УДК 621.336

О. А. СИДОРОВ, С. А. СТУПАКОВ, В. М. ФИЛИППОВ, А. А. ОРЛОВ,
Б. М. МОСКАЛЮК (ОМГУПС)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», пр. Маркса, 35, Омск, Россия, 644046, тел. +7(3812)31-34-46, эл. почта: sidorovoa@omgups.ru

К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ ПАР ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Создание высокоскоростного электрического транспорта является одним из путей повышения провозной и пропускной способности железнодорожных магистралей. Для обеспечения бесперебойной работы электроподвижного состава нового поколения необходимо создание устройств токосъема, которые должны отвечать требованиям надежной и качественной передачи электроэнергии, а также отличаться от существующих повышенным сроком службы.

В связи с этим при проектировании устройств токосъема необходимо учитывать возможные параметры их эксплуатации и факторы, влияющие на качество токосъема. Контактная пара устройства токосъема обеспечивает передачу подвижному составу тягового тока, что вызывает усиленный электромеханический износ ее элементов. Одним из факторов, существенно ускоряющих процесс изнашивания элементов контактной пары, является термическое действие электрического тока.

В рамках проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема» (договор № 13.G25.31.0034 от «07» сентября 2010 г.), реализуемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, выполнялись экспериментальные исследования созданного образца магистрального токоприемника для высокоскоростного подвижного состава. Один из пунктов методики исследований посвящен электромеханическому изнашиванию контактных вставок (КВ) токоприемника.

Однако реализация методики экспериментальных исследований изнашивания требует значительных затрат времени и ресурсов. Для сокращения объема экспериментальных исследований создана математическая модель, позволяющая выполнять оценку влияния на износ КВ параметров эксплуатации (в т. ч. термического действия электрического тока), а также факторов окружающей среды.

Формирование математической модели выполнялось по двум направлениям [1]: модель механического изнашивания КВ (от контактного нажатия) и модель электрического изнашивания (от электрического тока). Созданная модель позволяет учитывать влияние на электромеханический износ контактных элементов электроэрозии, изменения физико-механических свойств материалов контактной пары, а также шероховатости поверхностей элементов [2]. Входными данными для моделирования являются сведения о физико-механических и химических свойствах материалов, о геометрических размерах и форме элементов, а также об условиях эксплуатации устройств токосъема.

Функциональная зависимость между механической составляющей I_M модели изнашивания и факторами модели описана в работе [3] и имеет вид:

$$I_M = \psi_2(P, v, t, r, Cu, H_1/H_2, \lambda_1, c_2), \quad (1)$$

где P – контактное нажатие; v – скорость скольжения; t – время испытаний; r – характерный линейный размер; Cu – содержание меди в элементе контактной пары; H_1/H_2 – безразмерный симплекс (отношение твердостей); λ_1 – теплопроводность материала контактного элемента; c_2 – удельная теплоемкость токопровода.

Анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных при различных параметрах окружающей среды, подтвердил необходимость внесения в модель критериев, учитывающих состояние окружающей среды – влажности и запыленности, а также критерия, учитывающего влияния силы трения в скользящем контакте [4]. Кроме этого, необходимо учитывать влияние температуры элементов контактной пары на фактическую площадь контакта и на их твердость.

© Сидоров О.А. и др., 2013

В уравнении (1) в соответствии с положениями теории подобия в соответствующие критерии были объединены следующие факторы:

– контактное нажатие, удельная теплоемкость, теплопроводность;

– скорость скольжения, время испытания.

В качестве симплексов использованы твердости элементов пары трения, содержание меди в материале элемента пары, влажность и запыленность окружающей среды.

