

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*Представил д.т.н., профессор Сидоров О.А.*

Одной из актуальных проблем при создании электрических транспортных систем является обеспечение надежной и экономичной передачи электроэнергии подвижному составу. Решение этой проблемы связано с разработкой новых или модернизацией существующих устройств токосъема. Передача электроэнергии электрическому подвижному составу осуществляется через скользящий контакт «контактный элемент – токопровод», вследствие чего элементы этой пары функционируют в условиях повышенного электромеханического износа. Повышение срока службы элементов контактной пары может быть обеспечено за счет выбора материалов, позволяющих обеспечить качественный токосъем, и оптимальных параметров эксплуатации. В 2001 г. в России введена в эксплуатацию трасса Московской монорельсовой транспортной системы (ММТС), основной проблемой которой является высокий износ контактных элементов (КЭ) токоприемников при передаче электрической энергии на борт электроподвижного состава (срок эксплуатации КЭ составляет не более 14 дней).

Для решения проблемы проведены экспериментальные исследования, направленные на выбор материалов контактных пар, наилучшим образом отвечающих требованиям качества токосъема и износостойкости. На основании результатов экспериментальных исследований созданы математические модели, позволяющие выполнять расчет износа контактных пар.

Реализация методики экспериментальных исследований изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема требует наличия специализированных экспериментальных комплексов, а также значительных затрат времени и ресурсов. Для сокращения объема экспериментальных исследований может быть использован комбинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментальных исследований реальных объектов (или их аналогов) и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов, происходящих в контактных парах устройств токосъема. В соответствии с разработанной методикой необходимый объем экспериментальных исследований выполняется с помо-

щью специализированного комплекса, а полученные результаты служат входными данными для дальнейшего выполнения расчетов и прогнозирования ресурсов контактных пар.

Контактная пара устройства токосъема электрического транспорта представляет собой узел, который функционирует в условиях электромеханического изнашивания. В связи с этим сформированы математические модели, позволяющие моделировать изнашивание от нагрузки в контакте и от токовой нагрузки. Входными данными для моделирования являются сведения о физико-механических и химических свойствах материалов элементов контактных пар устройств токосъема, о геометрических размерах и форме элементов, а также об условиях эксплуатации устройств токосъема.

Для каждой контактной пары «контактный элемент (КЭ) – токопровод» выполняются экспериментальные исследования, при которых значения параметров эксплуатации (нажатие в контакте, скорость движения, токовая нагрузка и др.) ограничивают только граничными (минимальным и максимальным) значениями диапазона каждого параметра. Определение значений износа в остальных точках диапазона выполняется расчетным путем. После построения зависимостей изнашивания могут быть выполнены экспериментальные исследования для диапазона, характеризующегося минимальным износом. Это позволит уточнить значения, полученные расчетным путем, и при необходимости выполнить корректировку расчета.

Уравнение для решения задачи об оптимальных условиях механического изнашивания при поиске области оптимума приведено в работе [1] Э.Д. Брауна, Ю.А. Евдокимова, А.В. Чичинадзе. В этом уравнении в соответствии с положениями теории подобия в соответствующие критерии были объединены следующие факторы:

*первый критерий* – нагрузка в контакте, удельная теплоемкость, теплопроводность;

*второй критерий* – скорость скольжения, время испытания;

*третий критерий* – твердости элементов пары трения.

Еще один критерий, который входит в уравнение в виде самостоятельного фактора, показывает содержание в материале меди. В качестве параметра оптимизации принят износ массы  $I_M$ .

