

УДК 621.332.3

Канд. техн. наук А. В. ПАРАНИН

Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов

Аннотация. Предложена конечно-элементная модель распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока, изложены основные принципы ее построения. Проанализированы существующие методики расчета токораспределения и нагрева проводов контактной подвески, отмечены их недостатки.

На основании данных расчета распределения тока и температуры для нескольких типовых конструкций контактных подвесок постоянного тока, широко применяемых на сети железных дорог, рассмотрены характерные токовые и тепловые режимы работы основных конструктивных элементов: контактного провода, несущего троса, усиливающего провода, тросов средней анкеровки, проводов электросоединителей, струн. Это сделано в двух различных случаях — транзит тягового тока вдоль анкерного участка и проход токоприемника по нему со съемом тягового тока. На базе анализа результатов показаны слабые места в контактной подвеске и предложен способ их нейтрализации.

Ключевые слова: контактная подвеска; анкерный участок; распределение тока; распределение температуры; метод конечных элементов; транзит тягового тока; проход токоприемника

Введение. В настоящее время с учетом активно-го развития тяжеловесного и скоростного движения на электрифицированных железных дорогах токовые нагрузки на контактную подвеску возрастают. Это приводит к повышенному нагреву проводов и зажимов контактной сети, увеличению электродуговых повреждений, включая электромеханический износ струн. Повышенный нагрев может вызвать рекристаллизационный отжиг проводов, ускоряет их тепловое старение и приводит к разрегулировке контактной подвески. Особенно остро эта проблема встает для контактной подвески постоянного тока 3 кВ.

Следует отметить, что на участках сети ОАО «РЖД», где вводится тяжеловесное движение, могут использоваться как современные (типа КС-160), так и устаревшие типы контактных подвесок. Это в свою очередь влияет на процессы токораспределения и нагрева контактной подвески.

Принято считать, что в контактной подвеске постоянного тока вдали от токоприемника тяговый ток распределяется между контактным проводом (КП), несущим тросом (НТ) и усиливающим проводом (УП) обратно пропорционально их погонному сопротивлению. При нахождении вблизи токоприемника происходит перераспределение тягового тока — часть

его, протекающая по НТ и УП, через провода электросоединителей (ПС) и струны стекает в контактный провод и далее снимается ползком [1, 2]. С учетом определенных допущений (не учитываются струны, упрощается топология подвески и т. д.) были выведены аналитические зависимости тока в ПС, КП, НТ, УП от времени и прочих исходных данных при прохождении токоприемника. На основе этих зависимостей и с учетом дополнительных упрощений (теплоотдача конвекцией и лучеиспусканием одним коэффициентом, не учитывается солнечная радиация и поток тепла по длине провода) были получены формулы для расчета температуры проводов при заданном токе токоприемника, межпоездном интервале и прочих параметрах. В работе [3] расчет данных процессов произведен путем применения специальной программы, в которой задается геометрия и параметры контактной подвески, положение и величина тока, снимаемого токоприемником, а также учитываются струны, средние анкеровки (СА) и рессорные тросы (РТ). При этом расчет происходит в статике при неподвижном токоприемнике. При определении температуры также используются описанные выше упрощения.

Построение конечно-элементной модели. В последние 20 лет для механических расчетов контактной подвески как системы с бесконечным числом степеней свободы широко используется метод конечных элементов (МКЭ)[4, 5, 6]. Метод универсален и может применяться в том числе для расчета распределения тока и температуры в контактной подвеске. При отсутствии токосъема с поверхности провода температура в его поперечном сечении практически одинакова [7]. В противном случае для контактных проводов при большой величине снимаемого тока и малом контактном нажатии температура контактных пятен на рабочей поверхности может достигать температуры плавления, в то время как в нескольких миллиметрах от данного места металл не успевает нагреться [8, 9]. В крайнем случае это приводит к выгоранию пятен контакта и образованию дуги, что вызывает повышенный износ КП и токосъемных пластин [10]. Этот процесс предлагается учитывать в рамках отдельной конечно-элементной модели. В связи с этим провод будем считать одномерным объектом, у которого расчетные

