

А. В. Крюков^{1,2}, П. А. Сапожник²

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

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВОВ ПРОВОДОВ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Для предотвращения тепловых перегрузок тяговых сетей при планировании их режимов требуется определение температур токоведущих частей, таких как контактные провода и несущие тросы. Наиболее полная информация о температурных режимах токоведущих частей может быть получена на основе определения динамики изменения температуры. В современных условиях, характеризующихся масштабным внедрением средств цифровизации, для получения такой информации должны применяться компьютерные технологии. В статье представлены результаты разработки цифровых моделей тяговых сетей, обеспечивающих моделирование и анализ температурных режимов. Моделирование проведено в программном комплексе Fazonord для системы электроснабжения, включающей три тяговых подстанции и две межподстанционные зоны контактной сети 25 кВ. Питающая сеть электроэнергетической системы включала четыре линии электропередачи 220 кВ. Моделировалось движение семи поездов массами 6300 т с в нечетном направлении и такого же числа поездов массой 6000 т – в четном. Предлагаемые модели могут применяться на практике при планировании режимов систем тягового электроснабжения и определении их нагрузочной способности.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, нагревы проводов контактных подвесок, моделирование.

A. V Kryukov^{1,2}, P. A. Sapozhnik²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

SIMULATION OF RAILWAY TRACTION NETWORK WIRE HEATING DYNAMICS

Annotation. To prevent heat overloads of traction networks when planning their modes, it is necessary to determine the temperatures of current-carrying parts, such as contact wires and load-bearing cables. The most complete information on the temperature conditions of the current-carrying parts can be obtained based on the determination of the temperature change dynamics. In modern conditions, characterized by the large-scale introduction of digitalization tools, computer technologies must be used to obtain such information. The article presents the results of the development of digital models of traction networks, which provide modeling and analysis of temperature conditions. Simulation was carried out in the Fazonord software complex for the power supply system, which includes three traction substations and two inter-substation zones of the 25 kV contact network. The power grid of the electric power system included four 220 kV transmission lines. The movement of seven trains with masses of 6300 tons in the odd direction and the same number of trains weighing 6000 tons in the even direction was simulated. The proposed models can be applied in practice when planning modes of traction power supply systems and determining their load capacity.

Keywords: traction power supply systems, heating of contact suspension wires, modeling.

Введение. Одной из целей имитационного моделирования систем тягового электроснабжения (СТЭ) является определение температур токоведущих частей для анализа тепловых перегрузок. Решению задач расчета нагревов проводов ЛЭП и тяговых сетей посвящено значительное число работ. В статье [1] представлены важные уточнения к основам теории нагревания проводов воздушных линий электропередачи. В работе [2] сформулированы нормативные требования к высокоскоростным магистралям в части нагрева проводов контактной сети. Решение задачи теплового расчета контактной подвески постоянного тока с целью выявления мест локального перегрева приведено в статье [3]. Вопросы моделирования тепловых процессов в контактном проводе методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS 5.2 рассмотрены в работе

[4]. Совершенствованию математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока посвящена статья [5]. Алгоритм решения задачи расчета распределения тока и температуры в контактной подвеске на основе метода конечных элементов представлен в работе [6]. Методика оценки термического разупрочнения контактного провода описана в статье [7]. Контроль нагрева проводов контактной подвески посвящена работа [8]. Решение задачи определения числа перегревов контактных проводов, приводящих к понижению прочности до минимально допустимого значения приведено в статье [9]. Результаты расчета динамических процессов нагрева проводов воздушных линий электропередач на основе квадратичной модели теплообмена представлены в работе [10]. Анализ динамических тепловых характеристик воздушных ЛЭП в условиях вынужденной конвекции с учетом нелинейности процессов теплообмена посвящена статья [11]. Тепловому расчету защищенного провода ЛЭП посвящена работа [12]. Решение задачи определения распределения тока и температуры в проводах ЛЭП с помощью анализа электромагнитного поля приведено в статье [13].