Однако анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных при различных параметрах окружающей среды, подтвердил необходимость внесения в модель критериев, учитывающих состояние окружающей среды – влажность и запыленность. Поэтому в модель включены следующие факторы: нагрузка на образец  $P$ , Н; интегральный коэффициент поверхности  $r$ , м; скорость скольжения  $v$ , м/с; время испытания  $t$ , с; содержа-

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1(T_1)}{H_2(T_2)} \right)^{\varepsilon_m} \left( \frac{\phi_0}{\phi_1} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\chi_0}{\chi_1} \right)^{\omega_m}, \quad (1)$$

где  $a_0$  – постоянная, отражающая влияние на процесс неучтенных факторов;  $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m, \lambda_m, \omega_m$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $Ptc_2/r^2\lambda_1$  – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности КП накапливать, а КВ – передавать тепло);  $vt/r$  – отношение пути трения к коэффициенту поверхности КВ;  $H_1(T_1)/H_2(T_2)$  – отношение твердостей элементов контактной пары;  $T_i = dT_i/dz$  – градиент температуры элемента контактной пары по нормали  $z$  к его поверхности;  $\phi_1/\phi_2$  – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований;  $\chi_1/\chi_2$  – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению запыленности на момент исследований.

Изнашивание контактных пар устройств тока сьема от воздействия электрического тока можно представить с помощью функциональной зависимости между такими факторами как дугостойкость материала; количество электричества, прошедшее через дугу; контактное нажатие; длина пути трения; комплекс, учитывающий изменение шероховатости поверхностей; комплекс, учитывающий износ при токовой нагрузке без искрения; температура элементов контактной пары от токовой нагрузки.

Процессы, происходящие в электрическом скользящем контакте, описаны в работе [2] Р. Хольма; там же приведена формула для определения электрического износа элементов контактной пары:

$$I_E(P) = \left[ \xi(\gamma, Q, T) + \zeta \cdot X_1^{k_1} \left( W_1(P, k_1, k_2) j^{k_3} + g(P, X_3, X_4, T, k_4) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) \right] \cdot \vartheta(F_0, \phi, \chi),$$

ние меди в материале контактной вставки  $Cu$ , %; твердость материалов контактной вставки (КВ) и контактного провода (КП)  $H_1(T_1)$  и  $H_2(T_2)$  от температуры; теплопроводность материала КВ  $\lambda_1$ , Вт/(м·К); удельная теплоемкость КП  $c_2$ , Дж/(кг·К); относительная влажность окружающей среды  $\phi$ , %; количество абразива (запыленность)  $\chi$ , %.

Воспользуемся уравнением для вычисления износа, приведенным в работе [1], дополнив его факторами, учитывающими состояние внешней среды:

$$W = \gamma Q + sP \left( W_0 + W_1 \sqrt{\frac{I}{10}} + g \sqrt{\frac{Q}{s}} \right), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий дугостойкость материала;  $Q$  – количество электричества, прошедшее через дугу;  $W_0$  – коэффициент износа от механической нагрузки (без тока);  $P$  – контактное нажатие;  $s$  – длина пути трения;  $g$  – коэффициент, характеризующий изнашивание материала вследствие повышения шероховатости поверхностей;  $W_1$  – коэффициент износа при токовой нагрузке без искрения.

Кратковременные потери контакта при токовом сопровождении возникают вследствие искрения (дугообразования), которое увеличивает значения износа: возникает испарение материала с поверхностей контакта, повышается их шероховатость и температура. Процесс изнашивания контактных пар при протекании через контакт тока заключается во фриттинге пленок поверхностей и электролизе, а также зависит от температурного гра-

диента  $\left( \frac{\partial T^*}{\partial z} \right)$  по нормали к поверхности трения,

где  $T^*$  – средняя температура номинальной поверхности трения,  $z$  – координата по нормали к поверхности трения.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований электромеханического износа материалов контактной пары выполнено преобразование уравнения (2) к форме, приведенной в работе [3]. Дополним его составляющей, которая позволит учесть температурный градиент поверхностей, и запишем:

где  $\xi(\gamma, Q, T)$  – коэффициент, зависящий от дугостойкости материала и характеризующий электроэрозионный износ с учетом температурного градиента;

$\gamma = \gamma(k_3, t)$  – коэффициент дугостойкости, который зависит от материала, рода тока и полярности элемента контактной пары;

$Q = Q(j, A_r, t)$  – количество электричества, которое определяется плотностью тока, площадью контакта и временем горения дуги;

$\zeta$  – масштабный коэффициент;

