

А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ \*

**Аннотация.** Рассмотрена концепция киберфизических систем (КФС) электроснабжения. Показано, что ядро виртуального сегмента КФС должны образовывать цифровые модели для расчета нормальных и аварийных режимов, нагрева токоведущих частей и тяговых трансформаторов (ТТ), определения показателей качества электроэнергии по отклонениям напряжений, уровням несимметрии и гармонических искажений. Предложена комплексная методика, позволяющая реализовать бесшовные компьютерные технологии, обеспечивающие определение электрических и тепловых режимов ТТ.

На основе цифрового моделирования показано, что методы и алгоритмы моделирования, разработанные в ИрГУПСе, позволяют рассчитывать электрические и тепловые режимы тяговых трансформаторов. На этой основе могут быть реализованы компьютерные технологии информационно-вычислительного сегмента киберфизической системы тягового электроснабжения.

**Ключевые слова:** железные дороги, киберфизические системы тягового электроснабжения, режимы тяговых трансформаторов, моделирование.

**Для цитирования:** Крюков, А. В. Моделирование электрических и тепловых режимов тяговых трансформаторов / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 73–81. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_73.

### Введение

В состав систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) входят два сегмента: физический и информационный. Первый включает силовые элементы, за счет которых осуществляется поступление электрической энергии к подвижному составу и стационарным объектам. Второй – образует совокупность измерительных комплексов и сетей, центров обработки данных, оснащенных программным обеспечением, использующим интеллектуальные алгоритмы. В последние годы значимость информационно-вычислительного сегмента непрерывно возрастает, поэтому СЭЖД начинают приобретать свойства киберфизических систем [1–2], рис. 1. В среднесрочной перспективе можно прогнозировать появление СЭЖД киберфизического типа (КФТ), базирующихся на масштабной интеграции вычислительных ресурсов в энергетические процессы. Укрупненная структура такой СЭЖД показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура киберфизической СЭЖД

\* Работа выполнена по программе государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

При формировании киберфизических систем для любой предметной области предполагается применение интеллектуальных информационных технологий. Однако в ядре конкретной КФС должны использоваться специализированные методы и цифровые модели, обеспечивающие решение прикладных технических задач. Применительно к СЭЖД КФТ к таким задачам можно отнести:

- определение режимов питающей и тяговой сети (ТС);
- расчеты токов короткого замыкания и уставок релейной защиты;
- вычисление показателей качества электроэнергии (ПКЭ);
- планирование процессов плавки гололеда;
- определение температур нагрева проводов и трансформаторов.

Для их решения можно использовать методы, предложенные в [9, 10]. Они базируются на применении фазных координат, реализованы на единой базе данных и обеспечивают бесшовную интеграцию алгоритмов, направленных на решение конкретных задач.

Тяговые трансформаторы (ТТ) можно отнести к разряду наиболее важных элементов СЭЖД, от эффективного функционирования которых зависит надежность энергообеспечения процессов перевозок. Вопросы моделирования ТТ рассмотрены в [3–8]. В статье [3] показано, что задача увеличения срока службы изоляции ТТ может быть решена при реконструкции тяговых подстанций (ТП). Алгоритм вычисления потерь мощности в стали ТТ представлен в [4]. Актуальные направления диагностики ТТ проанализированы в [5]. Метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния ТТ предложен в [6]. Вопросы компьютерного моделирования процессов нагревания ТТ рассмотрены в [7]. Нагрузочной способности ТТ посвящена статья [8].

Для создания СЭЖД КФТ необходима комплексная методика, позволяющая реализовать компьютерные технологии, обеспечивающие моделирование электрических и тепловых режимов ТТ. Ниже представлены результаты использования методов, описанных в [9, 10], для моделирования тяговых трансформаторов при пропуске поездов повышенной массы.

### Результаты моделирования

Для количественной оценки загрузки ТТ проведено определение режимов системы электропитания, включающей три тяговых подстанции (ТП). Расчеты выполнялись с помощью комплекса программ Fazonord версии 5.3.4.5-2024 [9, 10]. Укрупненная схема СЭЖД рассматриваемого участка показана на рис. 2. Моделирование проведено в трех вариантах: при пропуске поездов массой в 6000, 9000 и 12 000 т (рис. 3, 4).

