

О. А. СИДОРОВ, С. А. СТУПАКОВ, И. Л. САЛЯ (ОмГУПС, Омск, Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

У статті представлено результати експериментальних досліджень і розрахунку зносу контактних пар пристроїв струмознімання електричного транспорту.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и расчета износа контактных пар устройств токосъема электрического транспорта.

In the article the results of experimental research and calculation of wear of current collector system elements of electric transport are presented.

Обеспечение надежной и экономичной передачи электроэнергии подвижному составу является одной из главных проблем развития электрического транспорта и предполагает совершенствование устройств токосъема. Приоритетным направлением совершенствования устройств токосъема является увеличение их срока службы путем выбора таких материалов контактной пары, которые должны отвечать как требованиям экологического характера, так и требованиям качества токосъема. Метод оценки качества токосъема предусматривает определение двух основных показателей – надежности и экономичности токосъема [1], которые в свою очередь предполагают снижение износа контактирующих элементов при соблюдении и других ограничений.

В Омском государственном университете путей сообщения разработана методика исследования износа контактных пар устройств токосъема, которая реализуется лабораторным комплексом, включающим специализированные установки возвратно-поступательного, вращательного и ударного типов. Лабораторный комплекс позволяет осуществлять износостойкие испытания устройств токосъема магистрального и монорельсового электрического транспорта в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта при изменении в широком диапазоне изгибной и контактной нагрузок с учетом протекания электрического тока в контакте.

Установка возвратно-поступательного типа (рис. 1) используется для исследования контактных пар со сложной геометрической поверхностью, характерных для систем токосъема монорельсового транспорта, и позволяет про-

водить исследование износа контактных элементов при условии протекания в зоне контакта как постоянного, так и переменного тока. Таким образом, установка позволяет исследовать модели трибосистемы «контактный элемент – токопровод», созданные при соблюдении критериев подобия и условий контактирования, нагружения и геометрической формы пары трения.

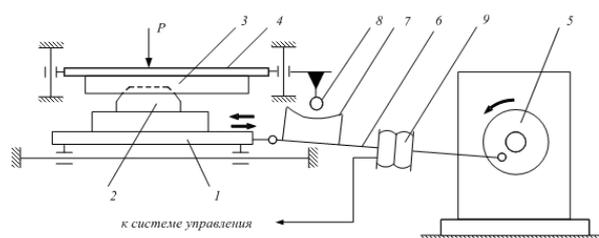


Рис. 1. Схема установки возвратно-поступательного типа

Механическая часть комплекса включает в себя станину, на которой установлены направляющие, сочлененные со скользящими и закрепленной на них подвижной кареткой 1. На каретке закреплен контактный элемент 2, взаимодействующий с токопроводом 3, закрепленным на изоляционной пластине 4. Возвратно-поступательное перемещение каретки 1 осуществляется приводом вращения 5, связанным тягой 6 с кареткой.

Кроме возвратно-поступательного движения установка позволяет проводить исследования при одностороннем движении, т.е. имитировать реальный процесс движения в одном направлении. Процесс движения в одну сторону реализуется с помощью копира 7, который устанавливается на тяге. При движении ролика 8 по поверхности копира токопровод поднимается, и

половину периода вращения привода элементы трибосистемы не взаимодействуют.

Исследование процессов в области неустойчивого скольжения элементов контактной пары требует учитывать диссипационные составляющие в нормальном и касательном направлении к поверхностям трения. Диссипационные составляющие силы трения в касательном направлении к поверхностям трения в установке реализованы пневматическим резинокордным элементом 9, вмонтированным в тягу 6 [2].

Методика испытаний включает варьирование следующих параметров для каждой пары контактных материалов: контактного давления; скорости относительного движения элементов пары трения; режимов движения (возвратно-поступательное и однонаправленное); полярности и силы электрического тока; параметров окружающей среды (температуры, влажности, запыленности) и других. Кроме этого, конструктивные особенности установки возвратно-поступательного типа позволяют реализовать методику исследования процессов удара при взаимодействии элементов контактной пары, в том числе и трения при ударе.

Результаты исследований представлены на рис. 2 – 5.