Анализ представленных публикаций дает возможность сделать вывод о том, что вопросы определения нагревов токоведущих частей рассмотрены достаточно подробно, что создает методологический фундамент для дальнейшего развития и совершенствования методов моделирования тепловых режимов ЛЭП и тяговых сетей. Одно из направлений такого развития может базироваться на подходе, основанном на построении зависимостей температуры от времени. Для их получения могут применяться методы моделирования систем тягового электроснабжения (СТЭ) в фазных координатах, описанные в монографии [14]. В статье [15] приведены результаты моделирования динамики изменения температур в отдельных точках контактных подвесок. Ниже представлены результаты моделирования тепловых режимов СТЭ, проведенного в целях определения продольных профилей температур.

Методика моделирования. Решение задачи получения зависимости $\tau = \tau(t)$ может быть осуществлено на основе уравнение теплового баланса провода

$$I^2 R [1 + \alpha(\tau + \Delta\vartheta)] dt = GC_0 d\tau + Fk_T \tau dt, \quad (1)$$

где I , R , G , F – соответственно, ток (А), сопротивление (Ом) при температуре 20°C , масса (кг) и площадь поверхности (м^2) провода; α – температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$; $\Delta\vartheta = \vartheta_0 - 20^\circ$; ϑ_0 – температура окружающей среды; C_0 – удельная теплоемкость, Дж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$); k_T – коэффициент теплоотдачи, Вт/($\text{м}^2\cdot\text{K}$).

Теоретический анализ показывает, что отказ от учета линейного расширения провода не приведет к заметной погрешности. Тогда уравнение (1) можно записать так

$$I^2 \frac{\rho}{S} (1 + \alpha \Delta\vartheta) = S\gamma C_0 \frac{d\tau}{dt} + \left(\pi D k_T - I^2 \frac{\rho}{S} \alpha \right) \tau,$$

или

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{T_0} (1 - \alpha B) = A, \quad (2)$$

где ρ , S , γ , D – соответственно, удельное сопротивление (Ом $\cdot\text{м}$), сечение (м^2), плотность материала (кг/ м^3) и диаметр провода (м); $T_0 = \frac{S\gamma C_0}{\pi D k_T}$ – постоянная времени нагревания

при $\alpha=0$, с; $B = \frac{I^2 \rho}{S\pi D k_T}$; $A = \frac{I^2 \rho (1 + \alpha \Delta\vartheta)}{S^2 \gamma C_0}$.

При условии, что

$$I = \text{const}$$

решение уравнения (2) можно представить в виде

$$\tau(t) = \tau_0 e^{-\frac{t}{T_0}} + \tau_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right),$$

где τ_0 , $\tau_\infty = \frac{AT_0}{1-\alpha B}$ – соответственно, начальное и установившееся превышение температуры, °С.

Методика определения параметров T_0 и k_T , основанная на использовании допустимых значений превышений температуры и тока описана в работе [15].

Результаты моделирования. Описанный выше алгоритм определения нагревов токоведущих частей реализован в программном комплексе (ПК) Fazonord [14]. На основе этого ПК выполнены расчеты нагревов применительно к схеме СТЭ 25 кВ, включающей три тяговых подстанции (ТП). Фрагмент исходной схемы моделируемой сети приведен на рис. 1. Фрагмент схемы визуального отображения расчетной модели ПК Fazonord показан на рис. 2. В ее состав входили модели следующих элементов СТЭ и ЭЭС: трех тяговых трансформаторов и такого же числа линий электропередачи 220 кВ, а также двух межподстанционных зон (МПЗ). Расположение токоведущих частей тяговой сети показано на рис. 3. Первая МПЗ была разбита на пять участков, протяженность которых составляла 10 км. График движения поездов массой 6300 т в нечетном направлении и такого же числа поездов массой 6000 т в четном – показан на рис. 4. Зависимости токов поездов от пикета железной дороги представлены на рис. 5. Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7 и в табл. 1 и 2.

