

Валидация математической модели электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока на базе масштабной модели

А. В. ПАРАНИН, А. Б. БАТРАШОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС), Екатеринбург, 620034, Россия

Аннотация. Представлено сравнение результатов расчета конечно-элементного моделирования распределения тока и температуры в масштабной модели контактной подвески постоянного тока с данными лабораторных испытаний. Исследованы различные варианты конструктивного исполнения макета подвески, отражающие топологические особенности соединения проводов, характерные для контактной сети постоянного тока. Рассматриваются условия работы модели контактной сети в режимах транзита и токосъема.

Результаты исследования позволяют сделать вывод об адекватности математической модели и ее соответствии реальному физическому процессу.

Ключевые слова: токораспределение; контактная подвеска; постоянный ток; метод конечных элементов; средняя анкеровка; распределение температуры; транзит тягового тока; масштабная модель

Введение. Цели и задачи, поставленные перед ОАО «РЖД» согласно Стратегии научно-технического развития на период до 2020 года и перспективу до 2025 года [1], предполагают увеличение объемов грузовых и пассажирских перевозок на 40–60 % и 20–40 % соответственно, а также ликвидацию «узких мест» на всех основных направлениях перевозок. Достижение поставленных целей повлечет за собой модернизацию участков контактной сети, токонесущая способность которых является ограничивающей для пропускной способности линии. В то же время часть существующих контактных подвесок нуждается в реконструкции. Следует отметить, что на существующей контактной сети большинство подвесок рассчитано по аналитическим моделям, не учитывающим топологию подвески. В работе [2] рассмотрены модели токораспределения в контактных подвесках постоянного тока. Анализ моделей показал, что на сегодняшний день модель токораспределения и нагрева проводов, основанная на методе конечных элементов [3], обладает наиболее широкими расчетными возможностями из всех существующих. Высокая сходимость результатов расчета конечно-элементной модели с другими топологическими моделями [4, 5] позволяет верифицировать модель с точки зрения распределения тока. Однако отсутствие аналогичных моделей

расчета нагрева проводов контактной сети не позволяет произвести верификацию конечно-элементной модели с точки зрения расчета температуры.

Контактная подвеска имеет множественные электрические соединения, которые образуют сложную топологию электрической схемы замещения контактной подвески. Такие элементы, как рессорный трос (РТ) и трос средней анкеровки (ТСА), прежде всего предназначены для придания требуемых механических характеристик контактной подвеске. Их влияние на токораспределение создает локальные участки токовой перегрузки и тем самым повышает неравномерность температуры несущего троса (НТ) и контактного провода (КП). Впервые в России теоретическое предположение об участке повышенного нагрева НТ в зоне ТСА компенсированной подвески было выведено В. Е. Марским в работе [4].

Для валидации конечно-элементной модели электротепловых расчетов контактных подвесок постоянного тока выбран метод масштабного моделирования. Данный подход позволяет в короткие сроки без значительных экономических затрат и выполнения сложных организационно-технических мероприятий произвести сравнение результатов расчетов с данными лабораторных испытаний на базе масштабной модели. При анализе моделей токораспределения [2] было выявлено, что до настоящего момента не опубликовано экспериментальных исследований токораспределения в контактных подвесках постоянного тока ни на реальных участках контактной сети, ни на лабораторных установках.

Лабораторная установка представляет собой масштабную модель контактной подвески постоянного тока из медных проводов марки ПЭТВ-2. Провода масштабной модели соединены между собой при помощи пайки. Принципиальная схема установки изображена на рис. 1, а в табл. 1 представлены сечения и длины проводов масштабной модели.

Состоит лабораторная установка из следующих элементов: Т1 — лабораторный автотрансформатор, управляемый РНО-250-2-М, для регулировки тока,

■ E-mail: andreybatrashov@gmail.com (А. Б. Батрашов)