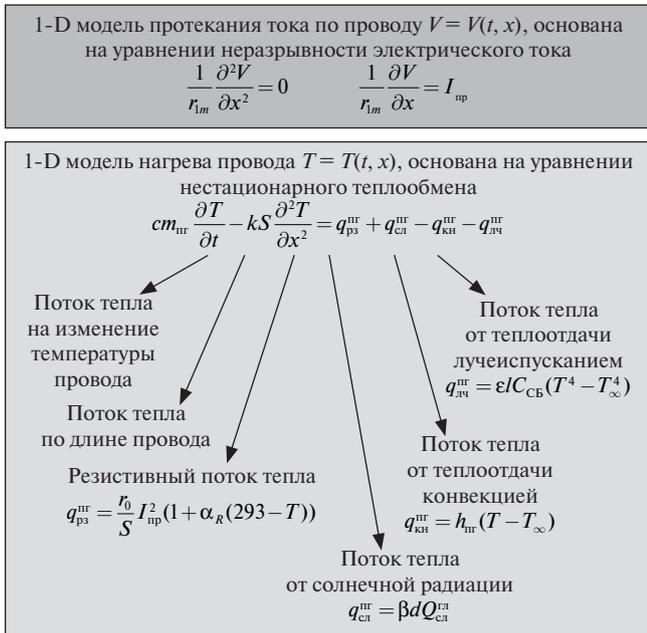


Рис. 1. Одномерная модель распределения электрического потенциала и температуры в проводе:
 c — теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К); m_{np} — погонная масса провода, кг/м; k — теплопроводность материала провода, Вт/(м·К); S — площадь поперечного сечения провода, м²; r_0 — удельное электрическое сопротивление материала провода при 293 К, Ом·м; I_{np} — ток, протекающий в проводе, А; α_R — температурный коэффициент сопротивления, 1/К; β — коэффициент поглощения солнечной радиации поверхностью провода; d — диаметр провода, м; Q_{cl}^{pr} — суммарный поверхностный поток солнечной радиации, Вт/м²; h_{np} — погонный коэффициент конвективного охлаждения провода, Вт/(м·К); T_∞ — температура окружающего удаленного воздуха, К; ϵ — коэффициент черноты поверхности провода; l — периметр поперечного сечения провода, м; C_{cb} — постоянная Стефана — Больцмана; r_{lm} — погонное сопротивление провода, Ом/м

функции — электрический потенциал $V = V(t, x)$ и температура $T = T(t, x)$ — изменяются только во времени t и по длине провода x . Математическая модель,

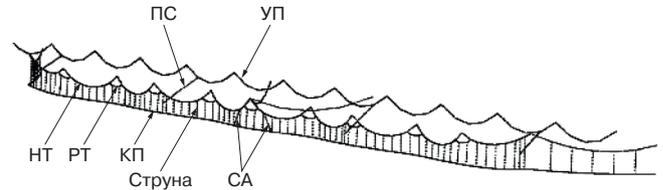


Рис. 2. Расчетная сетка:
 КП — контактный провод; НТ — несущий трос; УП — усиливающий провод; РТ — рессорный трос; СА — средняя анкеровка; ПС — поперечный электросоединитель

описывающая распределение искомых функций в проводе, представлена на рис. 1.

Погонный коэффициент конвективного охлаждения h_{np} определяется скоростью ветра, температурой воздуха и формой провода. Свойства материала провода r_0 , r_{lm} , c и k зависят от температуры, поэтому электрические и тепловые процессы в рамках данной модели взаимосвязаны. Кроме этого, охлаждение за счет конвекции и лучеиспускания зависит от температуры в каждой точке провода в каждый момент времени. Данная математическая модель была введена в программный комплекс COMSOL Multiphysics в режиме пользовательской записи дифференциальных уравнений. Геометрия контактной подвески задается в натуральном масштабе и представляет собой трехмерный набор отрезков. Каждый отрезок — это кусок конкретного провода (КП, НТ, струны и т. д.), отрезки соединяются в узлах. Для каждого отрезка вводятся все необходимые параметры провода. Кроме этого, задаются граничные (величина втекающего в узел тока, потенциал узла и т. п.) и начальные условия. Расчетная сетка показана на рис. 2. Количество степеней свободы для рассматриваемых примеров составляло от 25 до 50 тысяч.

