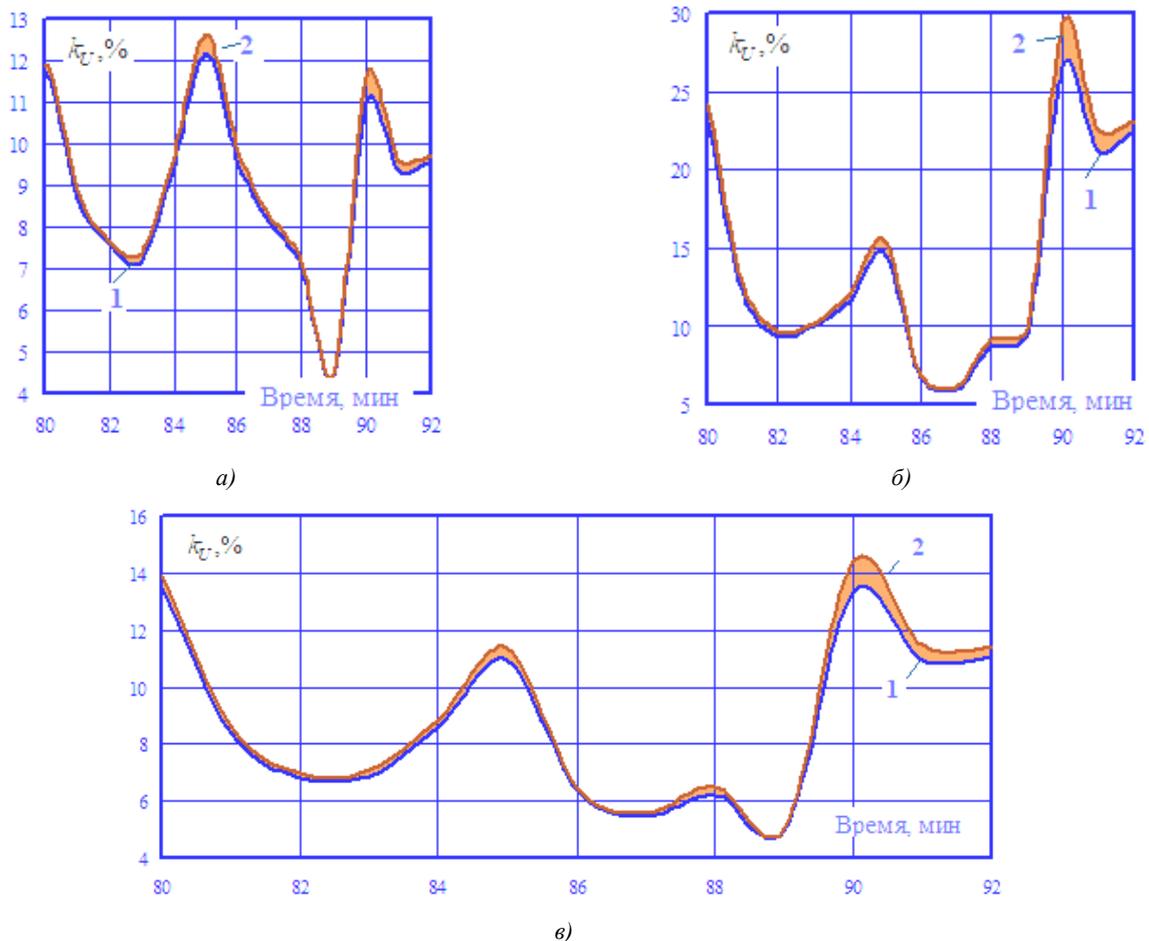
При учете вариаций стационарных нагрузок максимумы  $\tau$  равны: 4,4 град. для фазы А; 3 град. для фазы В; 2 град. для фазы С. Аналогичные параметры при стабильных нагрузках для фазы С не изменяются, а для фаз А и В заметно выше — 4, 7 и 3,4 град. соответственно.

На рис. 14 проиллюстрирована динамика изменения потерь активной мощности в трансформаторе ТП 3.

