

УДК 621.332.3

Совершенствование метода расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог

А. В. Агунов, Д. Д. Иванов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Агунов А. В., Иванов Д. Д. Совершенствование метода расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 112–122. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-112-122

Аннотация

Цель: произвести анализ, направленный на выявление недостатков существующей методики расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог в экстремальных температурных условиях. Показать необходимость внедрения современных методов расчета на основе математического моделирования с применением средств автоматического проектирования. **Методы:** разработка МКЭ-модели с применением программного комплекса ANSYS Workbench, позволяющей определять натяжение несущего троса контактной подвески с учетом нагрева от протекающего тока в условиях тяжеловесного движения. Сравнение результатов расчета по существующей методике и по разработанной МКЭ-модели. **Результаты:** проведенный анализ показал, что в текущем подходе не учитываются важные физические факторы, что может приводить к потенциальным ошибкам как в проектировании, так и в эксплуатации контактной сети. Результаты электротепломеханического расчета на разработанной МКЭ-модели выявляют несоответствия в определении температуры нагрева и натяжения несущего троса полукompенсированной контактной подвески, что указывает на необходимость пересмотра ключевых параметров, используемых в существующей методике расчета. **Практическая значимость:** разница в результатах расчетов показывает важность внедрения современных методик определения необходимых для проектирования и эксплуатации параметров и подтверждает актуальность исследования, в особенности в условиях организации тяжеловесного движения поездов. МКЭ-модели, примененные в исследовании, обладают широким расчетным функционалом и возможностью задания различных граничных условий, таких как температура окружающего воздуха, величина тока, протекающего по проводам контактной сети, и натяжение проводов. Эти модели могут быть эффективно использованы в проектировании и научной деятельности специалистами различных областей.

Ключевые слова: контактная сеть, контактная подвеска, несущий трос, режим максимальной температуры, температура нагрева провода, системы тягового электроснабжения.

Введение

Контактная подвеска электрифицированных железных дорог является частью тяговой сети и имеет основную особенность по сравнению с другими воздушными линиями — отсутствие возможности резервирования. Ввиду этого к ней предъявляются особые требования в части обеспечения надежного токосъема.

При расчетах проводов контактной сети рассматривают основные и особые (обрывы проводов, падение одной консоли или сейсмические воздействия)

сочетания нагрузок. К основным, как правило, относят следующие нагрузки и их сочетания [1]:

- наибольшее для заданного района давление ветра (гололед отсутствует);
- отложение гололеда на проводах и конструкциях;
- давление ветра на покрытые гололедом провода и конструкции;
- минимальная температура воздуха (ветер и гололед отсутствуют).

Стоит отметить, что для полукompенсированных цепных контактных подвесок большое влияние с точки зрения вертикальных перемещений оказывает режим максимальной температуры с учетом нагрева проводов от солнечной радиации и протекающих токов. В таком режиме у медного несущего троса значительно уменьшается натяжение ввиду основного свойства металла расширяться при увеличении тепловых нагрузок, что может привести к значительному нарушению вертикального габарита контактной подвески.

Анализ существующей методики расчета цепных контактных подвесок

Сегодня основные механические расчеты проводов цепной контактной подвески приведены в работе А. В. Фрайфельда и Г. Н. Брода [2]. В своих трудах авторы приводят методику определения натяжения несущего троса обычной полукompенсированной контактной подвески для различных режимов работы в процентном соотношении от максимального. Так, например, натяжение несущего троса при наибольшем для заданного района давлении ветра определяется как 70% от максимального натяжения. Для режима, при котором контактные провода имеют беспровесное положение, натяжение несущего троса определяется как 80% от максимального.

Температура в режиме беспровесного положения [1]:

$$t_0 = t_r - t', \quad (1)$$

где t_r — среднегодовая температура воздуха, °С [3];

t' — поправка, равная 20–25 °С при одном и 15–20 °С при двух контактных проводах.

Температура беспровесного положения контактного провода более точно определяется исходя из следующих соотношений:

– если значение $t_r \leq t_n$ (после округления до 5 °С), то $t' = 20$ °С при одном и $t' = 15$ °С при двух контактных проводах;

– если значение $t_r > t_n$, то $t' = 25$ °С при одном и $t' = 20$ °С при двух контактных проводах.