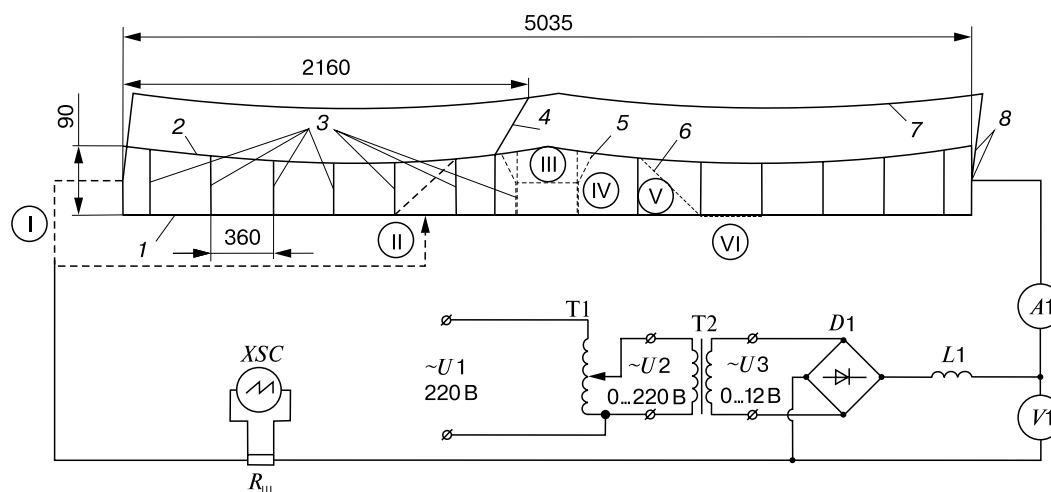


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

I — режим транзита тягового тока; II — режим токосъема; III — конструктивное исполнение с рессорным тросом; IV — конструктивное исполнение с разнесенными струнами; V — конструктивное исполнение с тросом средней анкеровки; VI — участок контактного провода с местным износом; 1 — контактный провод; 2 — несущий трос; 3 — струны; 4 — поперечный электросоединитель; 5 — рессорный трос; 6 — трос средней анкеровки; 7 — усиливающий провод; 8 — питающие провода

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation:

I — mode of transit of traction current; II — current collection mode; III — design with a spring cable; IV — design with spaced strings; V — design with medium anchor rope; VI — section of the contact wire with local wear; 1 — contact wire; 2 — supporting cable; 3 — strings; 4 — transverse electric connector; 5 — spring rope; 6 — medium anchor rope; 7 — reinforcing wire; 8 — power wires

Таблица 1

Сечения и длины проводов масштабной модели

Table 1

Section and length of wires of the scale model

Моделируемый провод	Количество, шт.	Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Длина, мм
Контактный провод (КП)	1	1,7	2,27	5035
Несущий трос (НТ)	1	1,9	2,84	5036
Усиливающий провод (УП)	1	1,9	2,84	5035
Рессорный трос (РТ)	1	1,12	0,98	519
Струны (СТР)	14	0,45	0,16	72–92
Трос средней анкеровки (ТСА)	2	1,12	0,98	37
Электросоединитель (ЭС)	1	1,9	2,84	317
Питающие провода (ПП)	2	2×1,9	4,54	90–94

протекающего через масштабную модель; U_1 — напряжение в первичной цепи Т1; U_2 — диапазон регулирования напряжения во вторичной цепи Т1; U_3 — диапазон регулирования напряжения во вторичной обмотке Т2; Т2 — понижающий трансформатор ТДМ-401У2; D1 — мост из диодов ВЛ200; L1 — катушка индуктивности для сглаживания выпрямленного тока; $R_{ш}$ — шунт 75ШСММ3-300А-0,5 для измерения общего тока, протекающего через масштабную модель; XSC — осциллограф GW Instek GDS-2102 для измерения падения напряжения на шунте $R_{ш}$; A1 — амперметр (токоизмерительные клещи) S-line EM-405; V1 — вольтметр APPA-305.

Лабораторная установка предполагает свободную конвекцию для исследуемых проводов при комнатной

температуре. Различные точки подключения питающих проводов к масштабной модели обозначены на рис. 1 римскими цифрами I, II и моделируют режим транзита тягового тока (I) или режим токосъема (II). Варианты конструктивного исполнения масштабной модели контактной подвески обозначены на рис. 1 римскими цифрами III, IV, V и учитывают наличие или отсутствие РТ (III, IV) и ТСА (V).

Измерение температуры проводов производилось при помощи тепловизора Testo 881-1, а температура окружающего воздуха фиксировалась контактным термометром ТК-5. Пример термограммы и температурного профиля вдоль НТ в зоне крепления троса ТСА при температуре окружающего воздуха 25,5 °С и общем токе 80 А для варианта конструктивного

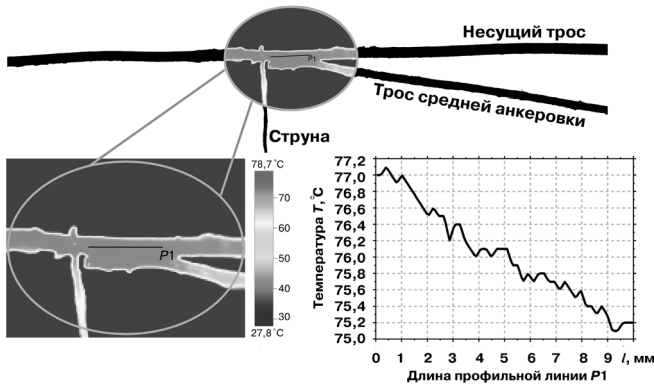


Рис. 2. Термограмма и температурный профиль несущего троса в зоне крепления троса средней анкеровки
Fig. 2. Thermogram and temperature profile of the bearing rope in the anchoring zone of the medium anchor rope

исполнения контактной подвески с РТ и ТСА представлен на рис. 2. При тепловизионном измерении на провода масштабной модели нанесено покрытие с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,85$.

Математическая модель. Провода контактной сети представляются в пространстве одномерными линейными объектами с искомыми функциями электрического потенциала V и температуры T зависящими от пространственной координаты (x, y, z) и времени t .