При учете вариаций нагрузки максимум суммарных потерь равен 210 кВт, а аналогичный показатель для потерь КЗ достигает 150 кВт. При постоянных нагрузках суммарные потери повышаются до 240 кВт, а потери КЗ до 190 кВт. На рис. 15 представлены графики коэффициентов гармоник



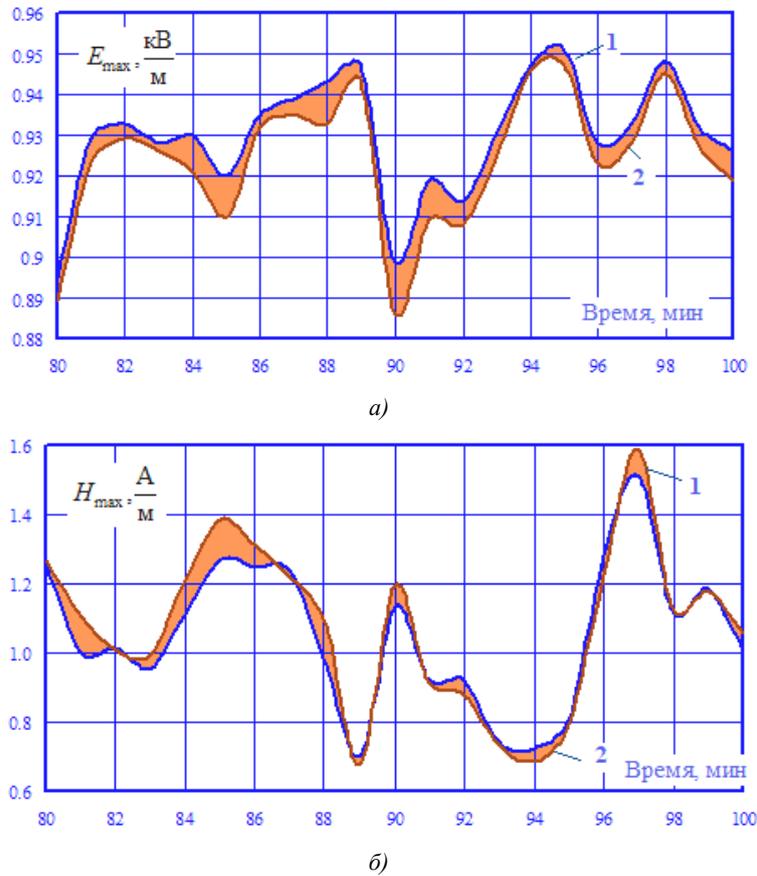
**Рис. 14.** Потери в трансформаторе ТП 3: *а* — суммарные; *б* — короткого замыкания: *1* — вариации нагрузок учитываются; *2* — нагрузки приняты стабильными



**Рис. 15.** Суммарные коэффициенты гармоник: *а* — линейное напряжение АВ; *б* — то же ВС; *в* — то же АС; *1* — вариация стационарных нагрузок учитывается; *2* — стационарные нагрузки стабильны

Анализ результатов моделирования несинусоидальных режимов позволяет сделать вывод о том, что при стабильных нагрузках максимумы коэффициентов  $k_U$  увеличиваются на 4...11 %, а средние значения возрастают на 2...3 %.

На рис. 16 приведены временные зависимости напряженностей электрического и магнитного полей (ЭМП), создаваемых на отправном конце ЛЭП, соединяющей первую и вторую ТП.



**Рис. 16.** Амплитуды напряженностей ЭМП: *а* — электрическое поле; *б* — магнитное поле; *1* — вариация стационарных нагрузок учитывается; *2* — стационарные нагрузки стабильны

Анализ результатов определения ЭМП позволяет сделать вывод о том, что учет динамики районных нагрузок не приводит к существенным изменениям напряженностей. Максимумы амплитуд напряженностей электрического поля возрастают на 1 %, а аналогичные показатели для магнитного поля снижаются на 5 %. При наличии значительных нагрузок в сети 220 кВ неучет их динамики может привести к более заметным погрешностям.

