

УДК 621.336.3:620.178.16

## К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Сидоров О.А., Филиппов В.М.

ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», Омск,  
e-mail: fvm-omgups@mail.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема магистрального электрического транспорта. Рассмотрены методы и средства для проведения испытаний элементов контактных пар на установке возвратно-поступательного типа. Приведены результаты эксперимента и расчета по математической модели электромеханического изнашивания, проведена оценка их расхождения. Предложен алгоритм прогнозирования износа контактных элементов, позволяющий сократить время на проведение экспериментальных исследований в три раза. Представлены результаты прогнозирования износа по предложенному алгоритму.

**Ключевые слова:** износ, контактная пара, токосъемное устройство, математическая модель, алгоритм прогнозирования

## THE ISSUE OF FORECASTING ELEMENTS WEAR CONTACT PAIRS DEVICES ELECTRIC ROLLING CURRENT COLLECTION

Sidorov O.A., Philippov V.M.

Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: fvm-omgups@mail.ru

In the article are presented the results of experimental studies of electro mechanical wear contact pairs of the main electric current collection devices transport. The methods and means for testing elements of the contact pairs at the facility reciprocating type. The results of the experiment and the calculation of the mathematical model of electromechanical wear assessed their differences. An algorithm for predicting the wear of contact elements, to reduce the time to conduct pilot studies in three times. Are presented the results predict wear on the proposed algorithm.

**Keywords:** wear, contact pair, current collection devices, mathematical model, prediction algorithm

В настоящее время в России ведутся работы по созданию новых типов магистрального электроподвижного состава (ЭПС), рассчитанных на высокие скорости движения и повышенные токовые нагрузки.

Так, в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1] планируется организация высокоскоростных железнодорожных линий, на которых будет реализовано движение со скоростями до 350 км/ч: Санкт-Петербург – Москва; Санкт-Петербург – Хельсинки; Москва – Адлер; Москва – Нижний Новгород; Москва – Смоленск – Красное.

Передача электроэнергии ЭПС осуществляется через скользящий контакт, вследствие чего элементы контактной пары функционируют в условиях повышенного электромеханического износа [2]. В свете этой проблемы согласно «Стратегии инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г.» [3] одними из основных направлений научно-технической политики являются повышение надежности, экономичности работы и увеличение эксплуатационного ресурса

технических средств. Снижение износа и повышение ресурса элементов устройств токосъема может быть обеспечено различными способами, в том числе путем выбора таких материалов контактной пары, которые наиболее полно отвечают требованиям качества токосъема.

**Целью исследования** является оперативное прогнозирование износа контактных элементов с целью увеличения ресурса контактных пар устройств токосъема.

### Материалы и методы исследования

В Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) разработана методика [4] прогнозирования ресурса контактных пар устройств токосъема, основанная на использовании результатов экспериментальных исследований. Исследования выполняются на специализированной установке возвратно-поступательного типа (рис. 1), позволяющей моделировать процесс взаимодействия элементов контактных пар в условиях, максимально приближенных к режиму эксплуатации устройств токосъема электроподвижного состава.

Установка имеет модульную конструкцию и в зависимости от целей исследования может быть оснащена следующими модулями: модулем для исследования силы трения в скользящем контакте, модулем для моделирования ударных процессов при прохождении токоприемником стыковых зон контактного

провода, модулем для исследования износа при высоких или низких температурах и др.

Механическая часть установки включает в себя станину, на которой установлены направляющие, сочлененные со скользящими и закрепленной на них подвижной кареткой 4. На каретке закреплен токоприемник с контактным элементом (контактной вставкой) 3, взаимодействующий с отрезком контактного провода 1, закрепленным на изолирующей пластине 2. Возвратно-поступательное перемещение каретки 4 осуществляется с помощью привода вращения, связанного с кареткой тягой 7. Конструктивное исполнение тяги включает блок 8 для подключения перечисленных выше модулей.

Помимо возвратно-поступательного установка позволяет проводить исследование при одностороннем движении [5], т.е. имитировать реальный процесс движения в одном направлении. Процесс движения в одну сторону реализуется с помощью копира 6, который устанавливается на тяге. При движении ролика 5 по поверхности копира контактный провод поднимается и половину периода вращения привода элементы трибосистемы не взаимодействуют. Для имитации реального процесса взаимодействия трибосистемы «токоприемник – контактный провод» в соответствии с положениями теории моделирования были выбраны параметры жесткости контактного провода.