Здесь t_n — средняя нормативная температура воздуха:

$$t_n = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}, \quad (2)$$

где t_{\max} — максимальная температура проводов с учетом нагрева солнечной радиацией, °С;

t_{\min} — абсолютная минимальная температура воздуха, °С.

При проектировании контактной подвески главных путей, находящихся на балансе ОАО «РЖД», применяется несущий трос только из медного провода сечением 120 мм² в соответствии с письмом [4]. Согласно [1, табл. 3.2], наибольшее натяжение несущий трос М-120 имеет в режиме минимальной температуры и составляет 2000 даН.

Задаваясь несколькими значениями натяжений несущего троса для различных сочетаний нагрузок и воспользовавшись методом линейной интерполяции, авторы предлагают найти значения натяжений несущего троса при различных температурных нагрузках. Сегодня данная методика расчета натяжений несущего троса используется при проектировании контактной сети в различных проектных институтах.

Стоит отметить, что на данный момент существующие типовые проекты КС-160, КС-200, КС-250 и КС-400 ограничивают максимальную температуру нагрева проводов до 80 °С. Это связано с ограничениями по температурным перемещениям проводов, как горизонтальным, так и вертикальным. Поэтому максимальную температуру при расчетах с учетом нагрева от протекающего тока обычно принимают именно 80 °С.

В настоящий момент на полигоне ОАО «РЖД» большое количество железнодорожных участков проектируется, монтируется и вводится в эксплуатацию с применением цепной полукомпенсированной контактной подвески. Перспективой развития железнодорожного транспорта до 2030 года и 2035 года предусматривается развитие тяжеловесного движения грузовых поездов массами до 12 600 т для перевозки грузов в порты, а также по различным направлениям [5]. В условиях тяжеловесного движения ток, потребляемый одним современным электровозом, может достигать порядка 500 А на переменном токе и 4000 А на постоянном токе. Такие нагрузки, а также их нелинейность во времени существенно влияют на температуру нагрева проводов контактной подвески и могут достигать или даже превысить допустимые для медного несущего троса 100 °С [6].

Ток нагрузки, протекающий по всем продольным и поперечным проводам контактной подвески, составляет определенную картину токораспределения. В настоящее время на практике при определении токонесущей способности прибегают к естественной модели токораспределения, не учитывающей продольные провода (струны, рессорные тросы). Совершенствование электротепловых и механических расчетов в части распределения тока в элементах контактной сети тесно связано с трудами таких ученых, как А. Б. Батрашов [7], А. В. Воронин [8], Е. В. Кудряшов [9].

Ввиду вышесказанного стоит отметить, что существующая методика определения натяжений несущего троса [2], разработанная еще в 80–90-х годах

прошлого века, может быть применена при инженерных расчетах, не учитывая токораспределение по всем проводам контактной подвески. Разработка математической модели позволит усовершенствовать электротепломеханические расчеты контактной подвески и объективно оценить степень достаточности применения существующих модификаций контактной подвески, а также требований, предъявляемых к ним, с учетом перспективы организации тяжеловесного движения. Данные расчеты можно производить с применением программного комплекса ANSYS Workbench на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Разработка математической модели контактной подвески с применением МКЭ

В качестве объекта исследования выбран пролет типовой полукомпенсированной контактной подвески переменного тока КС-160-3 длиной 65 м и сечением М-120 + МФ-100 со смещенными опорными струнами из провода БСМ1 сечением 4 мм². Выбор длины пролета сделан на основании [1, прил. 1] как наиболее часто встречающийся при проектировании.

Геометрия расчетного пролета представляется линейными поперечными и продольными отрезками заданного поперечного сечения. Сечение фасонного контактного провода в целях упрощения геометрии представляется круглым, равным описанной окружности по поперечному сечению. Расчетная геометрия одного пролета между опорами контактной сети с разбиением на конечные элементы изображена на рис. 1. Для наглядности на рисунке предоставлено меньшее количество узлов и конечных элементов, чем это необходимо для выполнения расчета. В целях сеточной сходимости для расчета необходимо более 350 тыс. конечных элементов.