**Закключение.** Разработаны методы и средства для учета динамики изменений нагрузок стационарных потребителей при моделировании систем электроснабжения железных дорог. При реализации цифровых моделей использовались технологии определения режимов СЭЖД в фазных координатах и программный продукт *Fazonord*, версия 5.3.2.9-2024. Моделирование на основной частоте и частотах высших гармоник проведено в двух вариантах, при стабильных и изменяющихся во времени нагрузках стационарных потребителей

электроэнергии. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что для адекватного моделирования режимов СЭЖД требуется корректный учет их вариаций. Такой подход будет наиболее востребован при реализации киберфизических СЭЖД, основанных на масштабной интеграции вычислительных ресурсов в процессы передачи, преобразования и потребления электроэнергии. Предложенная технология моделирования может использоваться на практике при определении режимов и нагрузочной способности СЭЖД, а также при разработке мероприятий по улучшению показателей качества электроэнергии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».*

#### Литература

1. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid). Иркутск: ИрГУПС, 2019. 414 с.

2. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе: материалы Всерос. науч.-практической конф. (12 апр. 2019 г.). М., 2020. С. 105-111.

3. Агунов А.В., Соколов Д.А. Компьютерное моделирование и анализ работы устройств автоматики систем электроснабжения железных дорог // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. 2018. Т. 15, № 1. С. 136-140.
4. Соколов Д.А., Агунов А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения в Matlab-Simulink // Eltrans 10.0 (Элтранс-2019): десятый междунар. симпозиум (9-11 окт. 2019 г.). СПб., 2023. С. 346-349.
5. Баранов И.А., Агунов А.В. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения с помощью Matlab-Simulink // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 2 (26). С. 5-12.
6. Агунов А.В., Марикин А.Н., Соколов Д.А. Компьютерное моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 5. С. 38-40.
7. Рудашевский Р.А. Анализ методов моделирования целевых параметров системы тягового электроснабжения железных дорог при пропуске поездов повышенной массы и постановка задач исследования // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: материалы I Междунар. науч.-практической конф. (Щербинка, 26-27 авг. 2021 г.). М., 2023. С. 240-245.
8. Григорьев Н.П., Клыков М.С., Парфианович А.П. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ // Электротехника. 2016. № 2. С. 58-61.
9. Шевлюгин М.В., Щегловитова Е.В. Имитационная модель системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока для оценки качества электроэнергии на вводах подстанций // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 1. С. 89-92.
10. Костин А.П., Пинчуков П.С. Анализ программного обеспечения для моделирования аварийных режимов в системе тягового электроснабжения // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 2. С. 23-28.
11. Бочарников Ю.В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами // Технологии электромагнитной совместимости. 2008. № 1 (24). С. 45-55.
12. Гаранин М.А., Блинкова С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2023. № 2 (90). С. 85-90.
13. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Моделирование режимов системы тягового электроснабжения с оценкой эффективности работы защиты // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 2 (31). С. 58-64.
14. Гаранин М.А., Бошкарева Т.В., Фроленков С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуски поездов повышенной массы // Вестн. транспорта Поволжья. 2016. № 5 (59). С. 22-27.
15. Босый Д.А., Косарев Е.Н. Усовершенствование имитационных средств моделирования систем тягового электроснабжения // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники - достижения и перспективы: тр. Всерос. науч.-практической конф. (19-20 нояб. 2015 г.). Хабаровск, 2015. С. 64-70.
16. Комяков А.А., Шкулов А.И., Бартель Л.А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения // Изв. Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 16-29.
17. Комяков А.А., Незевак В.Л., Орлов А.А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 2×25 кВ в среде MULTISIM // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы междунар. науч.-практической конф. (11-12 дек. 2014 г.). Омск, 2014. С. 140-146.
18. Косарев А.Б., Рудашевский Р.А., Рудашевская А.В. Определение пропускной способности и моделирование режимов работы систем тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 21-26.
19. Константинова Ю.А., Ли В.Н., Константинов А.М. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока // Вестн. Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4 (37). С. 70-76.
20. Тарута П.В. К вопросу имитационного моделирования системы тягового электроснабжения при исследовании проблемы повышения эффективности использования энергии рекуперации // Совершенствование устройств подвижного состава, электроснабжения, автоматики и связи железнодорожного транспорта: сб. науч. ст. Омск, 2004. С. 41-45.
21. Незевак В.Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 4 (68). С. 159-170.
22. Жуков А.В. Математическое моделирование системы тягового электроснабжения // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практической конф. (18-21 апр. 2017 г.). Ростов н/Д., 2017. С. 115-119.
23. Петрушин Д.А. Моделирование режимов работы системы тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2010. № 1 (37). С. 114-118.
24. Терлецкий С.Г., Мамаев А.Р. Этапы имитационного моделирования системы тягового электроснабжения // Научные достижения и открытия 2020: сб. тр. конф. (25 янв. 2020 г.). Пенза, 2020. С. 46-51.
25. Шатохин А. Оценка эффективности использования энергии рекуперации путем имитационного моделирования системы тягового электроснабжения в среде MATLAB // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. (6 февр. 2015 г.). Омск, 2015. С. 406-412.
26. Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 2020. Publisher: IEEE.
27. Chunjing Lu, Xinran Li, Shulin Chen. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021. Publisher: IEEE.
28. Hongjun Yang, Xiong Du, Bin Chen, Yuelong Cao, Lianqing Zheng, Heng Wang. The Influence of Electrified Railway Traction Power Supply System on the Power Quality of Regional Power Grid. 2023 IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE), 2023. Publisher: IEEE.
29. Nianwen Xiang, Qiankun Yuan, Chaoqun Wang. Study on the adaptability of traction power supply system under the operation of high density heavy haul train. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2023. Publisher: IEEE.
30. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
31. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
32. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Кибберфизические системы электроснабжения: моделирование, управление, идентификация. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. 158 с.
33. Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K., Lombardi Pio, Komarnicki Przemyslaw. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021). Advances in Engineering Research.
34. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Асташин С.М. Учет изменений нагрузок нетранспортных потребителей при моделировании систем тягового электроснабжения // Вестн. ИрГТУ. 2008. № 1. С. 99-104.