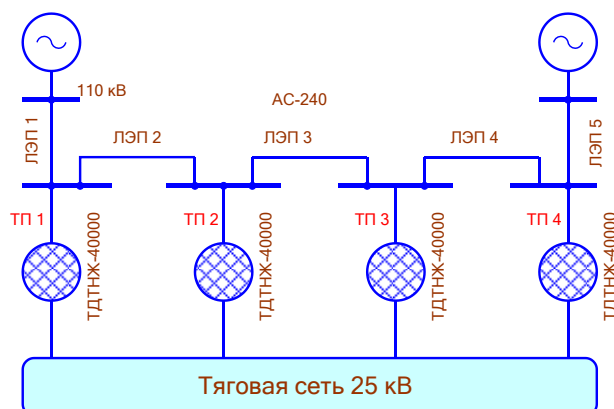


Рис. 2. Укрупненная схема СЭЖД рассматриваемого участка

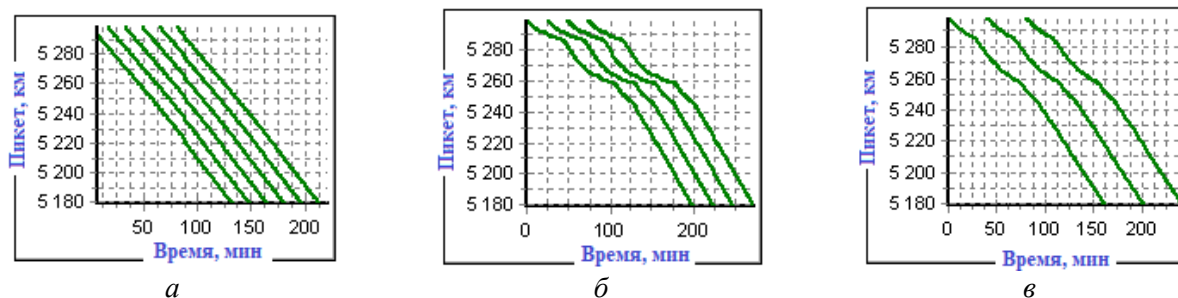
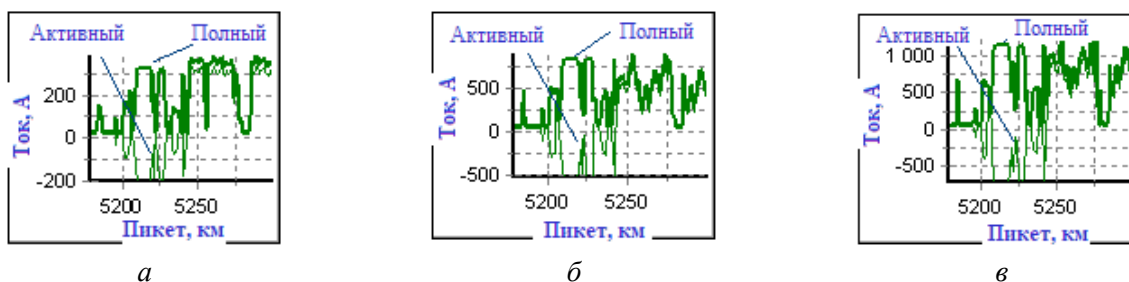


Рис. 3. Графики движения: а – поезда массой 6000 т; б – 9000 т; в – 12 000 т



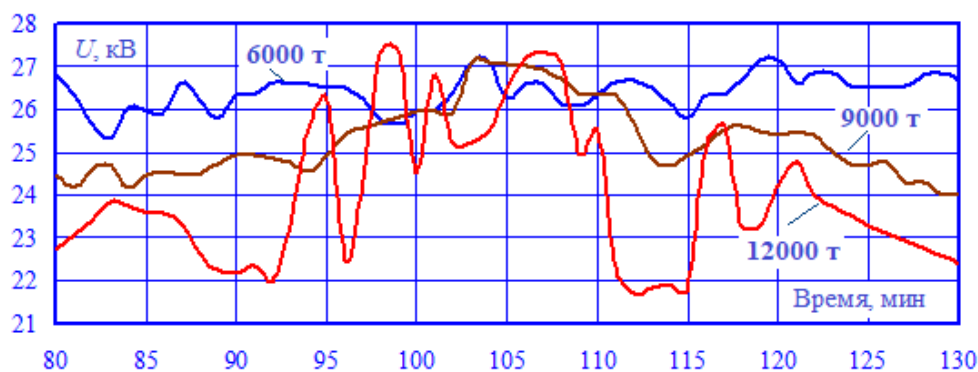
**Рис. 4. Зависимости токов поездов от пикетов:**  
 а – поезд массой 6000 т; б – 9000 т; в – 12 000 т

В состав моделируемой СЭЖД входили следующие элементы: воздушные линии 110 кВ, выполненные проводами АС-240, тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000/110, контактные подвески МФ-100 + ПБСМ-95, рельсы Р 50. Число включенных ТТ на ТП определено на этапе настройки моделей и указано в таблице.

Результаты моделирования представлены на рис. 5–11.