Дальнейшие исследования контактных пар системы токосъема монорельсового транспорта выполнялись с использованием математических моделей, которые позволяют оценить как механическую составляющую износа, так и воздействие электрического тока.

При моделировании механического износа, в соответствии с положениями теории подобия, в один критерий были объединены следующие факторы: плотность, твердость, коэффициент линейного расширения, удельная теплоемкость, теплопроводность [3, 4].

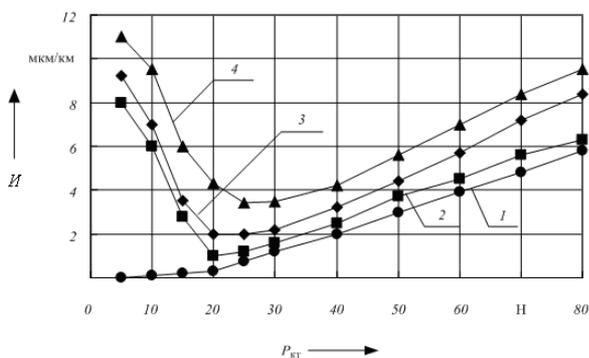


Рис. 2. Зависимость износа контактного элемента от силы тока в контакте:
1 – $I = 0$ А; 2 – $I = 100$ А; 3 – $I = 200$ А; 4 – $I = 300$ А

Метод отсеивания несущественных факторов позволил определить следующую группу

факторов для составления модели: нагрузку на образец P , Н; радиус сферической поверхности r , м; скорость скольжения v , м/с; время испытания t , с; содержание меди в материале контактного элемента M , %; твердость материалов токопровода и контактного элемента H_1 и H_2 ; теплопроводность материала контактного элемента λ_1 , Вт; удельную теплоемкость токопровода c_2 , Вт. В качестве параметра оптимизации принят износ массы I_M .

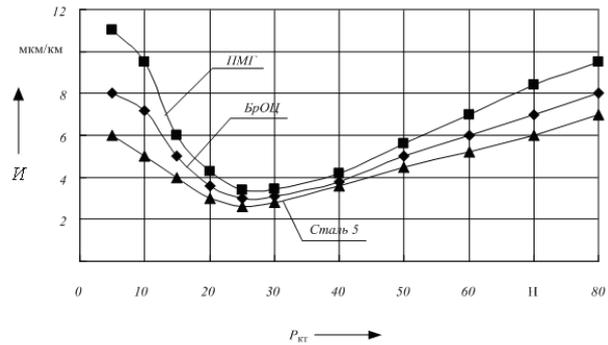


Рис. 3. Зависимость износа контактного элемента из различных материалов

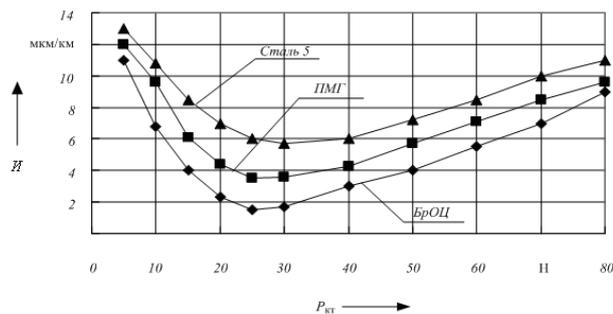


Рис. 4. Влияние на износ контактного элемента влажности окружающей среды

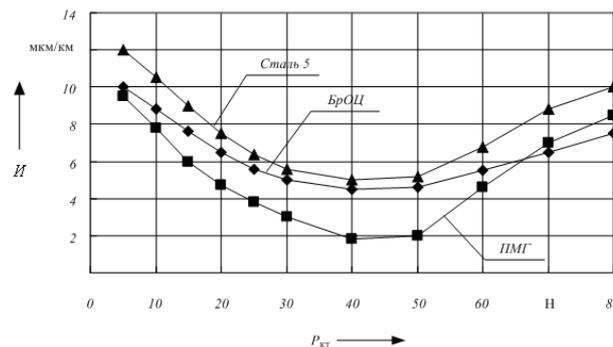


Рис. 5. Влияние на износ контактного элемента смены полярности тока в контакте

Функциональная зависимость между параметром оптимизации и факторами модели имеет вид:

$$I_M = \Psi_1(P; A; v; t; M; H_1/H_2; \lambda_1; c_2), \quad (1)$$

где H_1/H_2 – безразмерный симплекс.