## References

- Arsent'ev G.O., Bulatov YU.N., Kryukov A.V. Control of modes of railway power supply systems based on smart grid technologies. Irkutsk: IrGUPS, 2019. 414 p.
- Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12 apr. 2019 g.). M., 2020. P. 105-111.
- Agunov A.V., Sokolov D.A. Computer modeling and analysis of the operation of automation devices for power supply systems of railways // Proceedings of Petersburg Transport University. 2018. V. 15, № 1. P. 136-140.
- Sokolov D.A., Agunov A.V. Modeling of traction power supply systems in Matlab-Simulink // Eltrans 10.0 (Eltrans-2019): desyatyy mezhdunar. simpozium (9-11 okt. 2019 g.). SPb., 2023. P. 346-349.
- Baranov I.A., Agunov A.V. Modeling of reactive power compensation processes in a traction power supply system using Matlab-Simulink // Intellectual Technologies on Transport. 2021. № 2 (26). P. 5-12.
- Agunov A.V., Marikin A.N., Sokolov D.A. Computer modeling of an alternating current traction power supply system // Electronics and electrical equipment of transport (EET). 2019. № 5. P. 38-40.
- Rudashevskij R.A. Analysis of methods for modeling target parameters of the railway traction power supply system when passing heavy trains and setting research problems // Nauka 1520 VNIIZHT: Zaglyani za gorizont: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakticheskaya konf. (SHCHerbinka, 26-27 avg. 2021 g.). M., 2023. P. 240-245.
- Grigor'ev N.P., Klykov M.S., Parfianovich A.P. Increasing the energy efficiency of the 25 kV AC traction power supply system // Elektrotehnika. 2016. № 2. P. 58-61.
- SHevlyugin M.V., SHCHeglovitova E.V. Simulation model of the AC traction power supply system for railways to assess the quality of electricity at substation inputs // Energy Safety and Energy Economy (Energobezопасnost' i Energoberezhenie). 2023. № 1. P. 89-92.
- Kostin A.P., Pinchukov P.S. Analysis of software for modeling emergency modes in the traction power supply system // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2023. V. 2. P. 23-28.
- Bocharnikov YU.V. Modeling of a traction power supply system for assessing electromagnetic compatibility with adjacent systems // Technology of electromagnetic compatibility. 2008. № 1 (24). P. 45-55.
- Garanin M.A., Blinkova S.A. Modeling of a traction power supply system using energy storage devices // Vestnik RGUPS. 2023. № 2 (90). P. 85-90.
- Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Modeling of traction power supply system modes with assessment of protection efficiency // Pacific Rim countries transportation system. 2022. № 2 (31). P. 58-64.
- Garanin M.A., Boshkareva T.V., Frolenkov S.A. Modeling of an alternating current traction power supply system for passing heavy trains // Vestn. transporta Povolzh'ya. 2016. № 5 (59). P. 22-27.
- Bosyj D.A., Kosarev E.N. Improvement of simulation tools for modeling traction power supply systems: tr. Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (19-20 noyab. 2015 g.). Habarovsk, 2015. P. 64-70.
- Komyakov A.A., SHkulov A.I., Bartel' L.A. Simulation modeling of dynamic processes in the traction power supply system // Journal of Transsib Railway Studies. 2023. № 2 (54). P. 16-29.