Согласно π-теореме число безразмерных комбинаций комплексов и симплексов равно разности между количеством физических величин и основных единиц размерности, т. е. k = Ф – n = 11 – 4 = 7. Таким образом, получено уравнение (2):

$$I_M(P) = a_0 \cdot Me \cdot \left(\frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \rho_1 c_1(T_i, T_n)\chi} \right)^{\alpha_m} \left(\frac{vt}{r(T_{I_h})} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \left(\frac{\varphi_0}{\varphi_1} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa_1} \right)^{\omega_m}, \quad (11)$$

где a_0 – постоянная, отражающая влияние на процесс неучтенных факторов; α_m, β_m, χ_m, ε_m, λ_m, ω_m – коэффициенты, определяемые экспериментально; $Ptc_2/(r^2 \rho_1 c_1 \chi)$ – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а контактного элемента – передавать тепло); c_2 – удельная теплоемкость токопровода; vt/r – отношение пути трения к коэффициенту поверхности контактного элемента; $T_{I_h} = a \cdot T_i^{\alpha_T} + b \cdot (\partial T_i / \partial z)^{\beta_T}$ – коэффициент влияния температурного градиента на интенсивность изнашивания (a, b – экспериментальные коэффициенты, α_T, β_T – критерии, характеризующие тепловые процессы при взаимодействии элементов контактной пары); $\partial T_i / \partial z$ – градиент температуры элемента контактной пары по нормали z к его поверхности; T_n – температура n-го тела; T_i – температура i-го тела; $Me \equiv \frac{T_i \lambda_1}{r f_т p v}$ – критерий Мейера (pv – мощность трения (с учетом коэффициента распределения тепловых потоков), $f_т$ – коэффициент трения); ϕ_0 / ϕ_1 – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований, κ_0 / κ_1 – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности на момент исследований.

Тепловые процессы в элементах контактной пары устройства токосъема описываются математически системой дифференциальных уравнений Пуассона в частных производных. Тепловое состояние n-го тела описывается следующим дифференциальным уравнением теплового баланса [5]:

$$c_n \frac{dT_n}{dt} = \left(- \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) T_n + \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} (\Lambda_{in} T_i) + \sum \Delta UI_n, \quad (3)$$

где c_n – теплоемкость n-го тела; n – количество тел, связанных в тепловом отношении с телом n; Λ_{in} – теплоотдача от i-го тела к n-му телу; $\sum \Delta UI_n$ – потери мощности n-го тела от протекания электрического тока; t – время.

Для КВ изменение теплоемкости в переходном процессе при движении подвижного состава описывается формулой:

$$c_1 = \frac{1}{T_{10}} \left(\Lambda_{13} + \Lambda_{3в} \right) \int T_1 dt + \frac{1}{T_{10}} \int \sum \left(\Lambda_{13} + \Lambda_{3в} \right) T_3 dt + \frac{\Delta UIt}{T_{10}}, \quad (4)$$

где $\Lambda_{in} = \alpha (T_n - T_i)$; α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha = \frac{m_1}{v} + m_2 v^{1/2}$; v – скорость встречного воздушного потока; v – скорость относительного перемещения контактного провода и контактной вставке по горизонтали, перпендикулярно оси пути; m_1, m_2 – коэффициенты, определяемые экспериментально. В уравнении (4) приняты следующие обозначения: 1 – КВ, 3 – полоз токоприемника, в – воздушный поток.

Изнашивание контактных пар устройств токосъема от воздействия электрического тока можно представить с помощью функциональной зависимости между такими факторами как дугостойкость материала; количество электричества, прошедшее через дугу; длина пути трения; контактное нажатие; комплекс, учитывающий изменение шерохо-

© Сидоров О.А. и др., 2013

ватости поверхностей; комплекс, учитывающий износ при токовой нагрузке без искрения [6]:

$$I_E = \psi_2(\gamma, Q, s, P, g, W_0, W_1, j) \qquad (5)$$

где γ – коэффициент дугостойкости материала, зависящий от рода тока, времени его протекания через контакт и полярности элемента контактной пары; Q – количество электричества, которое определяется средним значением тока дуги I, количеством искрений n и временем горения t; s – длина пути трения; P – контактное нажатие; g – коэффициент, характеризующий изнашивание материала вследствие повышения шероховатости поверхностей; W_0 – коэффициент износа от механической нагрузки (без тока); W_1 – коэффициент износа при токовой нагрузке без искрения; j – плотность тока.

Взаимодействие элементов контактной пары представляет собой динамический процесс, при котором возможны кратковременные потери контакта. Это приводит к возникновению дуги между элементами, термическое действие которой приводит к увеличению интенсивности изнашивания – возникает испарение материала с поверхностей контакта и увеличивается их шероховатость. Процесс изнашивания контактных пар при протекании через контакт электрического тока заключается во фреттинге пленок поверхностей и электролизе [7]. При этом изменение шероховатости поверхностей является функцией Q/s.