Математическая модель для электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{r_{\text{пр}}(T)} \nabla^2 V = -(f + f_i); \\ c m_{\text{пр}} \frac{\partial T}{\partial t} - k_{\text{пр}} \nabla^2 T = r_{\text{пр}}(T) I_{\text{пр}}^2 + q_{\text{сл}} - q_{\text{кн}} - q_{\text{лч}} - f_Q, \end{cases} \quad (1)$$

где $I_{\text{пр}}$ — ток, протекающий в проводе, А; $r_{\text{пр}}(T)$ — функция погонного сопротивления провода от температуры, Ом/м; V — расчетная функция потенциала провода, В; f — погонный источник тока, А/м; f_i — погонный источник тока на участке соединения провода и зажима, А/м; c — теплоемкость материала, Дж/(кг·К); $m_{\text{пр}}$ — погонная масса, кг/м; T — расчетная функция температуры провода, К; $k_{\text{пр}}$ — погонная теплопроводность, Вт·м/(К); $q_{\text{сл}}$ — погонный поток солнечной радиации, Вт/м; $q_{\text{кн}}$ — погонный поток тепла от теплоотдачи конвекцией, Вт/м; $q_{\text{лч}}$ — погонный поток тепла от теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/м; f_Q — погонный источник тепла на участке соединения провода и зажима, Вт/м.

Аналогичным образом зажимы и поддерживающие элементы лабораторной установки представлены одномерными линейными объектами с искомыми функциями электрического потенциала V_1 и температуры T_1 , для которых также применяется система уравнений (1). В местах соединения проводов и зажимов для соот-

ветствующих линейных участков заданы условия, описывающие тепловой и электрический контакт:

$$\begin{cases} V - V_1 = f_i; \\ \frac{R_{\text{пзжм}}}{l_{\text{зжм}}} (T - T_1) = f_Q, \end{cases} \quad (2)$$

где V_1 — расчетная функция потенциала зажима, В; T_1 — расчетная функция температуры зажима, К; $R_{\text{п}}$ — переходное электрическое сопротивление соединения провода и зажима, Ом; $l_{\text{зжм}}$ — длина места соединения провода и зажима, м; h_c — контактная теплопроводность соединения провода и зажима, Вт/(м²·К); S — площадь контакта между проводом и зажимом, м².

Тепловые контакты рассматриваются в работах [6, 7, 8]. Здесь стоит отметить, что контакт зажимов и проводов рассматривается как стационарный с такими составляющими как: кондуктивный теплообмен через участки металлического контакта, теплопередача через газовый промежуток и теплообмен лучеиспусканием. Электрический контакт обеспечивается в местах соприкосновения микрошероховатостей между контактирующими телами, что вызывает переходное контактное сопротивление [9, 10].

Расчетная геометрия контактной подвески преобразуется в сеточную модель из лагранжевых конечных элементов линейного порядка. Напряжение на концах питающих проводов с одной стороны расчетного участка задается равным нулю по граничному условию Дирихле. Ток может быть задан точечным источником на питающем проводе с другой стороны (режим транзита), в произвольной точке контактного провода (режим токосъема при стоянке) либо погонным источником тока, перемещение которого по контактному проводу описывается функцией $S(t)$ (режим токосъема при движении).

Расчетная геометрия для конструктивного исполнения макета контактной подвески, состоящей из НТ, КП и РТ, приведена на рис. 3. В математической модели учтена арматура, участвующая в отводе тепла от исследуемых проводов масштабной модели: питающие зажимы лабораторных проводов, анкерные крюки и поддержка НТ. На рис. 3 масштабная модель контактной подвески справа жестко закреплена на анкерных крюках 3, а слева — на талрепах 2, которыми производится натяжение проводов. Паяные соединения проводов макета контактной подвески описываются условиями идеального электрического и теплового контакта.

Конвективное охлаждение проводов и зажимов определяется согласно [11, 12, 13]. Коэффициент естественной конвективной теплоотдачи имеет различные значения для горизонтального и вертикального расположения проводов в пространстве. Одна-

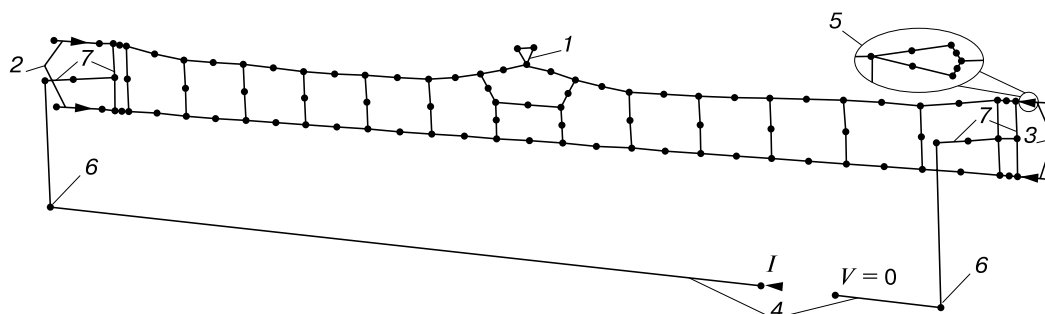


Рис. 3. Расчетная геометрия масштабной модели:

1 — подвес несущего троса; 2 — талрепы; 3 — анкерные крюки; 4 — лабораторные провода питания; 5 — петля анкеруемого провода; 6 — соединительные зажимы лабораторных проводов питания; 7 — питающие провода масштабной модели

Fig. 3. Calculated geometry of the scale model:

1 — suspension of the supporting cable; 2 — turnbuckles; 3 — anchor hooks; 4 — laboratory power wires; 5 — loop of the anchored wire; 6 — connecting terminals of laboratory supply wires; 7 — power wires of the scale model

ко даже для масштабной модели достаточно сложно добиться условий естественной конвекции, поэтому при математическом моделировании используется режим смешанной конвекции [11].