#### Число включенных трансформаторов на ТП

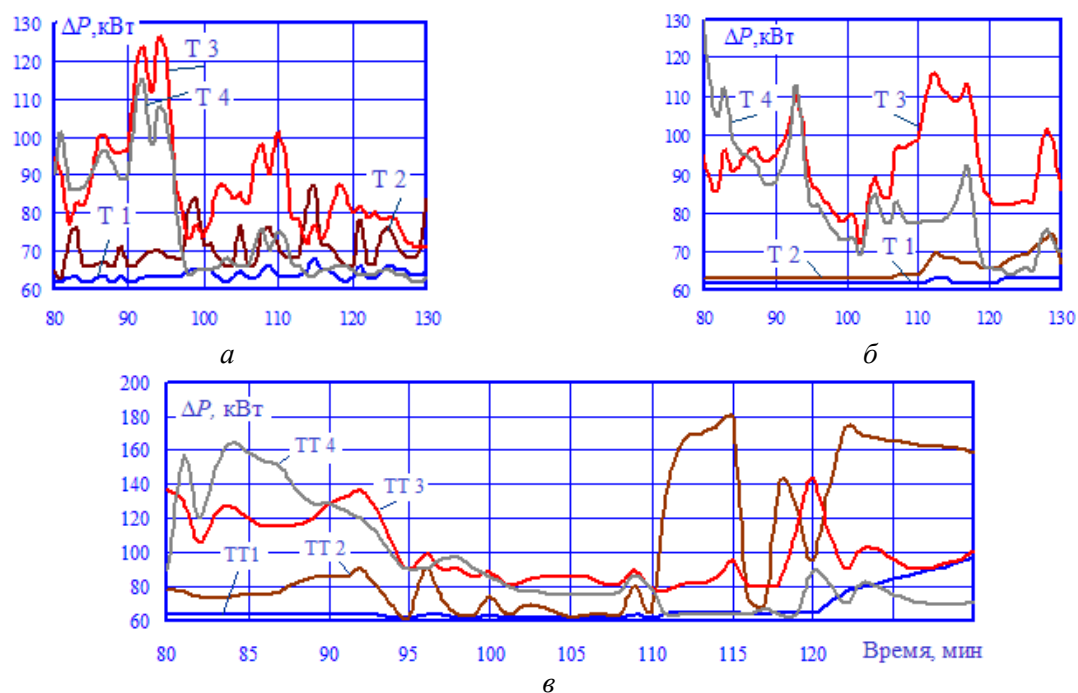
Масса поезда, т	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4
6000	1	1	1	1
9000	1	1	2	2
12 000	1	1	2	2



**Рис. 5. Напряжения на пантографах электровозов**

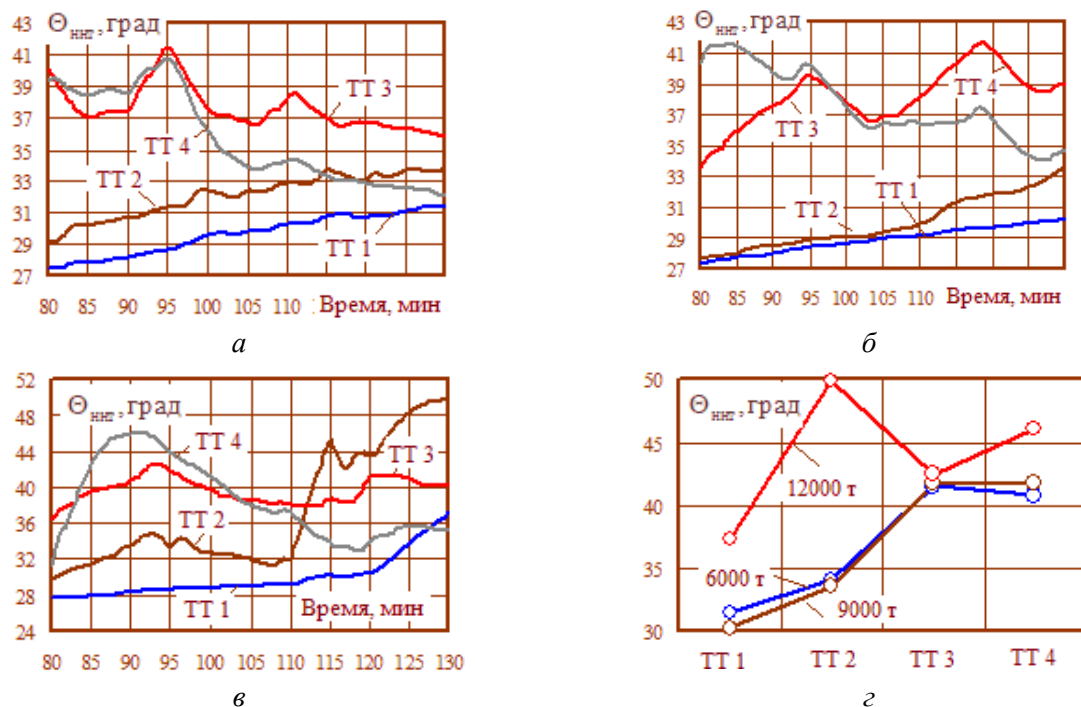
На рис. 5 показаны зависимости  $U = U(t)$  напряжений на токоприемниках электровозов от времени при пропуске поездов массой 6000, 9000 и 12 000 т. Из них видно, что величины  $U$  лежат в допустимом диапазоне 21–29 кВ. Наибольшие снижения напряжений наблюдаются при движении трех поездов массой 12 000 т. Графики потерь активной мощности в ТТ  $\Delta P = \Delta P(t)$  приведены на рис. 6. Они показывают, что суммарные  $\Delta P$  в ТТ не превосходят номинального уровня для трансформаторов мощностью 40 000 кВ·А. Наибольшие уровни  $\Delta P$  имеют место при пропуске поездов массой в 12 000 т.