Результаты моделирования и их анализ. При расчетах были выбраны наиболее распространенные марки проводов контактной подвески постоянного

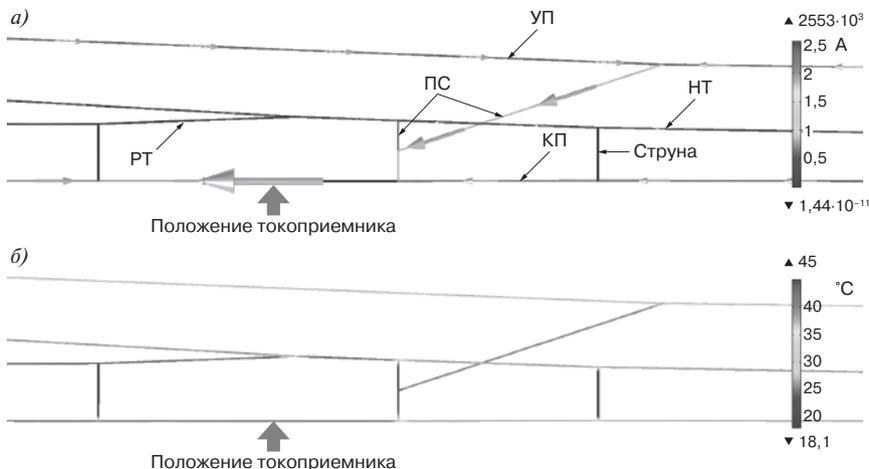


Рис. 3. Эпюры распределения тока (а) и температуры (б) в контактной подвеске с РТ при прохождении токоприемника вблизи ПС в момент времени $t = 17$ с от начала расчета: обозначения — см. рис. 2

тока, применяемые на участках с тяжеловесным движением: КП — 2МФ-100, НТ — М-120, УП — 2А-185, СА — ПБСМ-95, ПС — 2М-95 и М-95, РТ — БСМ-6,0, струны звеньевые — БСМ-4,0. Условия окружающей среды: температура воздуха 20 °С, скорость ветра 1 м/с, барометрическое атмосферное давление 760 мм рт. ст., солнечная радиация отсутствует. Рассматривается два случая: первый — транзит тягового тока 3500 А через анкерный участок, второй — проход токоприемника по нему со скоростью 40 км/ч при снимаемом токе 3500 А, что соответствует электровозу 2ЭС10 в режиме часовой мощности. При расчетах с заданным шагом вывода по времени становится известным распределение потенциала, тока и температуры в любом проводе контактной подвески. Результаты могут быть наглядно представлены в виде эпюр (рис. 3). Серыми стрелками (см. рис. 3, а) показано направление тока в проводах, размер стрелки пропорционален величине тока.

Вначале более подробно рассмотрим случай транзита тягового тока через анкерный участок для двух вариантов контактной подвески: первый — компенсированная подвеска с РТ, второй — полукompенсированная подвеска с разнесенными струнами. Марки проводов в обоих вариантах одинаковы и указаны выше. Результаты отражены в графиках на рис. 4.

Принято считать, что при системе электроснабжения постоянного тока транзитный тяговый ток распределяется между КП, НТ, УП обратно пропорционально их погонному сопротивлению по всей длине анкерного участка. Однако из рис. 4 видно, что есть участки, где это не так. Наибольшее отклонение от данной пропорции наблюдается в районе СА. Трос СА перенаправляет часть тока из КП в НТ. В результате в компенсированной подвеске на участке между левым и правым тросом СА наблюдается повышенная плотность тока и температура в НТ. При полукompенсированной подвеске данная область повышенного нагрева НТ расположена слева и справа от V-образного троса СА. Ток в НТ из КП втекает по ближайшим перед СА струнам. Следует также отметить, что РТ шунтирует собой НТ (рис. 4, а). В результате вблизи опор плотность тока и температура НТ понижены. В целом распределение тока и температуры в подвеске с