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов расчета. В качестве параметров для сравнения выступают значения тока и температуры в зависимости от пространственной координаты.

Варианты лабораторных испытаний, которые использованы для валидации математической модели, сведены в табл. 2. Представленный ряд опытов позволяет определить степень соответствия расчетной математической модели и масштабной модели для наиболее характерных топологий, образуемых конструктивными элементами контактной подвески постоянного тока.

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования для конструктивного исполнения макета

та контактной подвески с ТСА и РТ в режиме транзита тока величиной 81 А. Из характера зависимостей температуры перегрева проводов от координаты видно, что наблюдается теплоотвод в элементы лабораторной установки в местах поддерживающего крепления НТ и анкеровки проводов масштабной модели.

На макете контактной подвески токовая перегрузка участка НТ вблизи крепления ТСА составляет 12,2 %, а в СТР ближайших к ТСА ток достигает значений 3,7 А. В местах крепления СТР, РТ, ТСА к НТ и КП наблюдается теплоотвод от более нагретых продольных к менее нагретым поперечным проводам макета контактной подвески с соответствующим перераспределением температуры. Сравнение значений температуры СТР представлено для точек в середине СТР.

Графики тока в поперечных проводах макета контактной подвески при токосъеме 40 А в зависимости от координаты представлены на рис. 5.

Таблица 2

Варианты лабораторных испытаний

Table 2

Variants of laboratory tests

Режим	№ опыта	Конструктивное исполнение макета контактной подвески					Основные регистрируемые параметры			
		ТСА	РТ	РТ СТР	УП	ПС	Общий ток, $\sum I$, А	ΔI , А	Температура, $T_{\max}$, °С	ΔT , °С
Транзит	1	X	X	—	X	X	102,6	0,2	74,8	1,74
	2	X	—	X	X	X	123,6	0,24	—	—
	3	—	X	—	—	—	80	0,08	94,3	1,53
	4	X	—	X	—	—	80,8	0,29	101,3	2,72
	5	X	X	—	—	—	81	0,24	97,1	2,06
	6	—	—	X	—	—	80	0,09	89,5	1,5
Токосъем	7	X	X	—	—	—	40,5	0,16	—	—
	8	X	—	X	—	—	40,2	0,16	—	—
	9	X	X	—	X	X	40	0,26	—	—
Общее количество измерений, шт.							1090		281	
Средняя абсолютная погрешность							0,19 А		1,91 °С	