В ПК Fazonord имеется возможность определения токов отдельных катушек трансформаторов, что позволяет проводить одновременные расчеты температур  $\Theta_{\text{ННТ}}$  наиболее нагретой точки (ННТ) и старения изоляции обмоток. В связи с быстрыми вариациями тяговой нагрузки, длительности изменения которой сопоставимы с постоянной времени нагрева обмотки, при вычислениях учитываются тепловые инерции масла и обмоток. В двухобмоточном ТТ обмотки нагреваются примерно одинаково. В трехобмоточном ТТ в наиболее нагруженном режиме находится первичная обмотка, и при определении  $\Theta_{\text{ННТ}}$  и износа изоляции следует контролировать ее токи.



**Рис. 6. Потери мощности в тяговых трансформаторах:**  
*a* – поезда массой 6000 т; *б* – 9000 т; *в* – 12 000 т

На рис. 7 представлены результаты расчета температур ННТ.



**Рис. 7. Температуры наиболее нагретой точки:**  
*a* – поезда массой 6000 т; *б* – поезда массой 9000 т; *в* – поезда массой 12 000 т;  
*з* – максимальные значения  $\Theta_{\text{ННТ}}$

Зависимости, показанные на рис. 7, построены на основании следующего алгоритма расчета. Максимальная температура ННТ в установившемся режиме определялась так:

$$\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{охл}} + \vartheta_{\text{м}}(K) + \vartheta_{\text{ННТ,м}}(K^{1,6}),$$

где  $K = I/I_{\text{НОМ}}$ ;  $I$  – ток нагрузки;  $I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток;  $\Theta_{\text{охл}}$  – температура охлаждающей среды;  $\Theta_{\text{м}}(K)$  – превышение температуры верхних слоев масла;  $\Theta_{\text{ННТ.М}}(K^{1,6})$  – разность температур ННТ обмотки и масла.

Абсолютная температура ННТ обмотки в режиме нагрева за интервал времени имитационного моделирования  $\Delta t$  рассчитывается по формулам ГОСТ 14209-85 при учете малости  $\Delta t$  по сравнению с тепловыми постоянными трансформатора.

Для ситуации с несимметричной загрузкой ТТ целесообразно разделить нагревы фазы обмотки и верхних слоев масла:

$$\Theta_{\text{м.уст}} = \Theta_{\text{м.НОМ}} \left[ \frac{1 + K_{\text{м}}^2 d}{1 + d} \right]^x; \quad \Theta_{\text{ННТ.М.уст}} = \Theta_{\text{ННТ.М}} K_{\text{макс}}^{1,6},$$

где  $K_{\text{м}} = I_{\text{эфф}} / I_{\text{НОМ}}$ ;  $I_{\text{эфф}}$  – эффективный ток;  $K_{\text{макс}} = I_{\text{ф.макс}} / I_{\text{НОМ}}$ ,  $I_{\text{ф.макс}}$  – ток наиболее загруженной фазы. Величина  $I_{\text{эфф}}$  рассчитывается так:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}}{3}.$$

По рис. 7 могут быть сформулированы следующие выводы:

- наибольшие температуры ННТ имеют место при пропуске поездов массой 12 000 т; при этом потери в ТТ 2 достигают 180 кВт (рис. 6, в);
- зависимости  $\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ}}(t)$  для отдельных трансформаторов и масс составов существенно различаются; зависимости  $\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ}}(t)$  для ТТ 1 и 2 при движении поездов массой 6000 и 9000 т имеют монотонно возрастающий характер; аналогичный вид имеет график для ТТ 1 для поездов весом в 12 000 т; остальные зависимости отличаются колебательным характером изменения  $\Theta_{\text{ННТ}}$ ;
- максимальные значения  $\Theta_{\text{ННТ}}$  не достигают предельной допустимой величины в 98 °С.