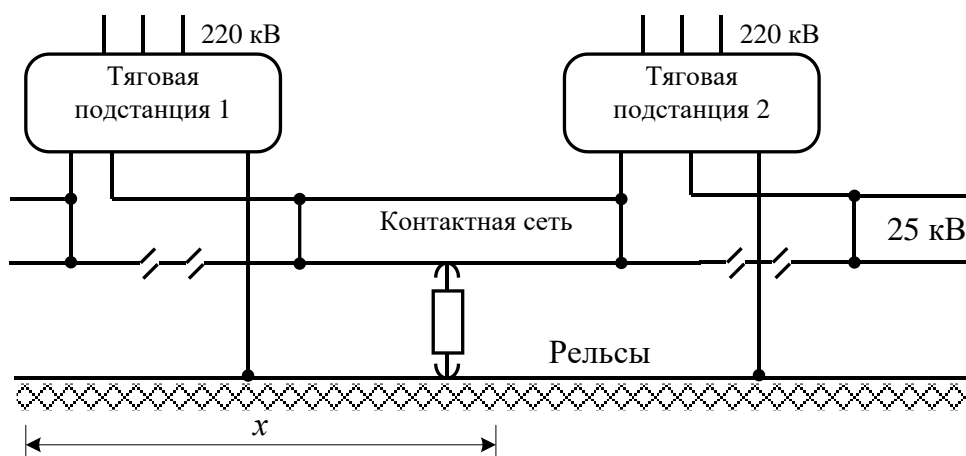


Рис. 1. Фрагмент схемы тяговой сети



Рис. 2. Фрагмент расчетной схемы

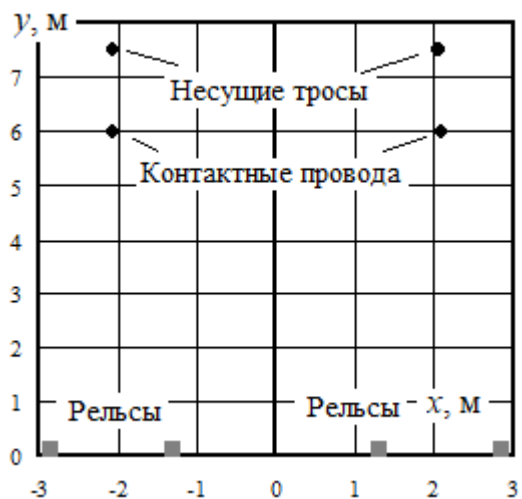


Рис. 3. Расположение токоведущих частей

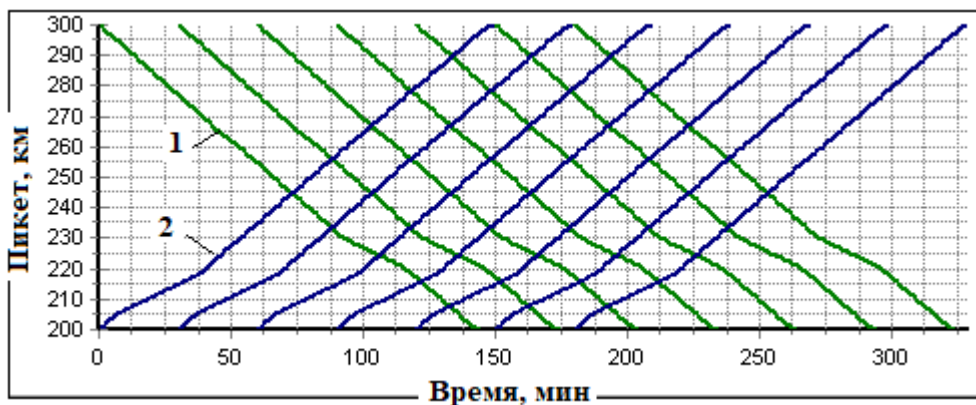
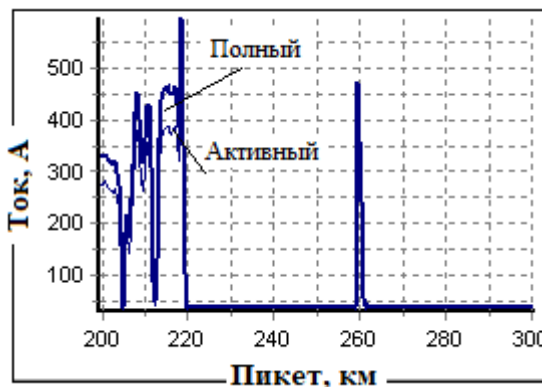


Рис. 4. График движения: 1 –нечетные поезда массой 6300 т; 2 –четные поезда массой 6000 т



а)



б)

Рис. 5. Зависимости токов поездов от пикета:

а– поезда нечетного направления; б – поезда четного направления

На рис. 6 а и б показаны графики, характеризующие зависимости температур контактных проводов (КП) и несущих тросов (НТ) от времени. На рис. 6 в, г приведены аналогичные графики для токов.