Рис. 1. Геометрия контактной подвески с разбиением на конечные элементы

На первом этапе исследования определяется токораспределение по всем продольным и поперечным проводам контактной подвески. Значение тока принимается на основании тяговых и электрических расчетов экспериментального участка,

электрифицированного по системе тягового электроснабжения переменного тока. На рис. 2 предоставлен фрагмент расчетной схемы тягового электроснабжения с указанием его параметров.

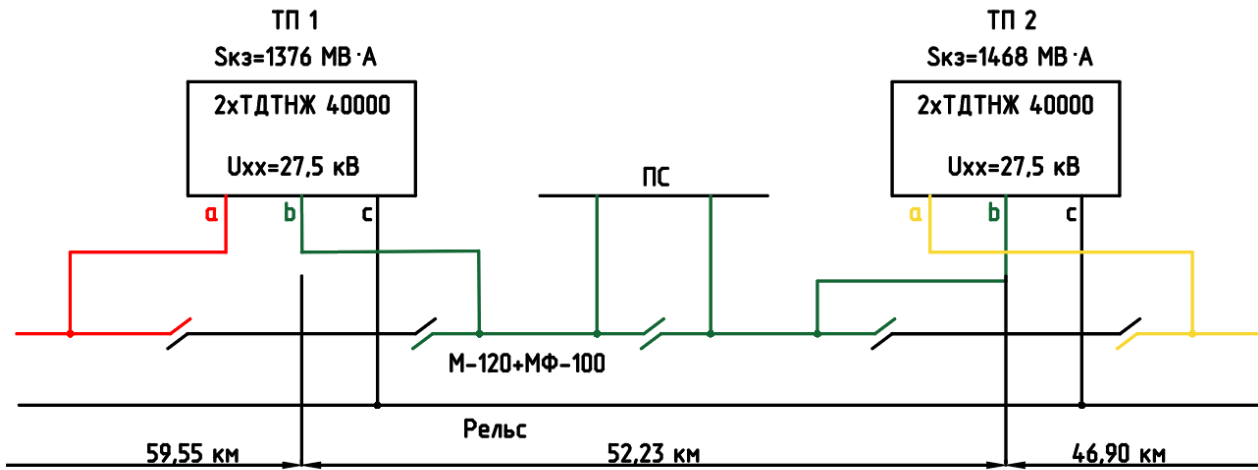


Рис. 2. Схема электроснабжения экспериментального расчетного участка

Расчеты выполнялись методом сечения графика движения поездов с учетом пропуска пакета поездов массами 4000–9000 т в час интенсивных перевозок. Результаты показали, что ток питающей линии тяговой подстанции ТП-1 в месте подключения к контактной подвеске за 20-минутный период составит 500 А.

Объектом исследования принимается пролет контактной подвески, в середине которого подключается питающая линия от тяговой подстанции ТП-1. Температура окружающего воздуха принимается равной 50 °С.

Работа контактной подвески в части протекания тягового тока характеризуется режимом транзита и режимом токосъема [7]. Режим транзита обусловлен протеканием тягового тока от источника до удаленной точки токосъема, а режим токосъема — движением ЭПС. В рассматриваемой модели принимается режим транзита, когда ЭПС находится в соседнем от исследуемого пролете. Режим токосъема не рассматривается. Расчет токораспределения по всем продольным и поперечным проводам рассматриваемого пролета основан на уравнении Максвелла в его дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho_q \\ \nabla \cdot H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \end{cases}, \quad (3)$$

где ρ_q — объемная плотность стороннего электрического заряда, Кл/м³;
 j — плотность электрического тока, А/м²;

H — напряженность магнитного поля, А/м²;

D — электрическая индукция, Кл/м³;

∇ — оператор набла.

Для определения искомой температуры нагрева проводов можно использовать первый закон термодинамики [10, с. 15] в следующем виде:

$$E_{ST} = \frac{dE_{ST}}{dt} = E_{IN} - E_{OUT} + E_G, \quad (4)$$

где E_{ST} — сохраненная тепловая энергия, Дж;

E_{IN} — поступающая тепловая энергия, Дж;

E_{OUT} — отбираемая тепловая энергия, Дж;

E_G — тепловая энергия внутри тела, Дж.