На рис. 8–11 приведены зависимости коэффициентов  $K = I/I_{\text{НОМ}}$  по токам фаз обмотки 110 кВ. Данные показатели наиболее адекватно отражают реальную загрузку ТТ в несимметричных режимах.

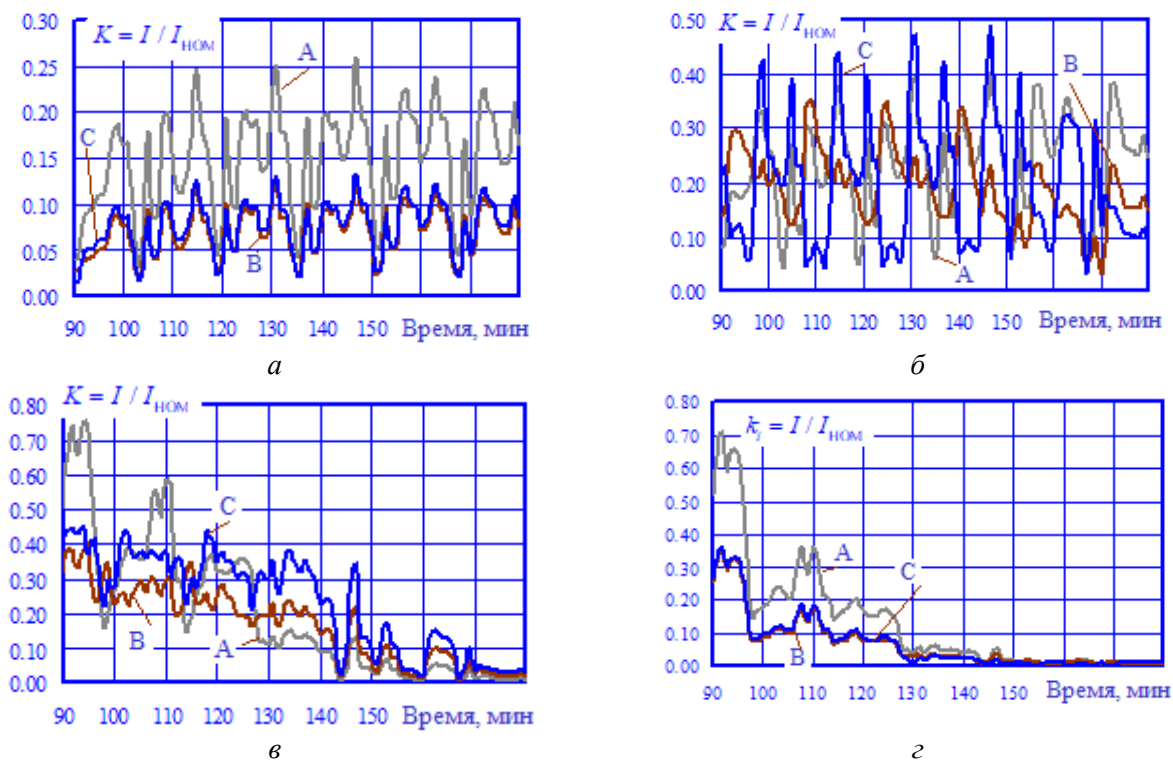


Рис. 8. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 6000 т:  
а – ТТ 1; б – ТТ 2; в – ТТ 3; г – ТТ 4