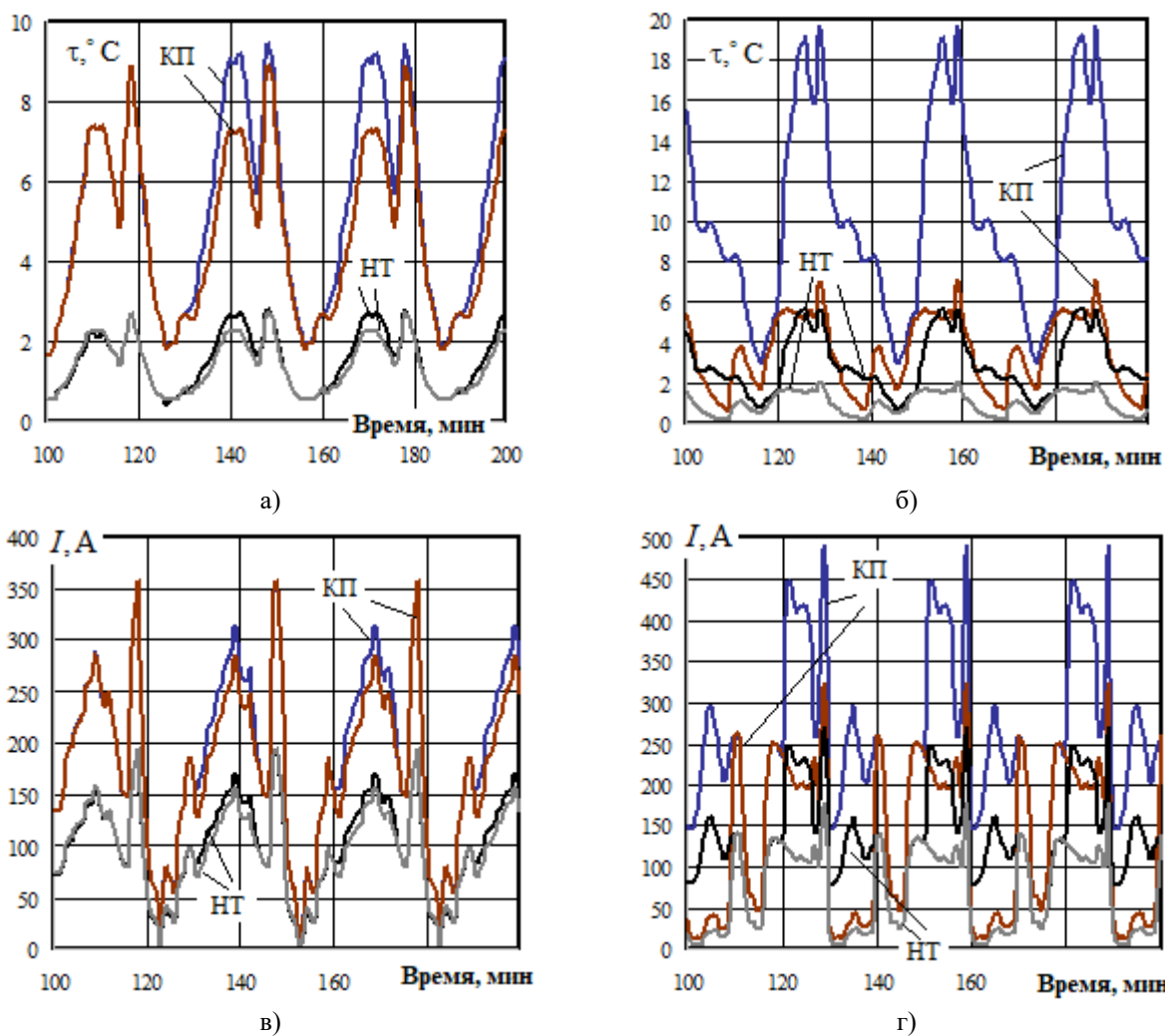
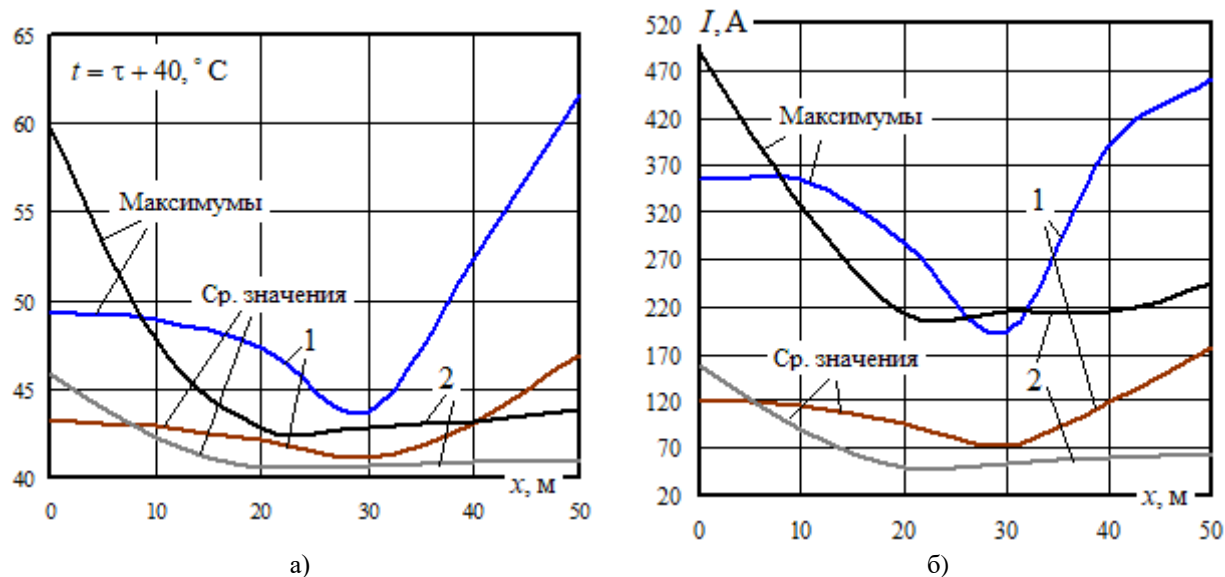
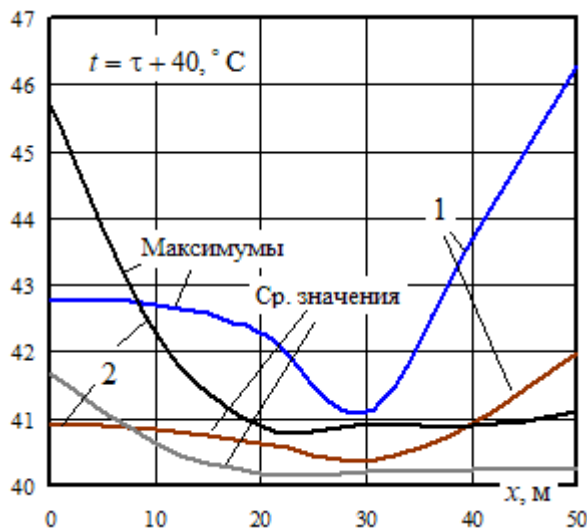