Методика экспериментальных исследований реализуется по следующим направлениям:

- оценка работоспособности трибосистемы «контактный элемент – контактный провод» при различных сочетаниях материалов и режимов испытания, соответствующих натурному узлу;
- оценка износостойкости элементов контактных пар для заданных параметров процесса эксплуатации;
- прогнозирование фрикционно-износных характеристик узла трения;
- анализ чувствительности, т.е. точное определение такого сочетания внешних факторов и их значений, при котором обеспечиваются наилучшие выходные характеристики всей трибосистемы; выявление функциональных соотношений между внешними факторами и откликом системы.

Для сокращения объема исследований может быть использован комбинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментов с реальными объектами (или их аналогами) и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов, происходящих в контактных парах устройств токосъема.

Моделирование процесса трения в контактных парах устройств токосъема связано с необходимостью решения многофакторной задачи, снизить количественный уровень которой позволяет теория подобия. Ввиду неоднородности составляющих процесса электромеханического износа контактных пар устройства токосъема магистрального электроподвижного состава были составлены соответствующие модели для электрического и механического видов изнашивания.

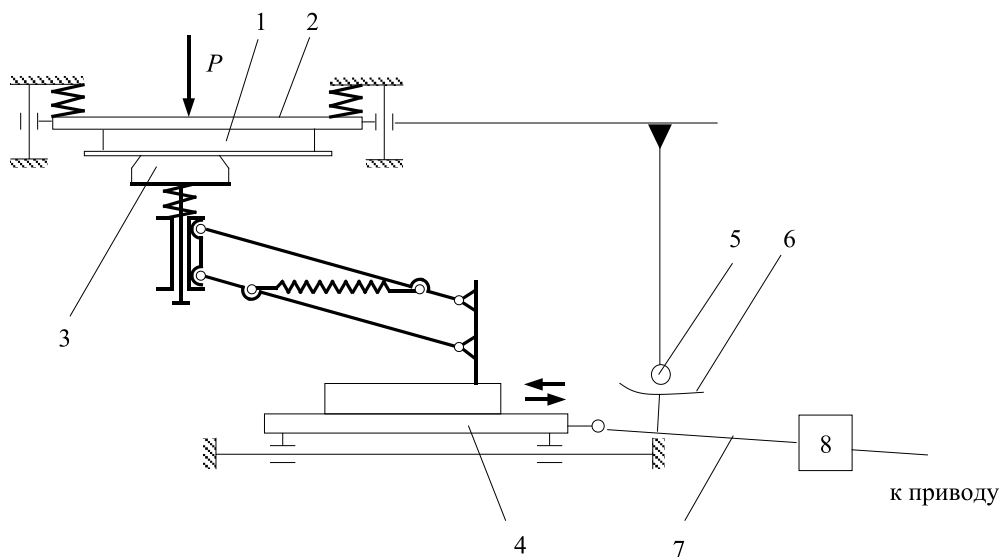


Рис. 1. Специализированная установка возвратно-поступательного типа

Для моделирования механического изнашивания в соответствии с положениями теории подобия и работами А.В. Чичинадзе, В.В. Кончица, Э.Д. Брауна, Н.К. Мышкина, Н. Biesenack было получено уравнение [6]:

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Pt c_2}{r(T_h)^2 \rho_1 c_1 \chi} \right)^{\alpha_m} \left[ \text{Bi} \left( \frac{vt}{r(T_h)} \right) \right]^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1(T_h)}{H_2(T_h)} \right)^{\varepsilon_m} \left( \frac{T_1 \lambda_1}{r(T_h) f(T_h) P v} \right)^{\delta_m} \left( \frac{\Phi_0}{\Phi} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (1)$$

где  $P$  – нажатие в контакте;  $v$  – скорость скольжения;  $t$  – время испытаний;  $r$  – характерный линейный размер;  $Cu$  – содержание меди в КЭ;  $H_1/H_2$  – безразмерный симплекс (отношение твердости материала контактного элемента к твердости материала контактного провода);  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводности материалов контактного

элемента (КЭ) и контактного провода (КП) соответственно;  $c_1, c_2$  – удельные теплоёмкости КЭ и КП соответственно;  $a_0$  – функционал, отражающий влияние на процесс неучтённых факторов;  $a_m$  – функционал, логарифмически зависящий от нажатия в контакте;  $\beta_m, \gamma_m, \epsilon_m$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $Ptc_2/(r^2\lambda_1)$  – комплекс;  $vt/r$  – комплекс;

$H_i(T_{i_h})$  – твёрдость материала элемента контактной пары в зависимости от его температуры;  $Vi$  – критерий Био;  $r\nabla T_1$  – перепад температуры по объёму КЭ;  $\Delta T_{1в} = T_1 - T_в$  – температурный напор (разность температур материала КЭ и окружающей среды).