Окончательно с учетом влияния температуры элемента контактной пары от токовой нагрузки и параметров внешней среды запишем уравнение для определения электрической составляющей износа I_E:

$$I_E(P) = \left[\zeta_1 \cdot Bi \cdot \xi\left(\gamma, Q, T_{I_h}\right) + \zeta_2 \cdot \left(X_1 \cdot Me\right)^{k_1}\left(W_1(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \zeta_3 \cdot g\left(P, X_3, X_4, T_{I_h}, k_4\right)\sqrt{\frac{Q}{s}}\right)\right] \cdot \vartheta(F_{0i}, \varphi, \kappa), \qquad (6)$$

где $Bi = \dfrac{r\nabla T_i}{\Delta T_i}$ – критерий Био; $r\nabla T_i$ – перепад температуры по толщине контактного элемента; ΔT_i – температурный напор (разности температур материала КВ и окружающей среды); $\xi(\gamma, Q, T_{I_h})$ – интенсивность электроэрозионного износа, нелинейно зависящая от дугостойкости материала с учетом температурного градиента элемента контактной пары; $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ – масштабные коэффициенты; $X_1 = \left(\dfrac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \rho_1 c_1 \chi}\right)$ – комплекс, $X_3 = (Cu)^{\gamma_m}$, $X_4 = \left(\dfrac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})}\right)^{\varepsilon_m}$ – симплексы (см. уравнение (4)); k_1 – функционал, прямо пропорциональный по модулю величине контактного нажатия и логарифмически зависящий от рода тока и поляризации КВ; k_2 – функционал, обратно пропорциональный величине контактного нажатия и логарифмически зависящий от рода тока и поляризации КВ; k_3 – критерий, учитывающий род тока (переменный или постоянный) и полярность контактного элемента (анодно- или катоднополяризованный); k_4 – критерий, учитывающий содержание графита в материале; $\vartheta(F_{0i}, \phi, \chi)$ – функционал, характеризующий состояние окружающей среды (температуру, влажность, запыленность); $F_{0i} = \alpha t_i / (r(T_{I_h}))^2$ – критерий Фурье (α – коэффициент температуропроводности, t_i – время изменения внешних условий), устанавливающий соответствие между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри элемента контактной пары).

Таким образом, с учетом уравнений (2) и (6) можно получить итоговую зависимость изнашивания контактных пар с учетов влияния температуры:

$$I_h = I_M + I_E. \qquad (7)$$

На основании уравнения (7) можно построить зависимости величины износа от контактного нажатия и температуры. На рис. 1 приведена такая зависимость для металлокерамических вставок на железной основе ВЖ3П.

$$I_h = a_0 \cdot Me \cdot \left(\frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \rho_1 c_1(T_i, T_n)\chi}\right)^{\alpha_m}\left(\frac{\upsilon t}{r(T_{I_h})}\right)^{\beta_m}(Cu)^{\gamma_m}\left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})}\right)^{\varepsilon_m}\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_1}\right)^{\lambda_m}\left(\frac{\kappa_0}{\kappa_1}\right)^{\omega_m} +$$

$$+\left[\zeta_1 \cdot Bi \cdot \xi\left(\gamma, Q, T_{I_h}\right) + \zeta_2 \cdot \left(X_1 \cdot Me\right)^{k_1}\left(W_1(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \zeta_3 \cdot g\left(P, X_3, X_4, T_{I_h}, k_4\right)\sqrt{\frac{Q}{s}}\right)\right] \cdot \vartheta(F_{0i}, \varphi, \kappa).$$