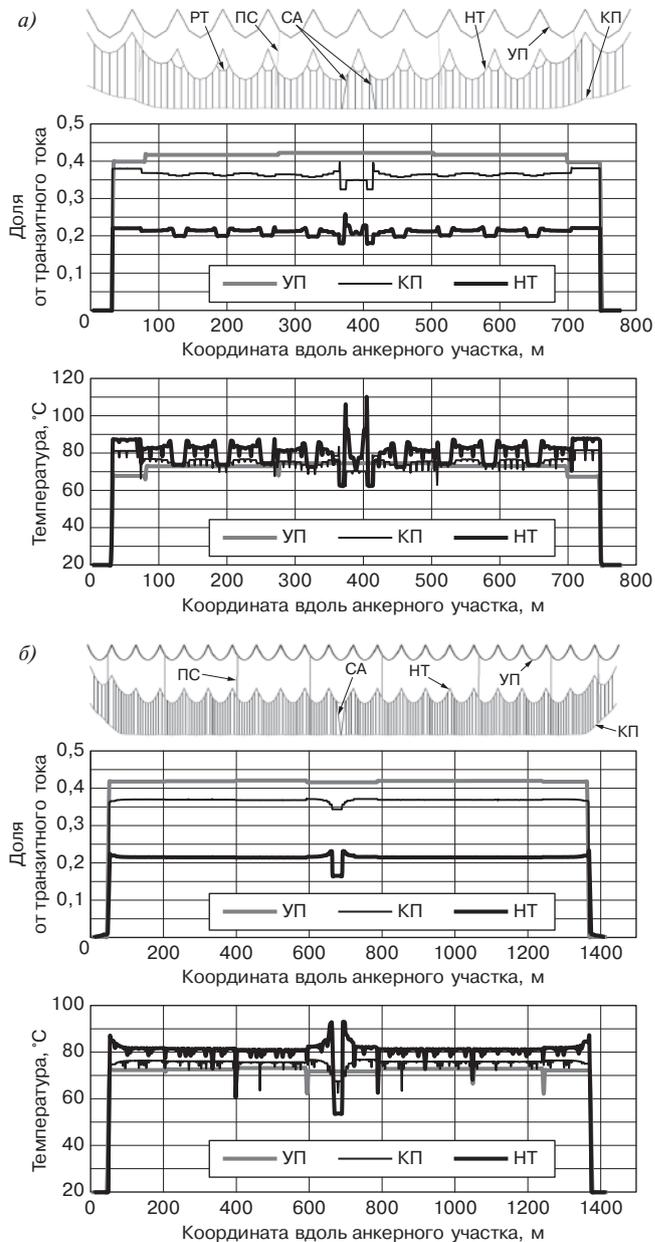


Рис. 4. График зависимости долей транзитного тока и температуры в НТ, КП, УП от координаты вдоль анкерного участка в момент времени $t = 1200$ с от начала расчета:
 а — компенсированная подвеска с РТ; б — полукompенсированная подвеска с разнесенными струнами; другие обозначения — см. рис. 2

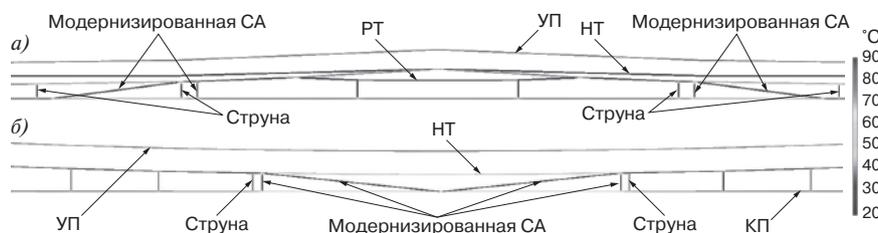


Рис. 5. Эпюры распределения температуры вблизи модернизированной СА при транзите тягового тока в момент времени $t = 1200$ с от начала расчета:
 а — компенсированная контактная подвеска; б — полукompенсированная контактная подвеска; другие обозначения — см. рис. 2