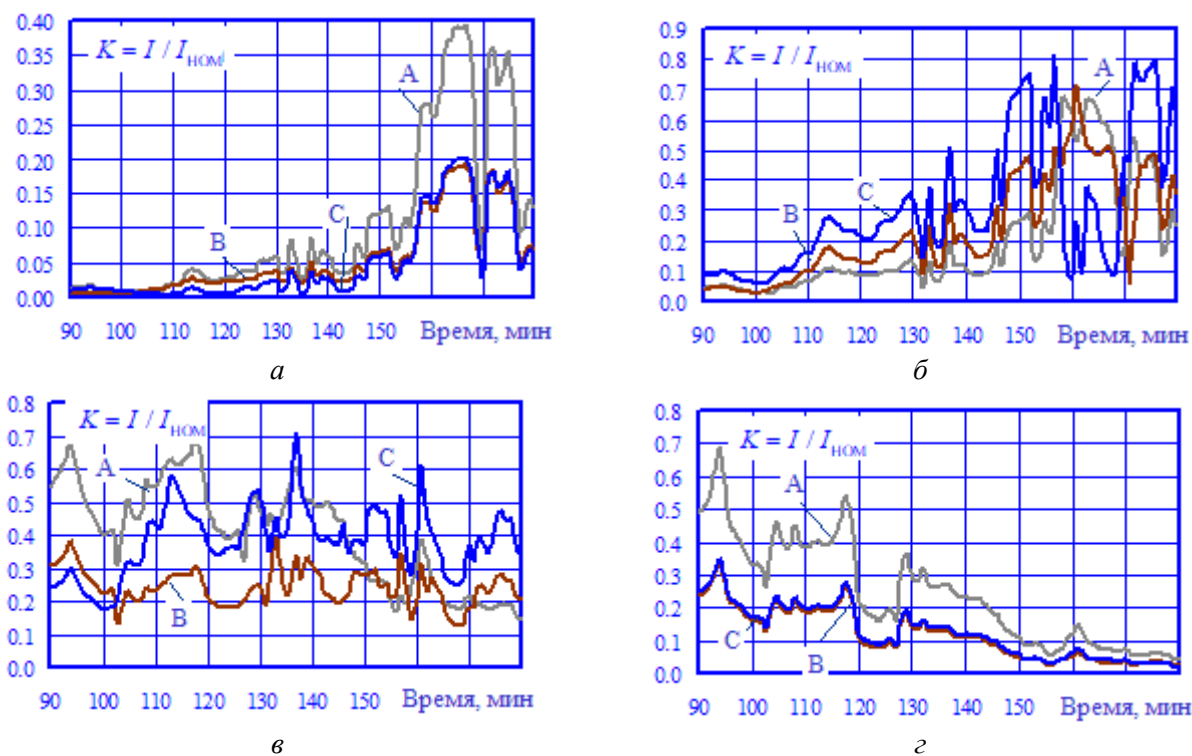


Рис. 9. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 9000 т:  
*а* – ТТ 1; *б* – ТТ 2; *в* – ТТ 3; *г* – ТТ 4

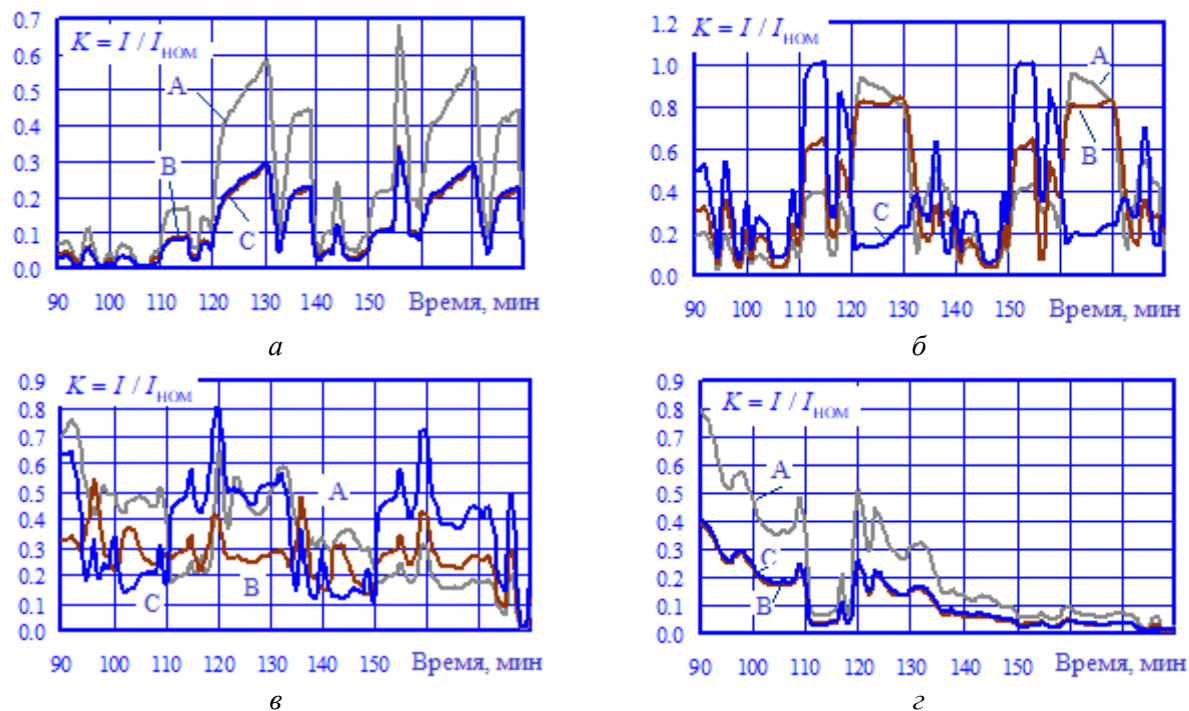


Рис. 10. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 12 000 т:  
*а* – ТТ 1; *б* – ТТ 2; *в* – ТТ 3; *г* – ТТ 4

Представленные результаты показывают, что в рассмотренном примере перегрузки ТТ не наблюдается. Однако величина  $K$  для трансформаторов ТП 2 достигает 100 % при движении составов массой 12 000 т. При пропуске тяжелых поездов в 9000 и 12 000 т и отключении вторых трансформаторов на ТП 3 и 4 наблюдается недопустимая перегрузка ТТ.