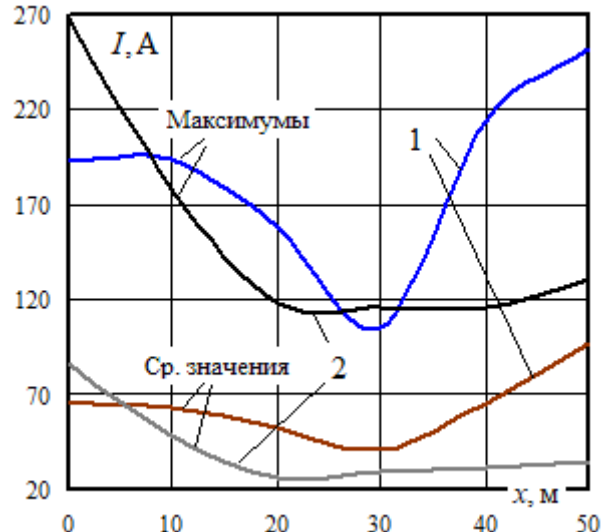
Рис. 6. Графики, характеризующие динамику изменений перегревов (а, в) и токов (б, г) проводов на участке 1: КП – контактный провод; НТ – несущий трос; а, б – путь нечетного направления; в, г – путь четного направления

На рис. 7 показаны графики, отвечающие зависимостям токов и температур проводов тяговой сети (ТС) от координаты x (рис. 1).