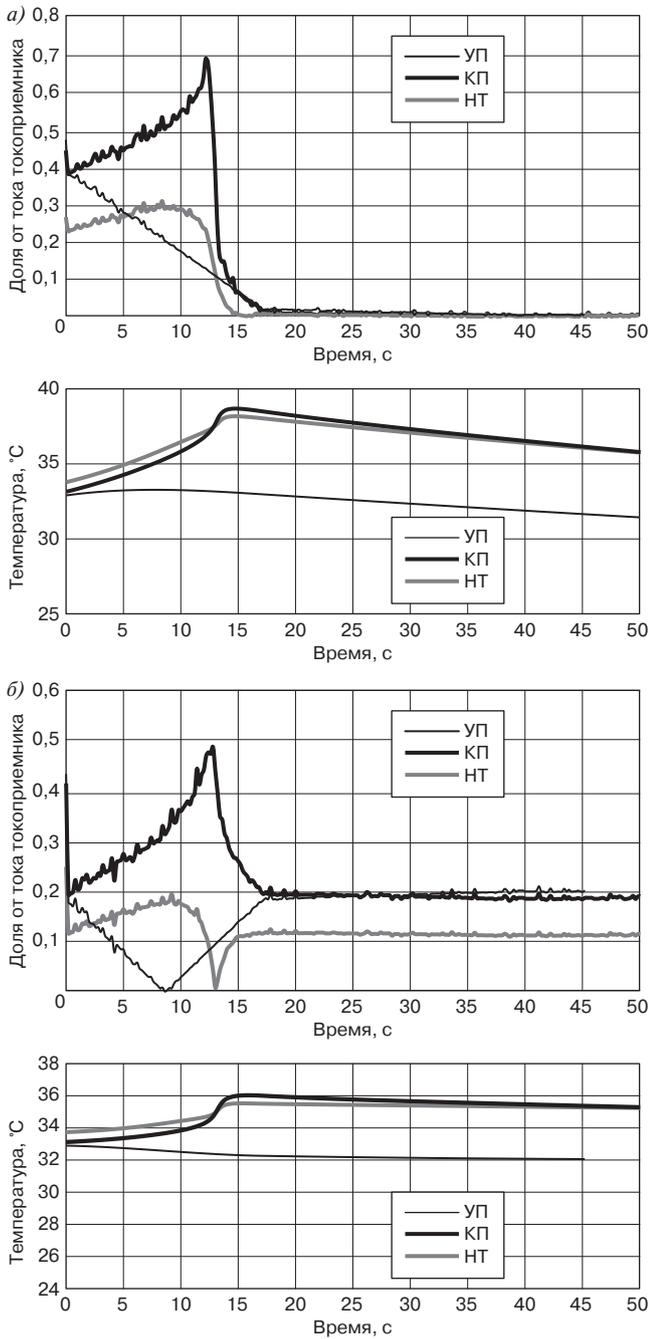


Рис. 6. График зависимости доли тока, текущего в проводе, от тока токоприемника и температуры в НТ, КП, УП в середине второго промежуточного пролета от времени при проходе ЭПС по анкерному участку:
 а — весь тяговый ток к анкерному участку поступает справа; б — половина тягового тока к анкерному участку поступает слева, а другая половина — справа; другие обозначения — см. рис. 2

РТ более неравномерное, чем в подвеске с разнесенными струнами.

Впервые опасную с точки зрения нагрева зону НТ вблизи СА у компенсированной подвески обнаружил В. Е. Марский. Для устранения этого явления в работе [3] предлагается сделать шунтирование НТ на