Провода контактной подвески подвергаются нагреву от протекающего тока (резистивному) и солнечной радиации. Взаимодействие с окружающей средой описывается процессами лучистого и конвективного теплообмена [11, с. 721]. Дополнительно на температуру провода контактной подвески влияют поперечный и продольный кондуктивные потоки тепла. Теплообмен возникает при наличии градиента вдоль проводов в местах крепления проводов к поддерживающим конструкциям. В случае вынужденной конвекции поток тепла направлен горизонтально со стороны ветровых нагрузок, в случае естественной конвекции — вертикально вниз. В данном расчете принимается допущение: кондуктивный поток тепла в поперечном направлении провода ввиду его малозначительности принимается равным нулю [7].

Кондуктивный тепловой поток в участке провода можно описать законом Фурье [2]:

$$Q_k = -k(T) \cdot A \cdot \nabla \cdot T, \quad (5)$$

где A — площадь поперечного сечения провода, м².

Уравнение нестационарного теплового баланса для КС, выраженное в потоке тепла на единицу длины провода, можно представить как [7]:

$$A \left(c(T) \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} - k(T) \cdot \Delta T \right) = Q_J + Q_{SH} - Q_c - Q_R, \quad (6)$$

где c — теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К);

k — теплопроводность материала провода, Вт/(м·К);

ρ — плотность материала провода, кг/м³;

Q_J, Q_{SH}, Q_c, Q_R — погонный поток тепла от резистивного нагрева, солнечной радиации, конвективного охлаждения, лучеиспускания, Вт/м;

T — температура, К;
 t — время, с;
 Δ — оператор Лапласа ($\Delta = \nabla^2$).

Визуализация результатов расчета температуры провода при учете токораспределения методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS Workbench представлена на рис 3.

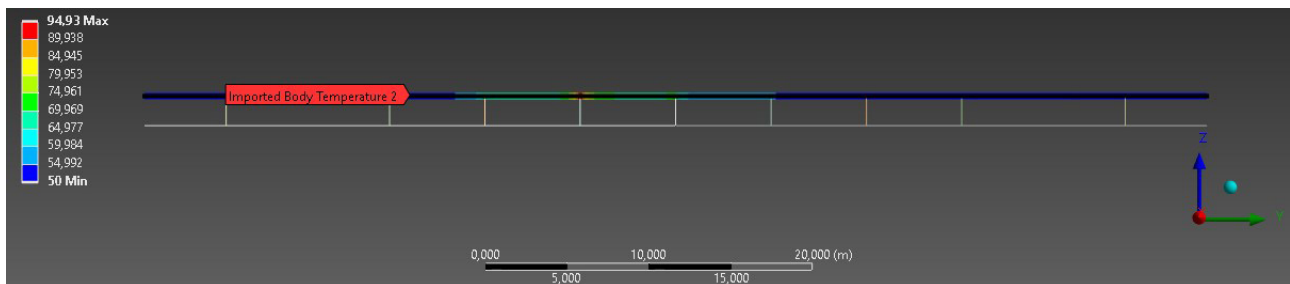


Рис. 3. Визуализация результатов расчета температуры провода при учете токораспределения

Наибольшая температура нагрева провода наблюдается в середине пролета в месте подключения питающей линии ТП к несущему тросу по причине высокой плотности тока в данной точке.

Методика расчета температуры нагрева провода с учетом токораспределения широко описана в работе А. Б. Батрашова [7]. Опыт данной работы используется при создании рассматриваемой модели и переходе от электротепловых расчетов к электротепломеханическим расчетам.