в)



г)

Рис. 7. Графики, характеризующие максимумы и средние значения температур (а, в) и токов (б, г) проводов: 1 – путь нечетного направления; 2 – путь четного направления

Таблица 1

Статистические характеристики токов проводов в начале первого участка ТС, А

Показатель	КП нечетного пути	НТ нечетного пути	КП четного пути	НП четного пути
Ср. значения	121,82	65,99	158,58	86,16
Максимум	354,99	192,69	490,09	267,71
Минимум	1,93	1,12	1,93	0,38
Размах	353,06	191,57	488,16	267,33

Таблица 1

Статистические характеристики температур в начале первого участка ТС, °С

Показатель	КП нечетного пути	НТ нечетного пути	КП четного пути	НП четного пути
Ср. значения	43,24	40,94	45,83	41,69
Максимум	49,40	42,80	59,70	45,70
Минимум	40,00	40,00	40,00	40,00
Размах	49,40	42,80	59,70	45,70

На основе результатов компьютерного моделирования можно сформулировать следующие выводы:

1. Тяговые нагрузки, создаваемые грузовыми поездами массами 6000 и 6300 т, вызывают существенные изменения токов, протекающих по токоведущим частям контактных подвесок (рис. 6, в и г). Максимумы токов по контактному проводу нечетного пути достигают 460 А, а по несущему тросу – 252 А. Аналогичные показатели для четного пути равны 490 и 268 А (рис. 7). Размахи колебаний токов контактных проводов на первом участке контактной сети лежат в диапазоне 353...488 А. Аналогичный диапазон для несущих тросов составляет 192...267 А.

2. Максимальные температуры нагрева контактного провода и несущего троса нечетного пути соответственно равны 62 и 46 °С. Аналогичные показатели для четного пути практически совпадают: 60 и 46 °С.

3. Зависимости температур КП и НТ обеих путей от координаты x (рис. 1) имеют одинаковый характер с максимальными значениями в точках, примыкающих к тяговым подстанциям, и минимумами вблизи точки с координатой x , равной 30 км.

Заключение. Представленная методика определения динамики нагревов проводов тяговых сетей железных дорог и реализованные на ее базе модели могут применяться на практике при планировании режимов систем тягового электроснабжения и определении их нагрузочной способности.

Методика распространяется на определение температур нагрева линий электропередачи любого конструктивного исполнения.

Исследования выполнены в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат» № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уточнения к основам теории нагревания проводов воздушных линий электропередачи / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. № 1. 2013. С. 36 – 40.
2. Саввов В. М. Нормативные требования, предъявляемые к ВСМ при скоростях 350 км/ч и выше. Создание детальной модели токораспределения и нагрева проводов контактной сети // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта. 2015. С. 325-330.
3. Паранин А. В., Батрашов А. Б. Тепловой расчет контактной подвески постоянного тока с целью выявления мест локального перегрева при тепловизионной диагностике // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта. Омск, 2018. С. 93-100.
4. Ковалев А. А., Паньч Д. С. Моделирование тепловых процессов в контактном проводе методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS 5.2 // Инновационный транспорт. № 3 (25). 2017. С. 49-52.
5. Батрашов А. Б., Паранин А. В., Шумаков К. Г. Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока // Транспорт Урала. № 1 (60). 2019. С. 90-96.
6. Паранин А. В. Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. № 6. 2015. С. 33-38.
7. Ли В. Н., Клименко С. В. Методика оценки термического разупрочнения контактного провода // Наука и техника транспорта. № 2. 2015. С. 29-33.
8. Неугодинов И. П., Ефимов Д. А. Контроль нагрева проводов контактной подвески // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 80-84.
9. Определение числа временных перегревов контактных проводов, приводящих к понижению прочности до минимально допустимого значения / В. М. Варенцов, А. И. Бурьяноватый [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. № 3. 2020. С. 5-15.
10. P. P. Girshin; V. N. Gorjunov; A. Ya. Bigun; E. V. Petrova; E. A. Kuznetsov. Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model. 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. Publisher: IEEE.
11. P. P. Girshin; A. Ya. Bigun; E. V. Petrova. Analysis of dynamic thermal rating of overhead power lines in the conditions of forced convection considering non-linearity of heat transfer processes. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. Publisher: IEEE.
12. D. P. Vikharev; D. A. Repkin; N. G. Repkina. Thermal calculation of covered conductor for overhead lines. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. Publisher: IEEE.