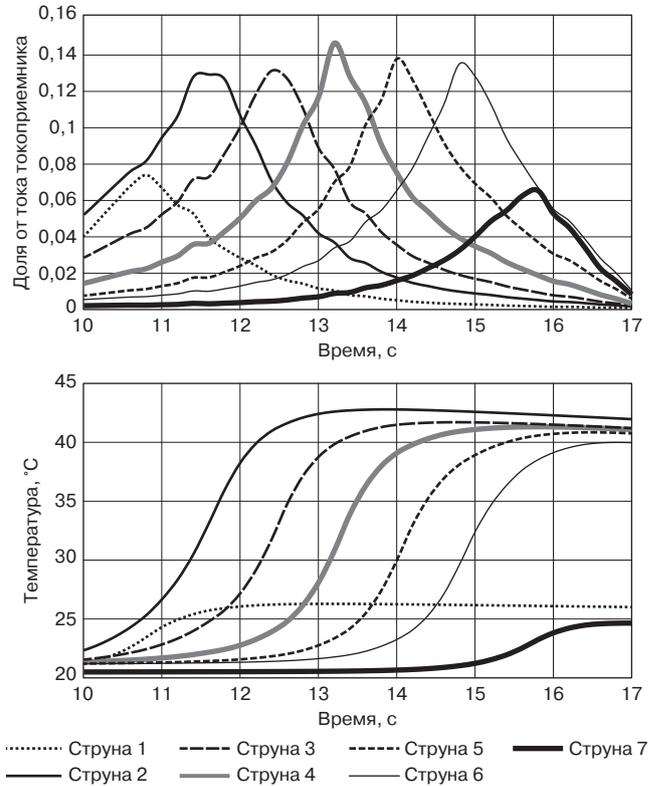


Рис. 7. График зависимости долей транзитного тока в струнах и средней по ее длине температуры от времени при проходе ЭПС по анкерному участку: обозначения — см. рис. 2

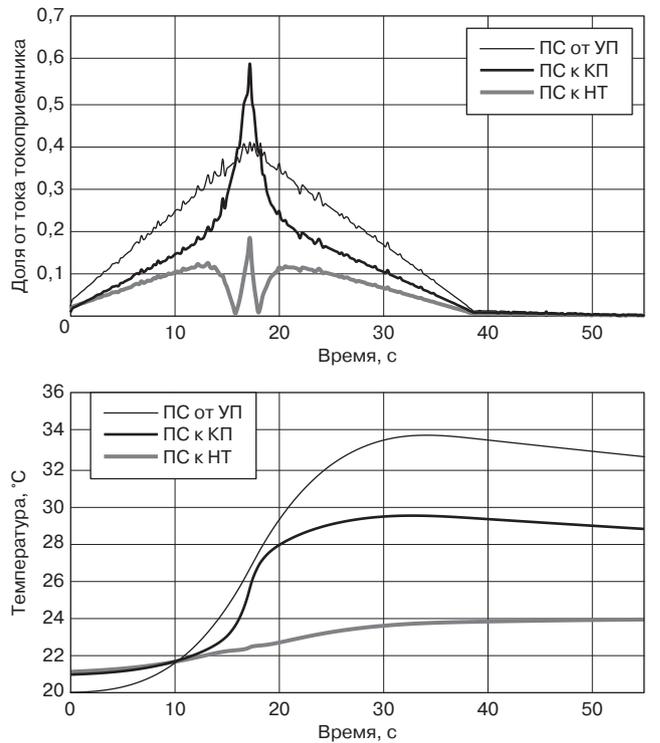


Рис. 8. График зависимости доли тока, текущего в трех элементах ПС, от тока токоприемника и средней по длине температуры данных элементов от времени при проходе ЭПС по анкерному участку: обозначения — см. рис. 2

участке между левым и правым тросом СА. Автором данной статьи предлагается вместо этого модернизировать трос СА для обоих подвесок: продолжить его после крепления на НТ спуском вниз с подключением на КП. При такой конструкции трос СА образует вместе с участком КП петлю (рис. 5). В результате максимальная температура НТ вблизи модернизированной СА превышает при заданных условиях среднюю его температуру по анкерному участку не более чем на 5 °С. При стандартной конструкции СА это превышение доходит до 20–25 °С.

При проходе токоприемника наблюдается нестационарный характер токораспределения в анкерном участке (рис. 6). Большая часть перераспределения тягового тока в контактной подвеске происходит на участке, ограниченном двумя соседними ПС, между которыми находится токоприемник.