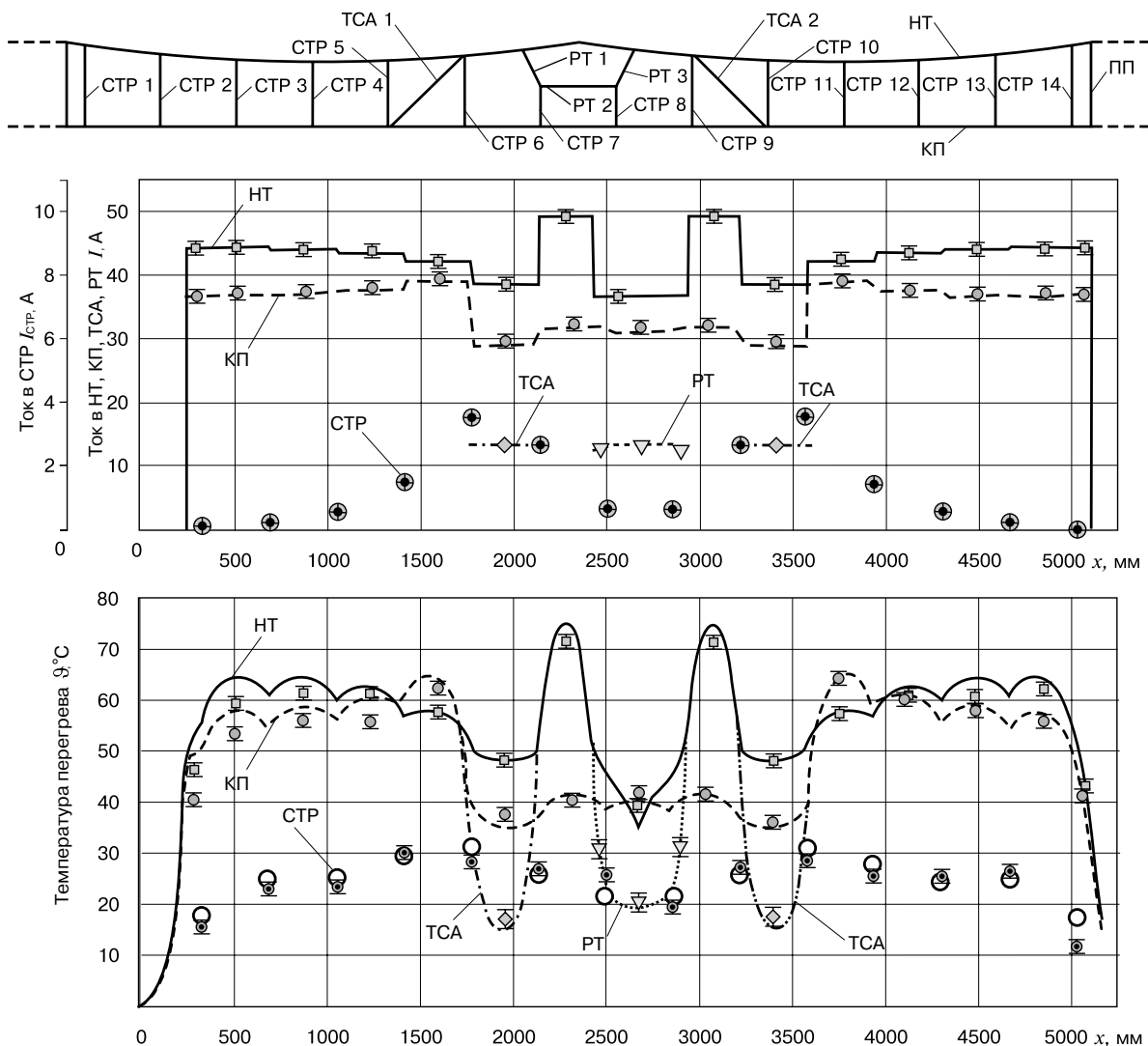


Рис. 4. Сравнение результатов тока и температуры проводов масштабной модели в режиме транзита (линии — результаты расчета, точки — результаты опыта)

Fig. 4. Comparison of current and temperature results of wires of the scale model in the transit mode (lines — calculation results, points — results of the experiment): HT — bearing cable; КП — contact wire; PT — spring rope; TCA — medium anchor rope; СТР — strings; ПП — power wires

Наибольшее значение тока в СТР макета контактной подвески при токоосъеме наблюдается в струне РТ, наиболее отдаленной от ПС и достигает 8,67 А, что составляет 21,7 % от снимаемого тока. При расположении точки токоосъема на макете под ПС ток на участке ПС 1 достигает 23,7 А, что составляет 59,3 % от токоосъема. Для ТСА макета контактной сети наибольший ток наблюдается в ТСА 1, и он достигает 11,87 А.

Сравнение температуры участка КП макета контактной подвески в межструновом пролете при различном характере местного износа представлено на рис. 6. Местный износ КП влияет на перераспределение тока в макете контактной подвески вблизи участка износа. Так, при износе 23 % на участке длиной 100 мм происходит вытеснение 2 % тока на данном участке из КП в НТ относительно случая без износа. Для макета кон-

тактной подвески данное увеличение доли тока в НТ влечет за собой повышение его температуры на 2,4 °С. Подобное повышение нагрузки на участке НТ не превышает инженерной погрешности. Тем не менее регистрация повышения тока и температуры свидетельствует о соответствии математической модели реальному физическому процессу перераспределения тока.

Проверка гипотезы об экспоненциальном законе распределения выборок полученных значений отклонений экспериментальных значений тока и температуры от расчетных в режимах транзита была выполнена с помощью критерия Пирсона. При уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы равным восьми наблюдаемое значение для тока $\chi^2_{\text{набл}} = 10,07$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 15,51$), а для температуры $\chi^2_{\text{набл}} = 9,12$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$) при числе степеней свобо-