Общий электрический износ можно определить по формуле [6]:

$$I_E(P) = \left( \zeta_1 Vi \xi(\gamma, Q, T_{i_h}) + \zeta_2 (X_1 Me)^{k_1} \right) \left( I_{E0}(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \zeta_3 g(P, X_3, X_4, T_{i_h}, k_4) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) (F_{0i}, \sigma_m), \quad (2)$$

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 износ материала вследствие повышения шероховатости поверхностей;  $W_1$  – коэффициент износа при токовой нагрузке без искрения;  $\xi$  – коэффициент, характеризующий электроэрозионный износ от дугостойкости материала.

Функционалы  $k_1$  и  $k_2$  определяются по номограммам [7];  $k_3 \in (0; 0,07]$ ;  $k_4 \in [0; 1]$ ;  $\sigma_m \in [-1; 2]$ .

Таким образом, с учетом уравнений (1) и (2) можно получить суммарный электромеханический износ элементов контактной пары

$$I_h = I_M + I_E. \quad (3)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение результатов расчёта, полученных при использовании уравнения (3) путём аппроксимирования с учетом входных данных о величине износа в граничных точках механической и  $U$ -образной кривых изнашивания, и экспериментальных исследований по методике [4] при средних эксплуатационных значениях про-

текающего тока в скользящем контакте показывает, что отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 6% (рис. 2). Массив информации, полученной в результате исследований контактных пар, используется для прогнозирования износа контактных элементов. Алгоритм прогнозирования представлен на рис. 3. Исходными данными для прогнозирования также являются: график контактного нажатия токоприемника; график токовой нагрузки; график скорости движения подвижного состава на конкретном участке; параметры условий эксплуатации. Затем выполняется обработка графика контактного нажатия  $P_{кт}$  на заданном участке: определение среднего значения нажатия, значений предельных отклонений (и количества отклонений) и т.д. Окончательный расчет износа контактных элементов и прогнозирование их ресурса осуществляется путем компьютерной обработки результатов анализа графика  $P_{кт}$  и  $U$ -образной зависимости износа.

Результаты прогнозирования для графитовой и металлокерамической контактных вставок приведены на рис. 4.

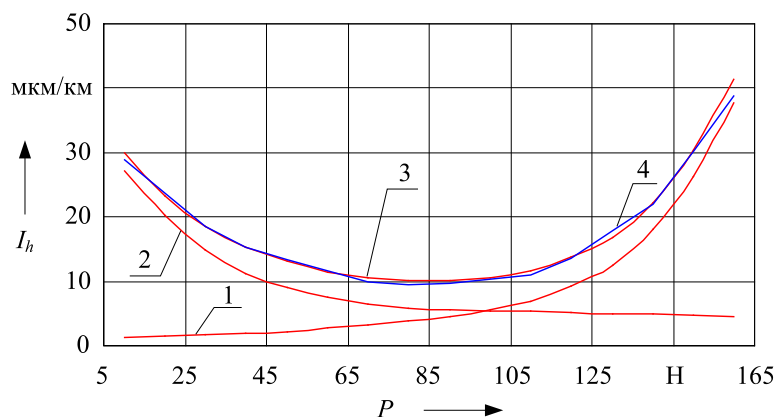


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости изнашивания графитовой контактной вставки при нормальных условиях окружающей среды:  
 1 – результаты расчета механической составляющей изнашивания ( $I = 0$ );  
 2 – результаты расчета электрической составляющей изнашивания;  
 3 – суммарный расчетный график; 4 – результаты эксперимента (постоянный ток, 2200 А)