В результате при прохождении токоприемника температура в КП и НТ кратковременно возрастает, а в УП практически не изменяется вследствие характера токораспределения и тепловой инерции. При прохождении токоприемника по участку подвески, ограниченному соседними ПС, ток в УП уменьшается вплоть до нуля. При рассматриваемых условиях это время мало, и УП не успевает существенно охладиться. В целом аналогичный характер процессов токораспределения и нагрева будет наблюдаться при использовании УП марки М-120. Можно сказать, что «тепловая волна» при движении токоприемника распространяется в первую очередь по КП, во вторую — по НТ. Это несколько отличается от модели токораспределения, описываемой в [2]. Характер данного процесса зависит от расположения ПС, марки проводов контактной подвески и в значительной степени от соотношения тока электроподвижного состава (ЭПС), который поступает к анкерному участку слева и справа. При равномерном поступлении тока слева и справа к анкерному участку величина «тепловой волны» не превышает 3–4 °С даже при тяжеловесном движении (проход 2ЭС10 в режиме часовой мощности с одним поднятым токоприемником). При поступлении тока к анкерному участку с одной стороны величина «тепловой волны» в 2–2,5 раза больше. Близкое к равностороннему поступление тока ЭПС к анкерному участку имеет место в центральной части фидерной зоны при двустороннем ее питании, а одностороннее поступление — при консольном питании и для первого анкерного участка от точки подключения фидера при раздельной схеме соединения.

По струнам, близким к СА, малый ток протекает также при транзите тягового тока по анкерному участку, но не вызывает их существенного нагрева. В основном по проводам ПС и струнам протекает ток и происходит их нагрев в момент прохода токоприемника

(рис. 7 и 8). Графики этих токов от времени близки по форме к треугольному импульсу.

Как видно из рис. 7, учитывать ток в струне необходимо, когда токоприемник находится от струны на расстоянии, не превышающем половины длины пролета. При расположении ПС в каждом третьем пролете максимальная величина тока в струне составляет 14% тока токоприемника, при расположении ПС в каждом втором пролете — около 10%. В последнем случае нагрев струн уменьшается почти в два раза. Пиковый ток в подвесочных струнах (струна 1 и 7) меньше аналогичной величины в обычных струнах на 45%, а нагрев — в 4 раза.

Нагрев и протекание тока в ПС происходят в тот промежуток времени, когда токоприемник находится на участке между данным и соседним ПС. Наиболее нагрет элемент ПС, идущий от УП, наименее — идущий к НТ. Однако нагрев ПС примерно на 40% меньше, чем нагрев струн. Стоит также отметить, что ток в элементе ПС, идущем к НТ, меняет направление протекания (см. рис. 8). На рис. 7 и 8 показан только отрезок времени, при котором струны и ПС нагреваются при прохождении токоприемника, далее они медленно остывают до проезда следующего ЭПС.

Вывод. Рассмотренная математическая модель распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока наиболее точно воспроизводит реальные условия эксплуатации, но в то же время является наиболее сложной для реализации и требует соответствующей вычислительной мощности и программного обеспечения. Тем не менее при современном развитии компьютерной техники последнее не является существенной проблемой. С помощью данной модели как при транзите тягового тока, так и при проходе токоприемника можно определить ток и нагрев каждого провода контактной подвески. В перспективе это предоставит возможность анализировать конструкцию и находить «слабые места» по нагреву, определять границы допустимых режимов эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А.В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09. М.: ЦНИИ МПС, 1946. 143 с.
2. Костюченко К.Л. Новые узлы механических и электрических соединений проводов контактной сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 1994. 112 с.
3. Марский В.Е. Определение нагрузочной способности контактных подвесок постоянного тока и их элементов // Новое в хозяйстве электроснабжения / под ред. А.Б. Косарева. М.: Интекст, 2003. С. 123–127.
4. Кудряшов Е.В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно-элементных моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб, 2010. 162 с.
5. Collina A. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction / A. Collina, S. Bruni // Vehicle System Dynamics. 2002. Vol. 38, №4. P. 261–291.

6. J. Pombo. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains // *J. Ambrósio // Computers & Structures*. 2013. Vol. 124. P. 88 – 101.

7. Паранин А.В. Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети на основе метода конечных элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Екатеринбург, 2011. 158 с.

8. Паранин А.В., Ефимов А.В., Ефимов Д.А. Моделирование чистого контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной в статике методом конечных элементов // *Известия Транссиба*. 2014. № 1. С. 57 – 67.

9. Costica Nituca. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph – catenary system power supply of electric vehicles // *Power Systems Research*. 2013. Vol. 96. P. 211 – 217.