© Сидоров О.А. и др., 2013

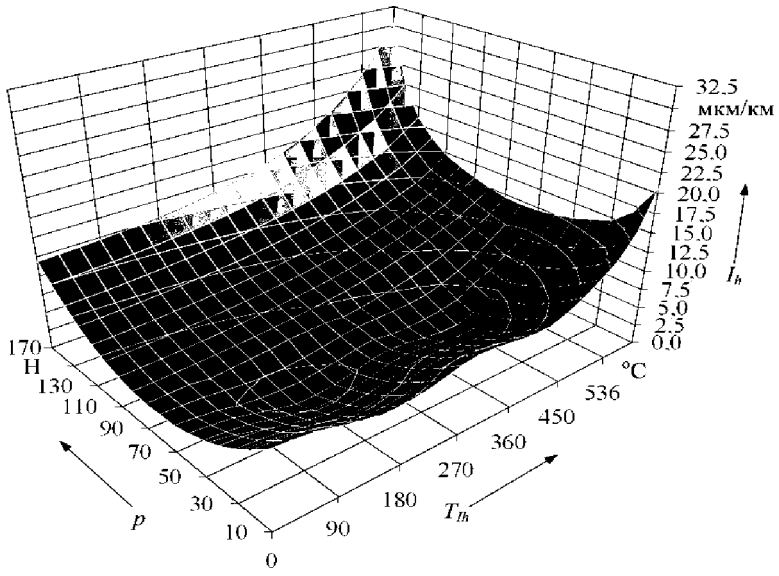


Рис. 1. Зависимость величины износа от контактного нажатия и температуры для КВ ВЖЗП

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мышкин Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 560 с.

2. Кончиц В. В. Триботехника электрических контактов / В. В. Кончиц, В. В. Мешков, Н. К. Мышкин. Минск: Нука и техника, 1986. 255 с.

3. Браун Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. 191 с.

4. Ступаков С. А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / С. А. Ступаков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М: Машиностроение. № 2. 2012. – С. 37 – 47.

5. Григорьев В. Л. Тепловые процессы в устройствах тягового электроснабжения: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. / В. Л. Григорьев, В. В. Игнатьев. М.: Изд-во ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. 182 с.

6. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. 480 с.

7. Горюнов В. Н. Влияние поверхностной модификации на фреттингостойкость материалов энергоустановок и газотурбинных двигателей / В. Н. Горюнов, П. Б. Гринберг,Е. Е. Тарасов, К. Н. Полещенко // Вестник Омского университета / Омский гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского. – Омск. № 2. 2012. – С. 214 – 244.

Поступила в печать 12.02.2013.

Ключевые слова: изнашивание, контактная пара, математическая модель, устройство токосъема, электрический скользящий контакт.

REFERENCES

1. Myshkin N. K., Konchits V. V., Braunovich M. *Elektricheskie kontakty* [The electrical contacts] Dolgoprudnyy, Intellekt Publ., 2008. 560 pp.

2. Konchits V. V., Konchits V. V., Meshkov V.V., *Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov* [Tribotechnika of electrical contacts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. 255 pp.

3. Braun E. D., Evdokimov Yu. A., Chichinadze A. V.. *Modelirovanie treniya i iznashivaniya v mashinakh* [Modeling of friction and wear in machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 191 pp.

4. Stupakov S. A., Sidorov O. A., Filippov V. M., *Modelirovanie elektromekhanicheskogo iznashivaniya kontaktnykh par ustroystv tokos"ema elektricheskogo transporta // Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Simulation of electromechanical devices wear contact pairs of electric current collection of transport. Friction and lubrication in machinery]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, no. 2, pp. 37 – 47.

5. Grigor'ev V. L., Ignat'ev V. V. *Teplovye protsessy v ustroystvakh tyagovogo elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta* [Thermal processes in the devices traction power supply: a training manual for schools railway transportation]. Moscow, GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2007. 182 pages.

6. Khol'm R. *Elektricheskie kontakty* [The electrical contacts]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1961. 480 pp.

7. Goryunov V. N., Grinberg P. B., Tarasov E. E., Poleshchenko K. N. Vliyanie poverkhnostnoy modifikatsii na frettingostoykost' materialov energoustanovok i gazoturbinnykh dvigateley [Influence of surface modification of materials by frettingostoykost power plants and gas turbine engines]. *Vestnik Omskogo gosudarstvenogo universiteta im. F. M. Dostoevskogo* [Bulletin of Omsk Naional University named after F. Dostoevskiy], 2012, no. 2, pp. 214 – 244.