13. M. Zunic;I. Tigar;F. Jakl. Determination of current and temperature distribution in overhead conductors by using electromagnetic-field analysis tools. IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21, Issue: 3. Publisher: IEEE.

14. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

15. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Литвинов Е. Ю. Расчет динамики изменения температуры токоведущих частей при имитационном моделировании систем тягового электроснабжения // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. В 2 т. Т. 1. Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2005. С. 221-225.

REFERENCES

1. Figurnov E. P., Zharkov Yu. Clarifications to the basics of the theory of heating wires of overhead power lines. Electromechanics. No. 1. 2013. P. 36 – 40.

2. Savvov V. M. Regulatory requirements for high-speed highway at speeds of 350 km/h and above. Creation of a detailed model of current distribution and heating of wires of a contact network. Electrification and development of infrastructure for power supply of high-speed and high-speed trains. 2015. P. 325-330.

3. Paranin A. V., Batrashov A. B. Thermal calculation of direct current contact suspension to identify local overheating points in thermal imaging diagnostics. Development and operation of electrical complexes and systems of energy and land transport. Omsk, 2018. P. 93-100.

4. Kovalev A. A., Panych D. P. Modeling of thermal processes in a contact wire by the finite element method in the COMSOL MULTIPHYSICS 5.2 software package. Innovative transport. No. 3 (25). 2017. P. 49-52.

5. Batrashov A. B., Paranin A. V., Shumakov K. G. Improvement of the mathematical model for calculating electrothermal processes in a direct current contact suspension. Transportation of the Urals. No. 1 (60). 2019. P. 90-96.

6. Paranin A. V. Calculation of current and temperature distribution in direct current contact suspension based on the finite element method. Bulletin of the Research Institute of Railway Transport. No. 6. 2015. P. 33-38.

7. Li V. N., Klimenko P. V. Methods for assessing the thermal softening of the contact wire. Science and technology of transport. No. 2. 2015. P. 29-33.

8. Neugodnikov I. P., Efimov D. A. Control of heating of wires of a contact suspension. Transport of the Urals. 2019. No. 3 (62). pp. 80-84.

9. Determination of the number of temporary overheating of contact wires, leading to a decrease in strength to the minimum allowable value / V. M. Varentsov, A. I. Buryanovaty [et al.]. Bulletin of the results of scientific research. No. 3. 2020. P. 5-15.

10. Girshin P. P., Gorjunov V. N., Bigun A. Ya., Petrova E. V., Kuznetsov E. A. Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model. 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. Publisher: IEEE.

11. Girshin P. P., Bigun A. Ya., Petrova E. V. Analysis of dynamic thermal rating of overhead power lines in the conditions of forced convection considering non-linearity of heat transfer processes. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. Publisher: IEEE.

12. Vikharev D. P., Repkin D. A., Repkina N. G. Thermal calculation of covered conductor for overhead lines. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. Publisher: IEEE.

13. M. Zunic;I. Tigar; F. Jakl. Determination of current and temperature distribution in overhead conductors by using electromagnetic-field analysis tools. IEEE Transactions on Power Delivery. 2006 Vol. 21, Issue: 3. Publisher: IEEE.

14. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Asymmetric Regimes of Electric Systems. Irkutsk, 2005. 273 p.

15. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Litvinov E. Yu. Calculation of the dynamics of temperature changes in current-carrying parts during simulation modeling of traction power supply systems. Resource-saving technologies in railway transport. In 2 vols. T. 1. Krasnoyarsk, 2005. P. 221-225.

Информация об авторах

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

Сапожник Павел Александрович – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: sapozhnik_pa@mail.ru

Information about the author

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

Sapozhnik Pavel Aleksandrovich – postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: sapozhnik_pa@mail.ru