Расчет натяжения несущего троса полукомпенсированной контактной подвески с интеграцией электротеплового расчета основан на переходе к «балочной» геометрии в трехмерном пространстве. Принимается, что все продольные и поперечные провода не имеют поперечных деформаций, то есть перемещаются только в вертикальной плоскости. В рамках классической теории Эйлера — Бернулли можно описать провода моделью предварительно натянутого стержня [9]. Уравнение изгиба такого стержня в системе координат X, Y, Z имеет вид:

$$EJ \cdot \frac{d^4 v'}{dx'^4} - H \cdot \frac{d^2 v'}{dx'^2} + q'(x') = 0, \quad (7)$$

где x' — продольная координата оси стержня;
 v' — поперечное перемещение оси стержня;
 E — модуль упругости;
 J — момент инерции сечения, Н;
 H — натяжение, Н;

$q'(x')$ — распределенная поперечная нагрузка.

Так как в данном расчете изгибной жесткостью стержня пренебрегают, уравнение (7) можно представить так:

$$-H \cdot \frac{d^2 v'}{dx'^2} + q'(x') = 0, \quad (8)$$

Продольное растяжение проводов описывается уравнением:

$$ES \cdot \frac{d^2 u'}{dx'^2} + \tau'(x') = 0, \quad (9)$$

где u' — перемещение вдоль оси провода, м;

S — площадь поперечного сечения провода, мм²;

$\tau'(x')$ — распределенная продольная нагрузка.

Программный комплекс ANSYS Workbench имеет возможность интеграции электротеплового в механический расчет посредством переноса результатов в каждый из узлов сетки. Граничными являются условия, выполняемые в два этапа. На первом задается натяжение несущего троса в режиме беспровесного положения — 1470 даН, а натяжение контактного провода — 1050 даН. Так как в полукompенсированной контактной подвеске несущий трос жестко анкеруется на опоре, то на втором этапе расчета «блокируется» его натяжение и производится интеграция электротеплового расчета для определения натяжения несущего троса в режиме максимальной температуры с учетом нагрева от протекающего тока. Натяжение контактного провода остается постоянным вне зависимости от прикладываемых тепловых нагрузок.

В табл. 1 приведены сводные результаты расчетов и сравнение принимаемых параметров, выполненных на разработанной МКЭ-модели и по методике, изложенной в [2].

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов по разработанной МКЭ-модели и по методике [2]

Параметр	Рассматриваемая методика	
	Методика [2]	МКЭ-модель
Максимальная температура провода с учетом нагрева от протекающего тока	80 °С	94,93 °С
Натяжение НТ в режиме максимальной температуры	637 даН	849 даН

Заключение

Результаты расчета и анализа показывают, что в существующей методике [2] в части определения максимальной температуры провода недоучитывается порядка 14 °С. Тогда как натяжение несущего троса в режиме максимальной температуры, наоборот, принимается приблизительно на 200 даН меньше, чем по расчетам МКЭ-модели.

Такой параметр, как натяжение в режиме максимальной температуры, используется в расчете стрелы провеса несущего троса при проверке вертикальных перемещений и вертикального габарита контактной подвески. Стрела провеса несущего троса в середине пролета при учете натяжения, определенного по методике [2], составляет 1,67 м, а при учете натяжения, определенного по МКЭ-модели, составляет 1,25 м.

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что методика [2] изначально предполагает выполнение расчетов с запасом в сравнении с разработанной МКЭ-моделью.

МКЭ-модели имеют большой расчетный функционал и возможность задавать различные граничные условия расчета, такие как температура окружающего воздуха, величина тока, протекающего по проводам КС, натяжение проводов КС. Такие модели могут быть использованы при проектировании, научной деятельности широким кругом специалистов. Описанная МКЭ-модель на данный момент дорабатывается на кафедре «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I и в ближайшее время будет подвержена процессу валидации.

Библиографический список

1. СТН ЦЭ 141-99. Нормы проектирования контактной сети. М.: ЦЭ МПС РФ, 2001. 16 с.
2. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. М.: Транспорт, 1991. 335 с.
3. СП 131.13330.2020. Строительная климатология СНиП 23-01-99* (с изменениями № 1, 2). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2021. 132 с.
4. Техническое указание № К-06-07 «О несущих тросах контактной сети переменного тока», утв. письмом Департамента электрификации и электроснабжения от 31.08.2007 № ЦЭТ-2/49.
5. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р).
6. ГОСТ 32697-2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
7. Батрашов А. Б. Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 216 с.
8. Воронин А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1946. 143 с.