© Сидоров О.А. и др., 2013

Статья рекомендована к печати д.т.н., профессором *Г. К. Гетьманом*

Создание высокоскоростного электрического транспорта является одним из путей повышения провозной и пропускной способности железнодорожных магистралей. Для обеспечения бесперебойной работы электроподвижного состава нового поколения необходимо создание устройств токосъема, которые должны отвечать требованиям надежной и качественной передачи электроэнергии, а также отличаться от существующих повышенным сроком службы.

В связи с этим при проектировании устройств токосъема необходимо учитывать возможные параметры их эксплуатации и факторы, влияющие на качество токосъема. Контактная пара устройства токосъема обеспечивает передачу подвижному составу тягового тока, что вызывает усиленный электромеханический износ ее элементов. Одним из факторов, существенно ускоряющих процесс изнашивания элементов контактной пары, является термическое действие электрического тока.

Объектом исследования являются элементы контактных пар токосъемных устройств (контактные вставки), предназначенные для применения на скоростных железнодорожных магистралях.

В статье рассматривается построение математической модели электромеханического изнашивания элементов контактных пар, учитывающей факторы, характерны их для условий эксплуатации.

УДК 621.336

О. О. СИДОРОВ, С. А. СТУПАКОВ, В. М. ФІЛІППОВ, О. А. ОРЛОВ, Б. М. МОСКАЛЮК (ОМГУПС)

Федеральне державне бюджетне освітня установа вищої професійної освіти «Омський державний університет шляхів сполучення», пр. Маркса, 35, Омськ, Росія, 644046, тел. +7(3812)31-34-46, e-mail: sidorovoa@omgups.ru

ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНТАКТНИХ ПАР СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Створення високошвидкісного електричного транспорту є одним з шляхів підвищення провізної і пропускної спроможності залізничних магістралей. Для забезпечення безперебійної роботи електрорухомого складу нового покоління необхідне створення пристроїв струмознімання, які повинні відповідати вимогам надійної і якісної передачі електроенергії, а також відрізнятися від існуючих підвищеним терміном служби.

У зв'язку з цим при проектуванні пристроїв струмознімання необхідно враховувати віз-можна параметри їх експлуатації та фактори, що впливають на якість струмознімання. Контактний пара пристрої струмознімання забезпечує передачу рухомого складу тягового струму, що викликає посилений електромеханічний знос її елементів. Одним з факторів, істотно прискорюють процес зношування елементів контактної пари, є термічне дію електричного струму.

Об'єктом дослідження є елементи контактних пар струмознімальних пристроїв (контактні вставки), призначені для застосування на швидкісних залізничних магістралях.

У статті розглядається побудова математичної моделі електромеханічного зношування елементів контактних пар, що враховує фактори, характерні їх для умов експлуатації.

Ключові слова: зношування, контактна пара, математична модель, пристрій струмознімання, електричний ковзний контакт.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н, професором *Г. К. Гетьманом*

UDC 621.336

O. A. SIDOROV, S. A. STUPAKOV, V. M. PHILIPPOV, A. A. ORLOV, B. M. MOSKALYUK (OSTU)

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Omsk State Transport University", Marx avenue, 35, Omsk, Russia, 644046, phone +7-3812-31-34-46, e-mail: sidorovoa@omgups.ru

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF THE WEAR OF THE ELEMENTS OF CONTACT PAIRS OF CURRENT COLLECTION DEVICES

Create a high-speed electric vehicles is one way of raising the capacity of the freight and rail lines. To ensure smooth operation of electric rolling stock necessary to create a new generation of devices, current collection, which must meet the requirements of reliable and high quality power transmission and differ from existing long-life battery.

In this regard, the design of current collection devices must be considered the possible parameters of their operation and the factors that influence the quality of current collection. Of the contact pair of current collection device transmits rolling stock traction current, which causes deterioration of its enhanced electromechanical components. One factor that significantly accelerates the process of wear elements of the contact pair is the thermal effect of the electric current.

The object of the study are the elements of contact pairs current collection devices (contact inserts), intended for use on high-speed railway lines.

The article discusses the construction of a mathematical model of electromechanical components wear contact pairs, taking into account factors specific to their operating conditions.

Keywords: wear, contact pair, mathematical model, current collection device, electric sliding contact.

Prof. *G. K. Getman*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.

© Сидоров О.А. и др., 2013