В соответствии с положениями теории подобия, получим уравнение подобия:

$$\frac{I_M}{P} = \Psi_3 \times \left[\left(\frac{P t c_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \times \left(\frac{v t}{r} \right)^{\beta_m} \times \right. \\ \left. \times (M)^{\gamma_m} \times \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \right]. \quad (2)$$

Из (2) получим расчетное уравнение:

$$\frac{I_M}{P} = a_0 \times \left(\frac{P t c_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \times \left(\frac{v t}{r} \right)^{\beta_m} \times \\ \times (M)^{\gamma_m} \times \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m}, \quad (3)$$

где a_0 – постоянная, отражающая влияние на процесс неучтенных факторов;

$\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m$ – коэффициенты, определяемые экспериментально;

$\frac{I_M}{P}$ – симплекс (отношение износа массы контактного элемента к давлению);

$\frac{P t c_2}{r^2 \lambda_1}$ – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а контактного элемента передавать тепло);

$\frac{v t}{r}$ – отношение пути трения к радиусу контактного элемента.

Расчетное уравнение (3) можно представить в виде:

$$y = a_0 X_1^{\alpha_m} X_2^{\beta_m} X_3^{\gamma_m} X_4^{\varepsilon_m}, \quad (4)$$

где X_1, X_2, X_3, X_4 – независимые переменные (факторы).

После логарифмирования уравнение (4) имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4, \quad (5)$$

где \hat{y} – оценка параметра оптимизации;

b_1, b_2, b_3, b_4 – оценки коэффициентов.

Для определения коэффициентов уравнения в соответствии с матрицей планирования проведен полный факторный эксперимент на физической модели.

Для определения коэффициентов уравнения регрессии была использована формула:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \ln Y_{iu}, \quad (6)$$

где $i = 0 \dots 4$ – номер фактора; $\ln Y_{iu}$ – отклик в опытах в точке u .

В результате вычислений получено уравнение:

$$\ln y = -8,376 + 0,425 \ln X_1 - 0,694 \ln X_2 + \\ + 0,53 \ln X_3 + 0,769 \ln X_4. \quad (7)$$

Статистический анализ оценки достоверности уравнения подтвердил выполнение гипотезы адекватности модели.

Выполняем потенцирование уравнения (7):

$$I_M = P \times \left[e^{-8,376} \left(\frac{P t c_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{0,425} \times \left(\frac{v t}{r} \right)^{-0,694} \times \right. \\ \left. \times (M)^{0,53} \times \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{0,769} \right]. \quad (8)$$

На основании анализа уравнения (8) можно сделать вывод, что наиболее значительное влияние на износ оказывают механические свойства пары трения, а наименее значительный вклад в процесс изнашивания вносит параметр, учитывающий изменение нагрузки.

Влияние электрической нагрузки может рассматриваться как дополнительный внешний параметр трибосистемы «контактный элемент – токопровод», влияющий на все характеристики скользящего контакта. Общий электрический износ можно определить по формуле [5]:

$$W = sP \left(W_0 + W_1 \sqrt{\frac{I}{10}} \right). \quad (9)$$

Процесс изнашивания контактных пар при протекании через контакт тока заключается во фриттинге пленок поверхностей и электролизе. Объем W_a испарившейся электрической дуги пропорционален количеству электричества Q , которое прошло через нее, и определяется по формуле

$$W_a = \gamma Q, \quad (10)$$

где γ – константа материала.

Процесс изменения шероховатости поверхностей является функцией Q/s , где s – длина пути. С учетом вышесказанного перепишем (9) в следующем виде:

$$W = \gamma Q + sP \left(W_0 + W_1 \sqrt{\frac{I}{10}} + g \sqrt{\frac{Q}{s}} \right), \quad (11)$$

где g и W_l – переменные материала, которые зависят от контактного нажатия.