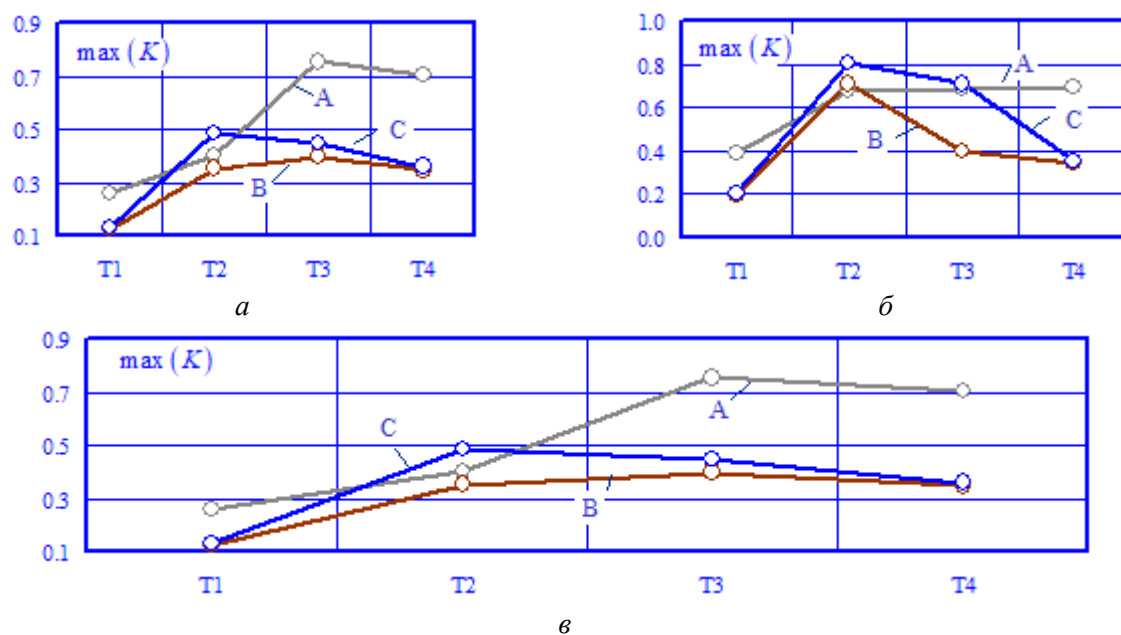


Рис. 11. Максимумы коэффициентов загрузки по токам фаз:

*a* – поезда массой 6000 т; *б* – поезда массой 9000 т; *в* – поезда массой 12 000 т

#### Заключение

На основе цифрового моделирования показано, что методы и алгоритмы моделирования СЭЖД, разработанные в ИрГУПСе, позволяют определять электрические и тепловые режимы тяговых трансформаторов. На этой основе могут быть реализованы компьютерные технологии информационной части киберфизических систем тягового электроснабжения.

#### Список литературы

- 1 Современные технологии. Киберфизические системы : учебное пособие / авторы-составители : Е. И. Громаков, А. А. Сидорова ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 166 с.
- 2 A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. / Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, Pio Lombardi, Przemyslaw Komarnicki // 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. – 2022. – Vol. 213. – P. 116–125. – DOI 10.2991/aer.k.220308.019.
- 3 Григорьев, Н. П. Повышение срока службы изоляции обмоток силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, А. П. Парфианович // Электротехника. – № 2. – 2016. – С. 45–48. – EDN VKSLIL.
- 4 Григорьев, Н. П. Расчет потерь мощности в стали силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока / Н. П. Григорьев,

#### References

- 1 Modern technologies. Cyberphysical systems: textbook / authors & compilers: E. I. Gromakov, A. A. Sidorova ; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2021. – 166 p.
- 2 A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. / Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, Pio Lombardi, Przemyslaw Komarnicki // 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. – 2022. – Vol. 213. – P. 116–125. – DOI 10.2991/aer.k.220308.019.
- 3 Grigoriev, N. P. Increasing the service life of insulation of power transformer windings during the reconstruction of 25 kV AC traction substations / N. P. Grigoriev, A. V. Voprikov, A. P. Parfianovich // Electrical engineering. – No. 2. – 2016. – P. 45–48. – EDN VKSLIL.
- 4 Grigoriev, N. P. Calculation of power losses in the steel of power transformers of AC traction substations / N. P. Grigoriev, A. F. Titov, P. N. Trofimovich // Transport infrastructure of the Siberian region. –

А. Ф. Титов, П. Н. Трофимович // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск, 2018. – Т. 1. – С. 664–667. – EDN XSHZDF.