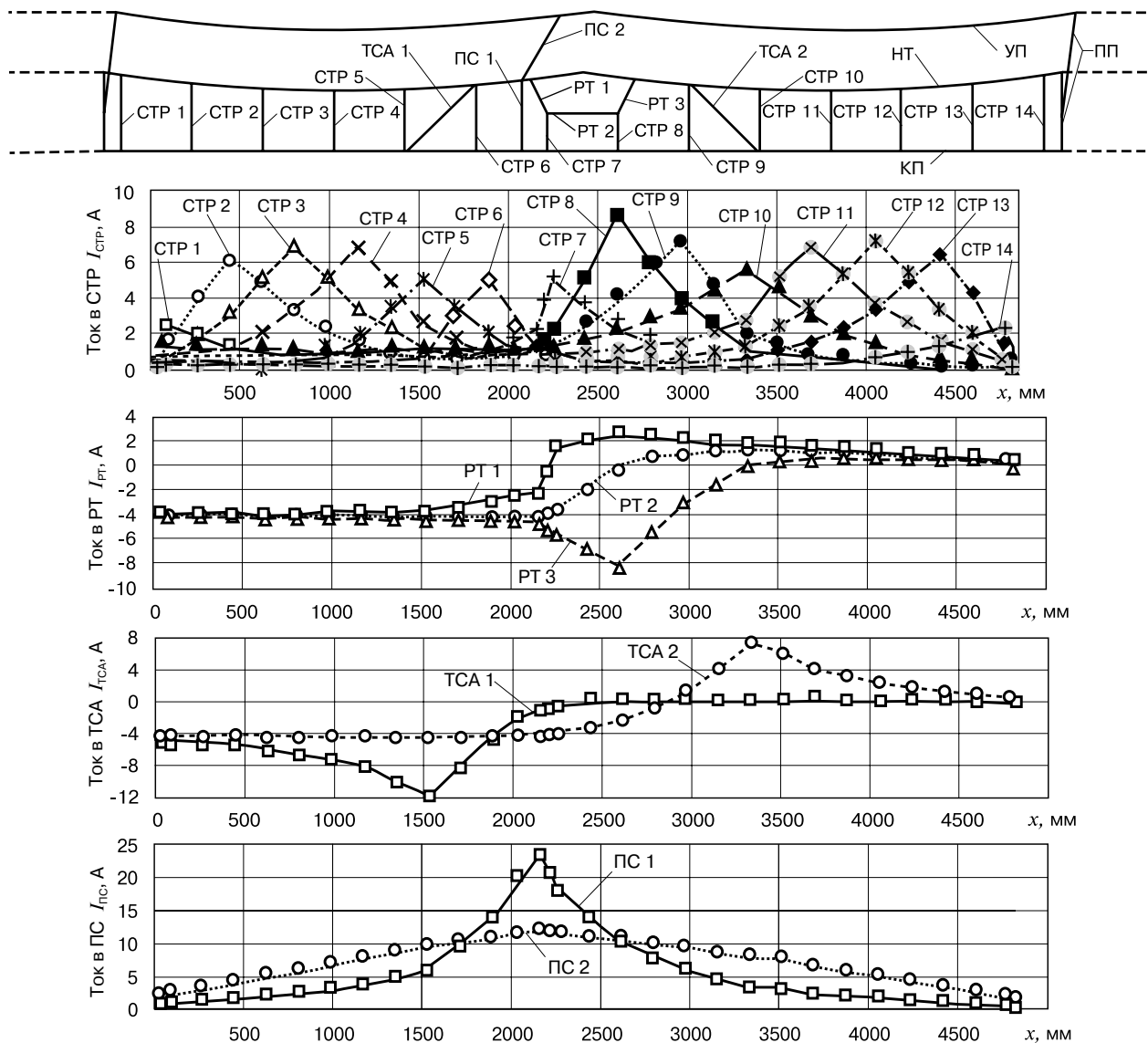


Рис. 5. Сравнение значений тока в поперечных проводах масштабной модели в зависимости от координаты токосъема (линии — результаты расчета, точки — результаты опыта)

Fig. 5. Comparison of current values in the transverse wires of the scale model depending on the current collection coordinate (lines — calculation results, points — experimental results): УП — reinforcing wire; ПС — electrical connector

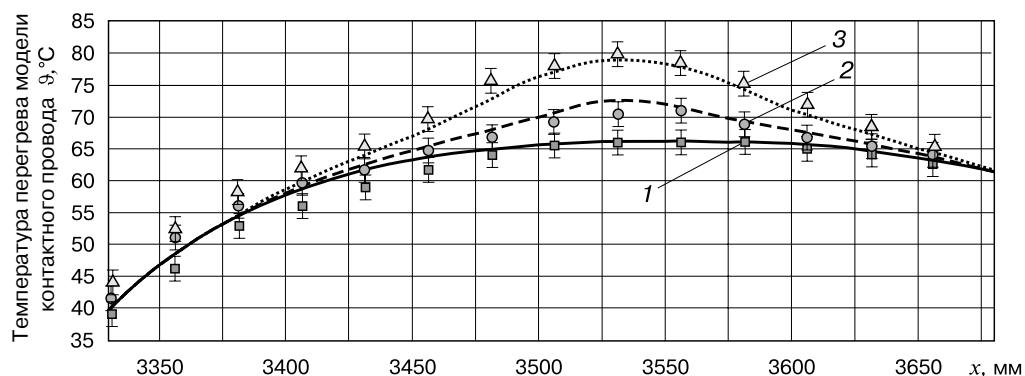


Рис. 6. Сравнение температуры перегрева КП в струновом пролете с местным износом: 1 — износ 14 % на участке длиной $l_w = 10$ мм; 2 — износ 20 % на участке длиной $l_w = 50$ мм; 3 — износ 23 % на участке длиной $l_w = 100$ мм (линии — расчет, точки — опыт)
Fig. 6. Comparison of the superheating temperature of the КП in the span with local wear: 1 — wear 14 % in a section of length $l_w = 10$ mm; 2 — wear of 20 % in a section of length $l_w = 50$ mm; 3 — wear of 23 % in a section of length $l_w = 100$ mm (lines — calculation, points — experience)