Преобразуем выражение (11) к следующему виду:

$$W = \left[\gamma Q + \frac{s P_{\text{кт}}}{9,81} \times \left(W_0 + \frac{k_1}{P_{\text{кт}}^{k_2}} \left(\sqrt{\frac{I}{10}} + k_3 \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) \right) \right] \times \rho \cdot 10^{-6}, \quad (12)$$

где k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты, определяемые экспериментально;

$P_{\text{кт}}$ – контактное нажатие, Н;

ρ – плотность материала, кг/м³.

Износ контактных пар от воздействия электрического тока:

$$W = \Psi_2(\gamma; Q; s; g; W_1; k_1; k_2; P_{\text{кт}}). \quad (13)$$

Окончательное уравнение для определения износа элементов контактной пары устройств токосъема с учетом (9) и (13):

$$I_{\Sigma} = \begin{cases} W, & \text{если } P_{\text{кт}} \leq P_{\text{опт}}; \\ I_{\text{м}} \cdot v, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (14)$$

На рис. 6 – 8 представлены зависимости износа контактного элемента, полученные в результате эксперимента, и результаты расчета.

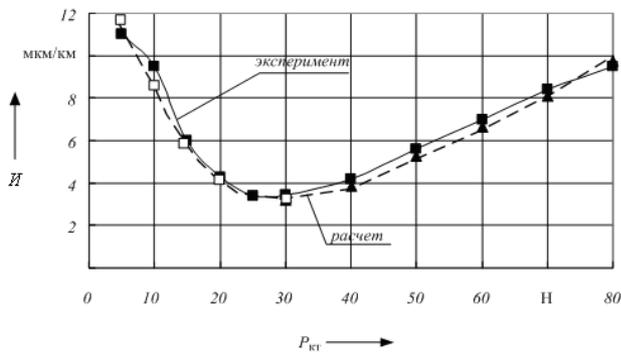


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для материала контактного элемента ПМГ

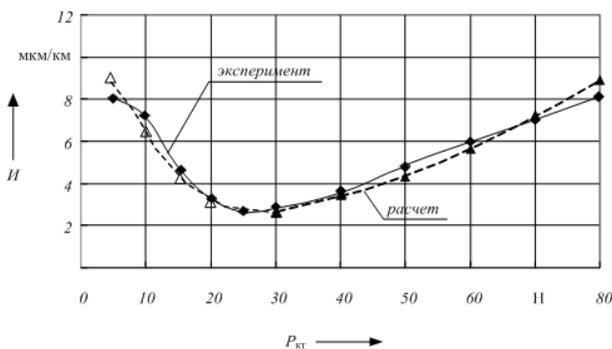


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для материала контактного элемента БрОЦ

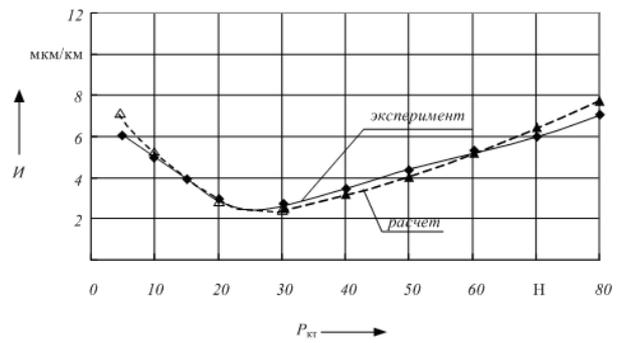


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для стального контактного элемента

Выводы

1) В ОмГУПС разработана методика экспериментальных исследований износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта.

2) Результаты исследований использованы для оптимального выбора материалов контактных пар устройств токосъема монорельсовой системы ОАО «Московские монорельсовые дороги».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров, О. А. Методы исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта [Текст] : монография / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков. – Омск, 2009. – 155 с.
2. Патент на полезную модель № 82444. МПК В60L 3/12. Устройство для исследования скользящего контакта между токоприемником и токопроводом [Текст] / О. А. Сидоров и др. – Заявка № 2008149393. – Заявл. 15.12.2008, Бюл. № 12. – 2009.
3. Моделирование трения и изнашивания в машиностроении [Текст] / Э. Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
4. Гаркунов, Д. Н. Триботехника [Текст] : учебник / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
5. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 480 с.

Поступила в редколлегию 18.01.2010.

Принята к печати 21.01.2010.