10. G.X. Chen. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current / H.J. Yang, W.H. Zhang, X. Wang, S.D. Zhang, Z.R. Zhou // *Tribology International*. 2013. Vol. 61. P. 88 – 94.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПАРАНИН Александр Викторович,
доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», Уральский государственный университет путей сообщения.
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 60.
Тел.: (343) 221-24-78.
E-mail: alks84@mail.ru

Finite-Element Model Based Distribution Calculations of Current and Temperature within a DC Overhead Catenary

Alexander V. Paranin, Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Chair of Electric Power Supply on Transport, Ural State University of Railway Transport (UrGUPS). 60, Kolmogorov str., 620034 Yekaterinburg, Russian Federation. Tel.: +7 (343) 221 2478. E-mail: alks84@mail.ru

Abstract. There is proposed finite-element model of current/temperature distribution in a DC overhead catenary and are described basic principles of its generation. The author analyzes existing calculation procedures of the current distribution/catenary wire heating and highlights their limitations.

Based on the calculation results there are discussed typical current modes and thermal conditions of the key design components of DC catenary design versions enjoying wide application on railway transport (such as contact wire, catenary messenger, line feeder, Z-type anchor, electrical connectors and droppers). Two cases are analyzed, inclusive of traction current transit along the constant tension section and current pick-off by current collector passing along this section. On the basis of analysis there are indicated structural weakness areas of the catenary and is proposed method for their neutralization.

Keywords: overhead catenary; constant tension section; current distribution; temperature distribution; finite-element method; traction current transit; current collector passage

References

1. Voronin A.V. *Tokoraspredelenie mezhdru prodol'nymi provodami kontaktной seti i teplovoy raschet ee elementov*. Kand. tekhn. nauk. diss. [Current distribution between the longitudinal wires of catenary system and thermal calculation of its elements. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, All-Union Cent. Res. Inst. of Railway Transport Publ., 1946. 143 p.

2. Kostyuchenko K.L. *Novye uzly mekhanicheskikh i elektricheskikh soedineniy provodov kontaktной seti*. Kand. tekhn. nauk. diss. [New components of mechanical and electrical connections of the catenary system wires. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1994. 112 p.

3. Marskiy V.E. *Opredelenie nagruzochnoy sposobnosti kontaktных podvesok postoyannogo toka i ikh elementov* [Deter-

mining load capacity of DC overhead lines and their components]. *Novoe v khozyaystve elektrosnabzheniya* [New in the power supply sector]. Moscow, Intext Publ., 2003, pp. 123 – 127.

4. Kudryashov E.V. *Sovershenstvovanie mekhanicheskikh raschetov kontaktных podvesok na osnove staticheskikh konechno elementnykh modeley*. Kand. tekhn. nauk. diss. [Improving the mechanical calculation of overhead lines based on static finite element models. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2010. 162 p.

5. Collina A., Bruni S. *Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction*. *Vehicle System Dynamics*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 261 – 291.

6. Pombo J., Ambrósio J. *Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains*. *Computers & Structures*, 2013, vol. 124, pp. 88 – 101.

7. Paranin A.V. *Sovershenstvovanie aerodinamicheskikh i teplovoykh raschetov provodov kontaktной seti na osnove metoda konechnykh elementov*. Kand. tekhn. nauk. diss. [Improving the aerodynamic and thermal calculations of catenary wires on the basis of the finite element method. Cand. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2011. 158 p.

8. Paranin A.V., Efimov A.V., Efimov D.A. *Modelirovanie chistogo kontakta mezhdru kontaktным provodom i tokos'emnoy plastinoy v statike metodom konechnykh elementov* [Modeling clean contact between the contact wire and collector strip with static finite element methods]. *Izvestiya Transsiba*, 2014, no. 1 (17), pp. 57 – 67.

9. Nituca C. *Thermal analysis of electrical contacts from pantograph – catenary system power supply of electric vehicles*. *Power Systems Research*, 2013, vol. 96, pp. 211 – 217.

10. Chen G.X., Yang H.J., Zhang W.H., Wang X., Zhang S.D., Zhou Z.R. *Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current*. *Tribology International*, 2013, vol. 61, pp. 88 – 94.