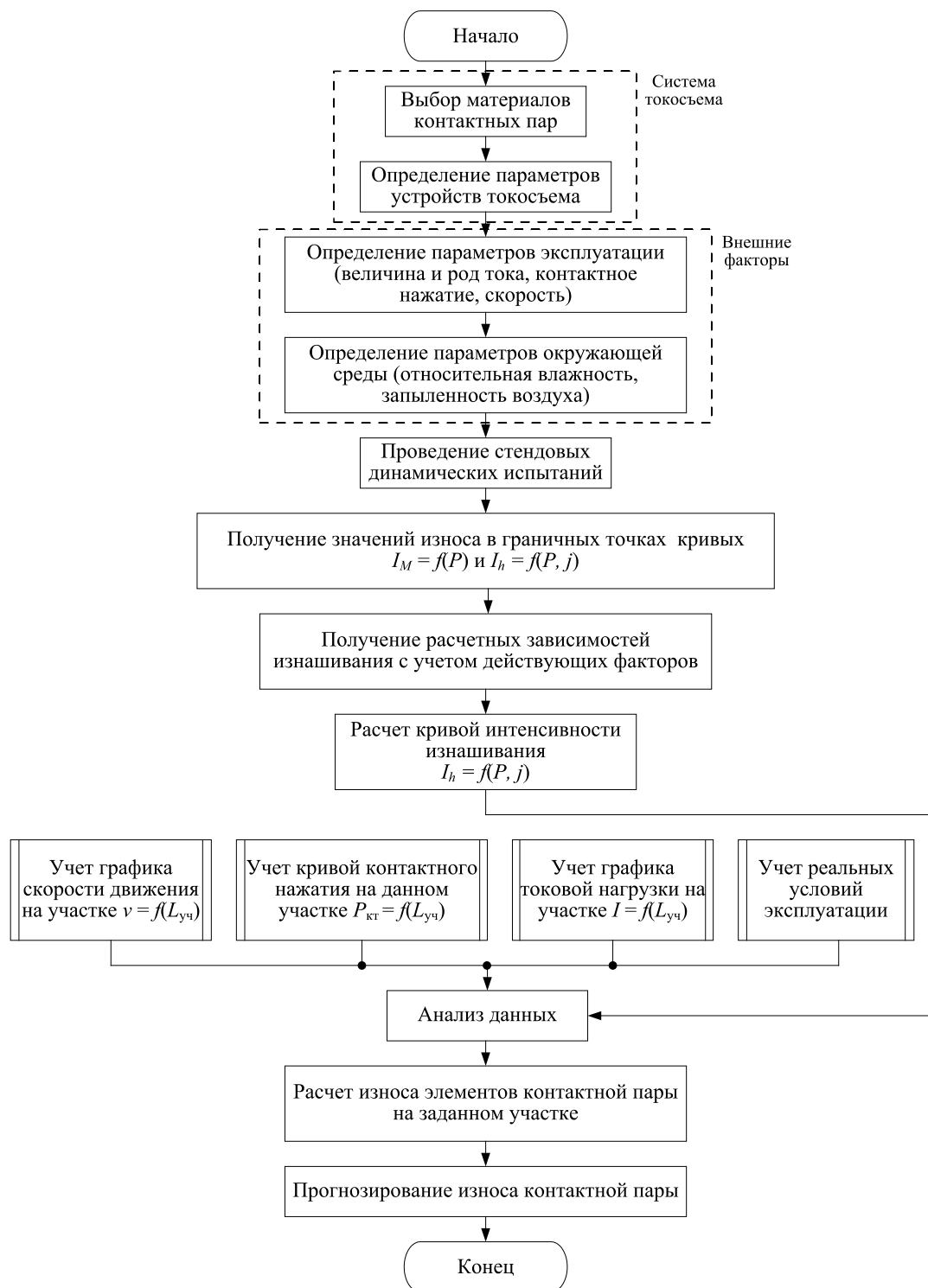


Рис. 3. Алгоритм прогнозирования износа элементов контактных пар

### Выводы

На основании анализа особенностей условий эксплуатации контактных пар устройств токосъема, экспериментальных данных и существующих математических

моделей изнашивания разработан алгоритм прогнозирования износа контактных элементов. Используя ПЭВМ, алгоритм позволяет оперативно оценить ресурс контактных элементов, втрое сократив время на проведение цикла испытаний.