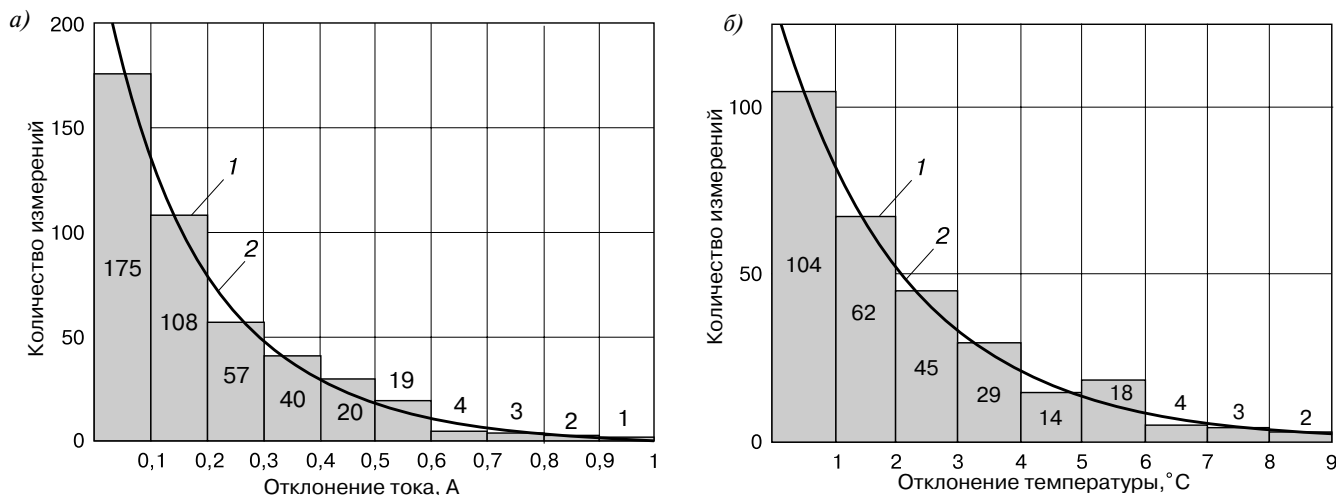


Рис. 7. Распределение отклонений экспериментальных значений тока (а) и температуры (б) от расчетных: 1 — данные опытных измерений; 2 — экспоненциальное распределение ($\lambda = 0,18$, $\lambda = 2,1$ на а и б соответственно)
Fig. 7. Distribution of the deviations of the experimental values of the current (а) and temperature (б) from the calculated values: 1 — experimental measurements; 2 — exponential distribution ($\lambda = 0,18$, $\lambda = 2,1$ on а and б respectively)

ды равным семи, что меньше значений $\chi^2_{\text{крит}}$ в каждом случае. Полученные результаты дают основания для принятия гипотезы об экспоненциальном законе распределения (рис. 7). Математическое ожидание выборки полученных значений расхождения по температуре и току составило $2,1^\circ\text{C}$ и $0,18\text{ A}$ соответственно, а среднеквадратическое отклонение — $1,79^\circ\text{C}$ и $0,17\text{ A}$. Отклонения измеренных значений от результатов расчета сопоставимы с погрешностями измерений приборов ($\pm 2^\circ\text{C}$ для тепловизора и $\pm 2,5\%$ для токовых клещей).

Вывод. В результате исследования произведена валидация конечно-элементной математической модели электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока на базе масштабной модели контактной подвески. Высокая степень соответствия результатов лабораторного эксперимента с данными математического моделирования свидетельствует об адекватности модели и ее соответствии реальному физическому процессу токораспределения и нагрева проводов, что дает основание к применению этой модели для электротепловых расчетов реальных контактных подвесок постоянного тока с учетом неравномерного по длине износа контактного провода и арматуры контактной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года. «Белая книга» / ОАО «РЖД». М.: ОАО «РЖД», 2015. 68 с.
2. Батрашов А.Б. Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесках постоянного тока // Известия Транссиба. 2017. № 4. С. 54–67.
3. Паранин А.В. Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 6. С. 33–38.

4. Марский В.Е. Определение нагрузочной способности контактных подвесок постоянного тока и их элементов // Новое в хозяйстве электроснабжения: сб. тр. ВНИИЖТ / под ред. А.Б. Косарева. М.: Интекст, 2003. С. 123–127.

5. Расчет электротехнических параметров контактной сети. Схемные и конструктивные решения по контактной сети участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург / АО «Универсал — контактные сети». СПб., 2016. 105 с.

6. Bahrami M., Culham J.R., Yovanovich M.M. Modeling thermal contact resistance: a scale analysis approach // Journal of Heat Transfer. 2004. № 126. P. 896–905.

7. Shojafard M., Ghaffarpour M., Noorpoor A. Thermal contact analysis using identification method // Heat Transfer Engineering. 2008. № 29 (1). P. 85–96.

8. Fieberg C., Kneer R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. № 51. P. 1017–1023.

9. A model regarding electrical contacts in advance degradation / C.G. Aronis [et al.] // International Journal of Modelling and Simulation. 2006. № 26. P. 169–173.

10. Karagiannopoulos C.G., Psomopoulos C.S., Bourkas P.D. A theoretic and experimental investigation in stationary electric contacts // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2001. № 9. P. 181–192.

11. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera [et al.]. 7th ed. NJ: John Wiley & Sons, 2011. 1050 p.

12. Bejan A. Convection Heat Transfer. 4th ed. NJ: John Wiley & Sons, 2013. 658 p.

13. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАРАНИН Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение транспорта», ФГБОУ ВО УрГУПС

БАТРАШОВ Андрей Борисович, аспирант, кафедра «Электроснабжение транспорта», ФГБОУ ВО УрГУПС

Статья поступила в редакцию 15.05.2018 г., принята к публикации 28.07.2018 г.