9. Кудряшов Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно-элементных моделей: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 162 с.

10. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incopera [et al.]. 6th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. 1070 p.

11. Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling [et al.]. 2nd ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2009. 994 p.

Дата поступления: 30.10.2024

Решение о публикации: 27.11.2024

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог»; agunov@pgups.ru

ИВАНОВ Денис Дмитриевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»; denis_08a@mail.ru

Improving the calculation method for catenary contact suspensions of electrified railways

A. V. Agunov, D. D. Ivanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Agunov A. V., Ivanov D. D. Improving the calculation method for catenary contact suspensions of electrified railways // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 112–122. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-112-122

Abstract

Purpose: to conduct an analysis aimed at identifying the shortcomings of the existing calculation methodology for catenary overhead catenaries of electrified railways under extreme temperature conditions. To demonstrate the need to implement modern calculation methods based on mathematical modeling using computer-aided design tools. **Methods:** development of a FEM model using the ANSYS Workbench software package, which allows determining the tension of the overhead catenary supporting cable taking into account heating from the flowing current under heavy-haul traffic conditions. Comparison of calculation results using the existing methodology and the developed FEM model. **Results:** the analysis showed that the current approach does not take into account important physical factors, which can lead to potential errors both in the design and operation of the overhead catenary. The results of the electrothermal-mechanical calculation using the developed FEM model reveal inconsistencies in determining the heating temperature and tension of the overhead catenary supporting cable, which indicates the need to revise the key parameters used in the existing calculation methodology. **Practical significance:** the difference in the calculation results shows the importance of implementing modern methods for determining the parameters required for design and operation and confirms the relevance of the study, especially in the conditions of organizing heavy-haul train traffic. The FEM

models used in the study have a wide calculation functionality and the ability to specify various boundary conditions, such as ambient air temperature, current applied to the contact network wires, and wire tension. These models can be effectively used in design and scientific activities by specialists in various fields.

Keywords: contact network, contact suspension, carrier cable, maximum temperature mode, wire heating temperature, traction power supply systems.

References

1. STN CE 141-99. Normy proektirovaniya kontaktnoj seti. M.: CE MPS RF, 2001. 16 s. (In Russian)
2. Frajfel'd A. V., Brod G. N. Proektirovanie kontaktnoj seti. M.: Transport, 1991. 335 s. (In Russian)
3. SP 131.13330.2020 Stroitel'naya klimatologiya SNiP 23-01-99* (s izmeneniyami No. 1, 2). Oficial'noe izdanie. M.: Standartinform, 2021. 132 s. (In Russian)
4. Tekhnicheskoe ukazanie № K-06-07 "O nesushchih trosah kontaktnoj seti peremennogo toka", utv. pis'mom Departamenta elektrifikacii i elektrosnabzheniya ot 31.08.2007 No. CET-2/49. (In Russian)
5. Strategiya razvitiya zhelezodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda (utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.06.2008 No. 877-r). (In Russian)
6. GOST 32697-2019. Trosy kontaktnoj seti zheleznoj dorogi nesushchie. Tekhnicheskie usloviya. Oficial'noe izdanie. M.: Standartinform, 2019. 8 s. (In Russian)
7. Batrashov A. B. Sovershenstvovanie elektroteplovyh raschetov i harakteristik kontaktnoj seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2019. 216 s. (In Russian)
8. Voronin A. V. Tokoraspredelenie mezhdru prodol'nymi provodami kontaktnoj seti i teplovoj raschet ee elementov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1946. 143 s. (In Russian)
9. Kudryashov E. V. Sovershenstvovanie mekhanicheskikh raschetov kontaktnyh podvesok na osnove staticheskikh konechno-elementnyh modelej: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2010. 162 s. (In Russian)
10. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incopera [et al.]. 6th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. 1070 p.
11. Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling [et al.]. 2nd ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2009. 994 p.

Received: 30.10.2024

Accepted: 27.11.2024

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — D. Sci. in Engineering, Professor; agunov@pgups.ru

Denis D. IVANOV — Postgraduate Student; denis_08a@mail.ru