- Komyakov A.A., Nezevak V.L., Orlov A.A. Modeling of a 2x25 kV AC traction power supply system in the MULTISIM environment // Povyshenie energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (11-12 dek. 2014 g.). Omsk, 2014. P. 140-146.
- Kosarev A.B., Rudashevskij R.A., Rudashevskaya A.V. Determination of throughput and modeling of operating modes of traction power supply systems // Science and Education. 2021. № 2. P. 21-26.
- Konstantinova YU.A., Li V.N., Konstantinov A.M. Simulation modeling of electricity transit from an external power supply system via an AC traction network // Sholom-Aleichem Priamursky state university bulletin. 2019. № 4 (37). P. 70-76.
- Taruta P.V. On the issue of simulation modeling of the traction power supply system when studying the problem of increasing the efficiency of using recovery energy // Sovershenstvovanie ustrojstv podvizhnogo sostava, elektrosnabzheniya, avtomatiki i svyazi zheleznodorozhnogo transporta: sb. nauch. st. Omsk, 2004. P. 41-45.
- Nezevak V.L. Modeling of load modes on the buses of sectioning posts when working in the traction power supply system of electricity storage devices // Vestnik RGUPS. 2017. № 4 (68). P. 159-170.
- ZHukov A.V. Mathematical modeling of the traction power supply system // Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (18-21 apr. 2017 g.). Rostov n/D., 2017. P. 115-119.
- Petrushin D.A. Modeling of operating modes of a traction power supply system with an inertial energy storage device // Vestnik RGUPS. 2010. № 1 (37). P. 114-118.
- Terleckij S.G., Mamaev A.R. Stages of simulation modeling of the traction power supply system // Nauchnye dostizheniya i otkrytiya 2020: sb. tr. konf. (25 yanv. 2020 g.). Penza, 2020. P. 46-51.
- SHatohin A. Assessing the efficiency of using recovery energy by simulating a traction power supply system in MATLAB // Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauch. konf. (6 fevr. 2015 g.). Omsk, 2015. P. 406-412.
- Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 2020. Publisher: IEEE.
- Chunjing Lu, Xinran Li, Shulin Chen. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021. Publisher: IEEE.
- Hongjun Yang, Xiong Du, Bin Chen, Yuelong Cao, Lianqing Zheng, Heng Wang. The Influence of Electrified Railway Traction Power Supply System on the Power Quality of Regional Power Grid. 2023 IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE), 2023. Publisher: IEEE.
- Nianwen Xiang, Qiankun Yuan, Chaoqun Wang. Study on the adaptability of traction power supply system under the operation of high density heavy haul train. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2023. Publisher: IEEE.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. M.: Direkt-Media, 2023. 156 p.
- Bulatov YU.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Cyberphysical power supply systems: modeling, control, identification. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2022. 158 p.
- Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K., Lombardi Pio, Komarnicki Przemyslaw. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021). Advances in Engineering Research.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Astashin S.M. Accounting for changes in loads of non-transport consumers when modeling traction power supply systems // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2008. № 1. P. 99-104.