Validation of mathematical model of electrothermal calculation of DC catenary on the basis of scale model

A.V. PARANIN, A.B. BATRASHOV

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Ural State University of Railway Transport" (FGBOU VO UrGUPS), Ekaterinburg, 620034, Russia

Abstract. The article compares the results of calculation of the finite element simulation of current and temperature distribution in the scale model of the DC catenary with the data of laboratory tests. Researches were carried on various versions of the structural design of catenary model, reflecting the topological features of the wire connection, characteristic of the DC contact network. The proportions of the cross-sectional area of the scaled model wires are comparable to each other with the corresponding values for real DC catenary.

The article deals with the operating conditions of the catenary model in the modes of transit and current collection. When studying the operation of the scale catenary model in the transit mode, the effect of the structural elements on the current distribution and heating of the wires was obtained. Within the framework of the scale model, theoretical assumptions about the current overload of the supporting cable near the middle anchoring have been confirmed. In the current collection mode, the experimental dependences of the current in the transverse wires of the scale model are obtained from the coordinate of the current collection point.

Using the model it was experimentally confirmed that in the section of the contact wire with local wear, not only the temperature rise occurs but also the current redistribution due to the smaller cross section. Thus, the current share in other longitudinal wires of the scale model increases and their temperature rises.

Scale and mathematical models are constructed with allowance for laboratory clamps and supporting elements that participate in the removal of heat from the investigated wires.

Obtained study results of the scale model allow to draw a conclusion about the adequacy of the mathematical model and its correspondence to the real physical process. These conclusions indicate the possibility of applying mathematical model for calculating real catenary, taking into account the uneven contact wear wire and the armature of the contact network.

Keywords: current distribution; catenary; direct current; finite element method; average anchoring; temperature distribution; transit of traction current; scale model

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-4-222-229>

REFERENCES

1. Strategy of scientific and technical development of the holding "Russian Railways" for the period until 2020 and the prospect until 2025. "White Paper" of the JSC "Russian Railways". Moscow, JSC "RZD" Publ., 2015, 68 p. (in Russ.)
2. Batrashov A. B. *Sravnenie modeley tokoraspredeleniya v kontaktnykh podveskakh postoyannogo toka* [Comparison of current distribution models in DC catenary]. *Izvestiya Transsiba*, 2017, no. 4, pp. 54–67.
3. Parani A. V. *Raschet raspredeleniya toka i temperatury v kontaktnoy podveske postoyannogo toka na osnove metoda*

konechnykh elementov [Calculation of the distribution of current and temperature in the DC catenary on the basis of the finite element method]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2015, no. 6, pp. 33–38.

4. Marskiy V. E., Kosarev A. B. *Opreделение nagruzochnoy sposobnosti kontaktnykh podvesok postoyannogo toka i ikh elementov*. Sb. tr. VNIIZhT [Determination of the load capacity of DC catenary and its elements]. *Novoe v khozyaystve elektrosnabzheniya* [New in the electricity supply business. Proc. of the VNIIZhT]. Moscow, Intext Publ., 2003, pp. 123–127.

5. *Raschet elektrotekhnicheskikh parametrov kontaktnoy seti. Skhemnye i konstruktivnye resheniya po kontaktnoy seti uchastka Moskva – Kazan' vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali Moskva – Kazan' – Ekaterinburg* [Calculation of electrical parameters of the contact network. Schematic and constructive solutions for the contact network of the Moscow – Kazan section of the Moscow – Kazan – Ekaterinburg high-speed railway]. AO "Universal – kontaktnye seti" [JSC "Universal – contact networks"]. St. Petersburg, 2016, 105 p.

6. Bahrami M., Culham J. R., Yovanovich M. M. *Modeling thermal contact resistance: a scale analysis approach*. *Journal of Heat Transfer*, 2004, no. 126, pp. 896–905.

7. Shojafard M., Ghaffarpour M., Noorpoor A. *Thermal contact analysis using identification method*. *Heat Transfer Engineering*, 2008, no. 29 (1), pp. 85–96.

8. Fieberg C., Kneer R. *Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, no. 51, pp. 1017–1023.

9. Aronis C. G. [et al.]. *A model regarding electrical contacts in advance degradation*. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2006, no. 26, pp. 169–173.

10. Karagiannopoulos C. G., Psomopoulos C. S., Bourkas P. D. *A theoretic and experimental investigation in stationary electric contacts*. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2001, no. 9, pp. 181–192.

11. Incropera F. P. [et al.]. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. NJ: John Wiley & Sons, 2011, 1050 p.

12. Bejan A. *Convection Heat Transfer*. 4th ed. NJ: John Wiley & Sons, 2013, 658 p.

13. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander V. PARANIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport power supply", FGBOU VO UrGUPS

Andrey B. BATRASHOV,

Post-graduate, Department "Transport power supply", FGBOU VO UrGUPS

Received 15.05.2018

Accepted 28.07.2018

■ E-mail: andreybatrashov@gmail.com (A. B. Batrashov)