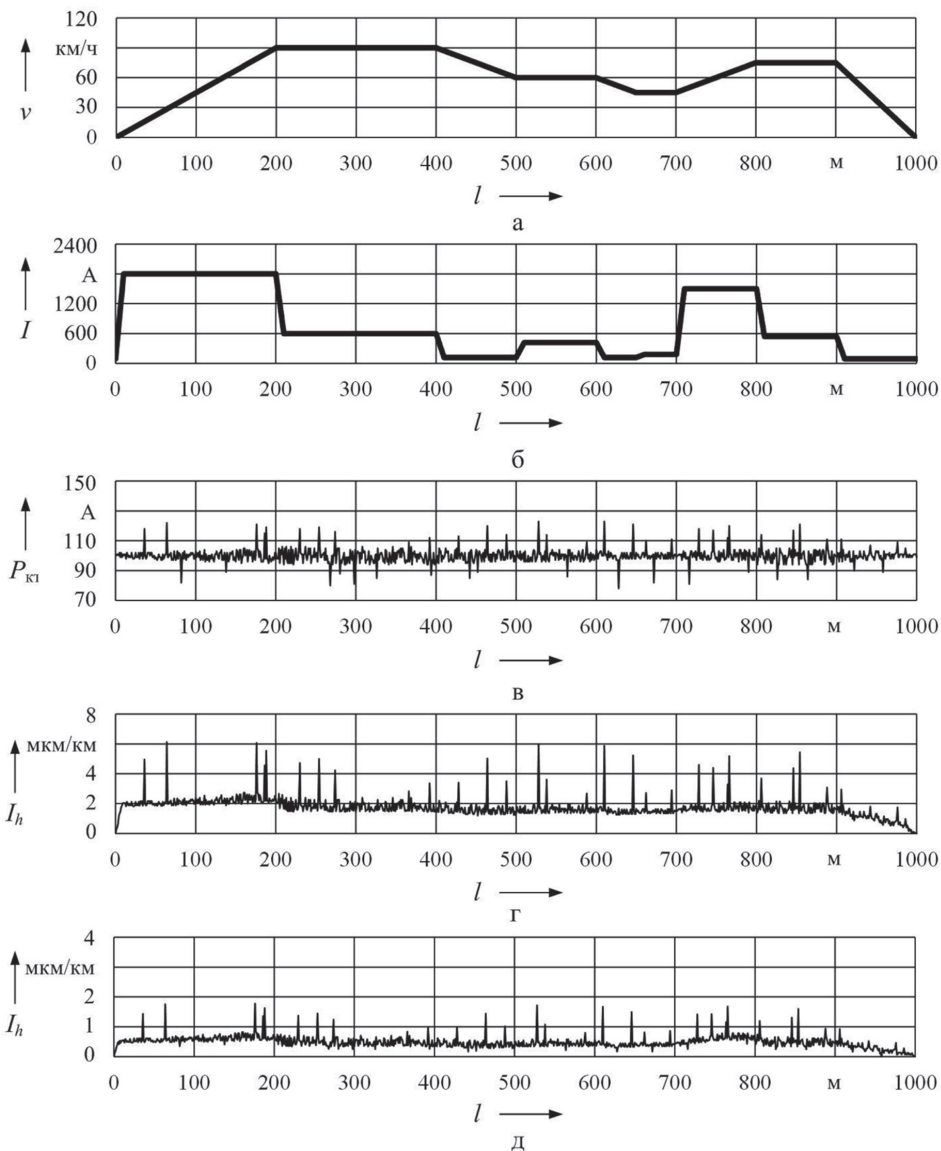


Рис. 4. Графики прогнозирования износа контактных вставок:  
 а – график скорости движения ЭПС на участке между станциями;  
 б – график потребления тока на участке; в – распределение контактного нажатия на участке; г – кривая интенсивности изнашивания графитовой контактной вставки;  
 д – кривая интенсивности изнашивания металлокерамической контактной вставки

**Список литературы**

1. Правительство Российской Федерации. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение № 887-р от 17 июня 2008 г.
2. Сидоров О.А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом: монография / О.А. Сидоров, С.А. Ступаков. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012. – 174 с.
3. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г.: утверждена президентом ОАО «РЖД» В.И. Якуниным 26 октября 2010 г.
4. Филиппов В.М. Совершенствование методов моделирования изнашивания контактных элементов токоприемников электроподвижного состава: дис. канд. техн. наук. – Омск. 2012. – С. 66–69.

5. Патент РФ № 2006123216/22, 29.06.2006.
6. Сидоров О.А., Ступаков С.А., Гоубков А.С., Куткин А.Н., Филиппов В.М. Устройство для исследования скользящего контакта между токоприемником и контактным проводом // Патент РФ № 58463. 2006. Бюл. № 33.
7. Сидоров О.А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / О.А. Сидоров, В.М. Филиппов, С.А. Ступаков // Трение и износ: международный научный журнал / Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. Гомель, 2015. – Т. 36, № 5. – С. 511–517.
8. Ступаков С.А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / Ступаков С.А., Сидоров О.А., Филиппов В.М. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М.: Машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 23–30.