5 Диагностика состояния тяговых трансформаторов : актуальные направления / В. С. Бурдин, Н. Д. Родионов, П. С. Пинчуков [и др.] // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2022. – № 18. – С. 3–6. – EDN IGSXGM.

6 **Доманский, В. В.** Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_264.

7 **Мусурмонов, Р. Б. У.** Компьютерное моделирование тепловых процессов в тяговых трансформаторах / Р. Б. У. Мусурмонов // Молодежь в науке : Новые аргументы. Международный молодежный сборник научных статей. – Липецк, 2018. – С. 33–36. – EDN UVZJWA.

8 **Тряпкин, Е. Ю.** Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов системы тягового электроснабжения переменного тока / Е. Ю. Тряпкин // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XIV Краевого конкурса молодых ученых и аспирантов : в 2 т. – Хабаровск, 2012. – С. 179–182. – EDN FFAKWH.

9 **Закарюкин, В. П.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Издательство Иркутского университета, 2005. – 273 с.

10 **Закарюкин, В. П.** Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат : монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Москва : Директ-Медиа, 2023. – 198 с. – ISBN 978-5-4499-3848-0.

Irkutsk, 2018. – Vol. 1. – P. 664–667. – EDN XSHZDF.

5 Diagnostics of the state of traction transformers : current directions / V. S. Burdin, N. D. Rodionov, P. S. Pinchukov [et al.] // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. – 2022. – No. 18. – P. 3–6. – EDN IGSXGM.

6 **Domansky, V. V.** Information technologies and a method for calculating the risk of failure during the drift of the technical condition of a traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobscheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_264.

7 **Musurmonov, R. B. U.** Computer modeling of thermal processes in traction transformers / R. B. U. Musurmonov // Youth in science : New arguments. International youth collection of scientific articles. – Lipetsk, 2018. – P. 33–36. – EDN UVZJWA.

8 **Tryapkin, E. Yu.** Load capacity of power oil transformers of the alternating current traction power supply system / E. Yu. Tryapkin // Young scientists – to Khabarovsk region : materials of the XIV Regional competition of young scientists and graduate students : in 2 volumes. – Khabarovsk, 2012. – P. 179–182. – EDN FFAKWH.

9 **Zakaryukin, V. P.** Complex asymmetric modes of electrical systems / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov // Irkutsk : Irkutsk University Publishing House, 2005. – 273 p.

10 **Zakaryukin, V. P.** Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates monograph / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov // Moscow : Direct-Media, 2023. – 198 p. – ISBN 978-5-4499-3848-0.

*A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov*

## MODELING OF ELECTRICAL AND THERMAL MODES OF TRACTION TRANSFORMERS

**Abstract.** The paper considers the concept of cyber-physical power supply systems. It is shown that the core of the virtual segment of such a system should form digital models for calculating normal and emergency modes, heating of current-carrying parts and traction transformers, determining power quality indicators based on voltage deviations, levels of asymmetry and harmonic distortion. A comprehensive methodology is proposed that makes it possible to implement seamless computer technologies that provide determination of electrical and thermal conditions of traction transformers. Based on digital modeling, it is shown that the modeling methods and algorithms developed at the Irkutsk State Transport University allow one to calculate the electrical and thermal conditions of traction transformers. On this basis, computer technologies of the information and computing segment of the cyber-physical traction power supply system can be implemented.

**Keywords:** railways, cyber-physical systems of traction power supply, modes of traction transformers, modeling.

**For citation:** Kryukov, A. V. Modeling of electrical and thermal modes of traction transformers / A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 73–81. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_73.

#### Сведения об авторах

**Крюков Андрей Васильевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),  
кафедра «Электроэнергетика транспорта».

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),  
кафедра «Электроснабжение и электротехника»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Черепанов Александр Валерьевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),  
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: smart\_grid@mail.ru

**Крюков Александр Егорович**

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),  
кафедра «Электрические станции»,  
аспирант,  
e-mail: appleforevor@mail.ru

#### Information about the authors

**Kryukov Andrey Vasilievich**

Irkutsk State Transport University (ISTU),  
Chair «Electric Power Engineering of Transport».

Irkutsk National Research Technical University (INRTU),  
Chair «Electrical Supply and Electrical Engineering»,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Cherepanov Aleksander Valerievich**

Irkutsk State Transport University (ISTU),  
Chair «Electric Power Engineering of Transport»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: smart\_grid@mail.ru

**Kryukov Alexander Egorovich**

Irkutsk National Research Technical University (INRTU),  
Chair «Electric Power Plants»,  
Postgraduate,  
e-mail: appleforevor@mail.ru