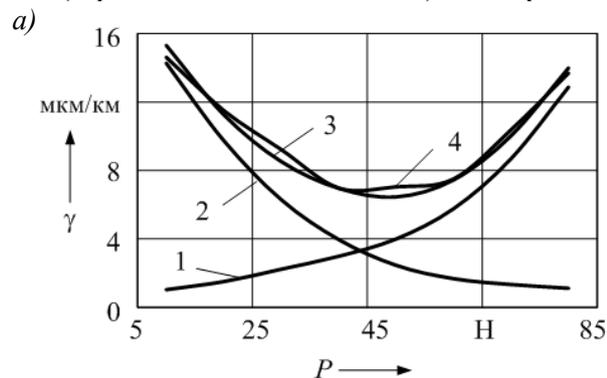
$$X_1 = \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m}, \quad X_3 = (Cu)^{\gamma_m},$$

$$X_4 = \left( \frac{H_1(T_1)}{H_2(T_2)} \right)^{\epsilon_m} \text{ – комплексы уравнения (1);}$$

$$k_1 = k_1(-P^\alpha), \text{ где } \alpha = 1,4 \cdot 10^{-3} k_3;$$

$$k_2 = k_2(P^{-\beta}), \text{ где } \beta = 3,3 \cdot 10^{-2} k_3;$$

$k_3 \in [1; 2]$  – коэффициент, учитывающий род тока (переменный или постоянный) и полярность



контактного элемента (анодно- или катодно-поляризованный);

$k_4$  – коэффициент, учитывающий содержание графита в материале, %;

$\vartheta(F_0, \phi, \chi)$  – коэффициент, характеризующий состояние окружающей среды (температуру, влажность, запыленность);

$$F_0 = \frac{at}{l^2} \text{ – критерий Фурье (} a \text{ – коэффициент}$$

температуропроводности,  $t$  – время изменения внешних условий,  $l$  – характерный линейный размер), устанавливающий соответствие между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри элемента контактной пары).

На рис. 1, а показаны графики (расчет и эксперимент) электромеханического изнашивания КЭ, на рис. 1, б – то же для токопровода; приняты следующие обозначения: 1 – расчет механического износа; 2 – расчет электрического износа; 3 – суммарная расчетная зависимость электромеханического износа; 4 – электромеханический износ (экспериментальные данные).

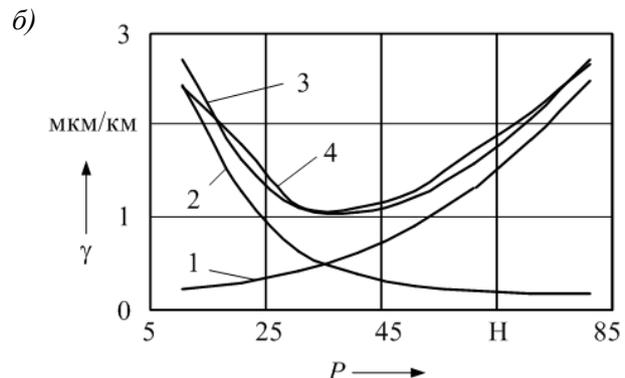


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные графики изнашивания:  
а – меднографитового КЭ; б – токопровода

Сравнение  $U$ -образных расчетных и экспериментальных кривых изнашивания (рис. 1), показывает, что отклонение данных составляет не более 6%. В связи с этим достаточно выполнить эксперимент только для граничных значений диапазона контактного нажатия, а полученные данные использовать в качестве входных значений для расчетов зависимостей изнашивания на математической модели. В случае необходимости уточнения границ диапазона, характеризующегося минимальными значениями износа элементов контактной пары, может быть выполнен дополнительный эксперимент.

**Вывод:** методика и результаты исследований использованы при выборе материалов контактных

элементов токоприемников монорельсовой системы ОАО «Московские монорельсовые дороги».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
2. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 480 с.
3. Ступаков С.А. Математическое моделирование износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта / С.А. Ступаков, В. М. Филиппов, Т.В.Охрименко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. №1. 2011. С. 240 – 243.