

## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

Плохов И.В., Ильин А.В., Козырева О.И. (ПсковГУ, г. Псков, Россия)  
Тел.: +7 (8112) 724037; E-mail: [igor\\_plohov@list.ru](mailto:igor_plohov@list.ru)

**Abstract:** Developed a dynamic model of a sliding contact with three degrees of freedom and distributed nonlinear parameters of the contact layer. The calculated characteristics.

**Key words:** tribology, sliding electrical contact, sliding knot current collection.

Узлы скользящего токосъема (УСТ) электрических машин в процессе своей работы подвергаются внутренним и внешним механическим воздействиям, которые обусловлены неровностями и эксцентриситетом контактной поверхности, дисбалансом вращающихся деталей, вибрацией подшипниковых узлов, динамическими возмущениями, сообщаемыми электрической машине внешними объектами. Возникающие при этом нарушения скользящего контакта (СК) приводят к ухудшению качества токопередачи, повышенному искрению, ускоренному износу контактирующих поверхностей.

Особое внимание при разработке новых контактных пар уделяется имитационному компьютерному моделированию, преследующему цель получения интегральных характеристик УСТ по параметрам элементов СК и внешних воздействий. Подобный подход позволяет существенно снизить долю дорогостоящих практических экспериментов при исследовании характеристик различных контактных пар [1-6].

Стабильность контактирования оценивают коэффициентом относительной неустойчивости (КОН).

$$K = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i, \quad (1)$$

где  $T$  – время измерения;  $n$  – количество нарушений контакта за период  $T$ .

Колебательную систему УСТ представляют, как правило, в виде одно- или двухмассовой динамической системы с удерживающими механическими связями без учета их диссипативных свойств. По динамическим моделям составляют дифференциальные уравнения движения сосредоточенных масс. Для более полного исследования динамики СК необходим переход к более сложному описанию, использующему распределённые параметры и неудерживающие связи.

На рис. 1 изображена динамическая модель СК [1]. Щетка массой  $m_{\text{щ}}$  может совершать радиальные колебания  $Y(t)$  вдоль оси  $Y$ , тангенциальные  $X(t)$  вдоль оси  $X$  и поворотные  $\varphi(t)$  по углу  $\varphi$ . Тело щетки считаем абсолютно жестким, а массу – распределенной равномерно. Центр масс щетки находится в точке  $A$ , которая в динамике перемещается относительно неподвижной системы координат  $XOY$ . Для аксиальных колебаний структура динамической модели аналогична.

Нажимная пружина с жесткостью  $C_p$  и коэффициентом демпфирования  $K_p$  воздействует на щетку с усилием  $F_n$ , которое может быть приложено под углом  $\alpha$  на расстоянии  $L_p$  по отношению к радиальной оси щетки. Область контакта «щетка – токосъёмник» (контактный слой) представлена распределенной системой граничных элементов (ГЭ), каждый из которых задан реологической моделью Кельвина-Фохта в радиальном направлении и моделью Кулона-Амонтона – в тангенциальном. Параметры данных моделей:  $СК_i$  – контактная жесткость  $i$ -го ГЭ;  $КК_i$  – коэффициент контактного демпфирования ГЭ;  $КТК_i$  – коэффициент граничного трения ГЭ. Аналогично моделируется контактное взаимодействие с направляющими, которые заданы четырьмя



$$m_{ш} \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \left\{ C_{Ki} (\Delta Y_i) [Y(t) - Y_{Ki}(t) + l_i \varphi(t)] + K_{Ki} (C_{Ki}) \left[ \frac{dY(t)}{dt} - \frac{dY_{Ki}(t)}{dt} - l_i \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \right\} +$$

$$+ \sum_{i=1}^4 F_{Yi}(t) + C_p Y(t) + K_p \frac{dY(t)}{dt} = -F_H(t) \cos \alpha ; \quad (1)$$

для координаты X:

$$m_{ш} \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \sum_{i=1}^4 \left\{ C_i (\Delta X_i) [X(t) - \varphi(t) h_i] + K_i (C_i) \left[ \frac{dX(t)}{dt} - h_i \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \right\} =$$

$$= \sum_{i=1}^4 F_{Xi}(t) + F_H(t) \sin \alpha ; \quad (2)$$

для координаты  $\varphi$ :

$$J_{ш} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \left\{ C_{Ki} (\Delta Y_i) l_i [l_i \varphi(t) + Y(t) - Y_{Ki}(t)] + K_{Ki} (C_{Ki}) \left[ l_i \frac{d\varphi(t)}{dt} - \frac{dY(t)}{dt} - \frac{dY_{Ki}(t)}{dt} \right] \right\} +$$

$$\sum_{i=1}^4 \left\{ C_i (\Delta X_i) h_i [X(t) - \varphi(t) h_i] + K_i (C_i) h_i \left[ \frac{dX(t)}{dt} - \frac{d\varphi(t)}{dt} h_i \right] + F_{Yi}(t) l_i \right\} =$$

$$= -\frac{h}{2} \sum_{i=1}^4 F_{Xi}(t) - F_H(t) (L_p \cos \alpha - \frac{h}{2} \sin \alpha) , \quad (3)$$

где  $h$  – высота щетки;  $Y(t)$ ,  $X(t)$ ,  $\varphi(t)$  – радиальное, тангенциальное и угловое перемещение щетки в заданной системе координат;  $l_i$ ,  $h_i$  – плечи ГЭ контактного слоя и направляющих;  $F_{Yi}$ ,  $F_{Xi}$  – силы трения в ГЭ контактного слоя и направляющих:

$$F_{Yi}(t) = \left\{ C_i (\Delta X_i) [X(t) - \varphi(t) h_i] + K_i (C_i) \left[ \frac{dX(t)}{dt} - \frac{d\varphi(t)}{dt} h_i \right] \right\} K_{Ti} \text{sign} \frac{d\Delta Y_i(t)}{dt} ;$$

$$F_{Xi}(t) = \left\{ C_{Ki} (\Delta Y_i) [Y(t) - Y_{Ki}(t) + \varphi(t) l_i] + K_{Ki} (C_{Ki}) \left[ \frac{dY(t)}{dt} - \frac{dY_{Ki}(t)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{dt} l_i \right] \right\} K_{TKi} , \quad (4)$$

где  $\Delta Y_i$ ,  $\Delta X_i$  – радиальное и тангенциальное сближение взаимодействующих участков микрорельефов в  $i$ -м ГЭ:

$$\Delta Y_i = Y(t) - Y_{Ki}(t) + l_i \varphi(t) , \quad \Delta X_i = X(t) - h_i \varphi(t) . \quad (5)$$

В соответствии с приведенными уравнениями разработана программа, позволившая изучить влияние различных факторов на трехкоординатные колебания щетки и тангенциальные распределения контактной неустойчивости, контактного давления и удельной контактной жесткости. На рис. 2 в качестве примера показаны взаимосвязанные динамические реакции на стандартные кинематические возмущения, полученные с помощью динамической модели, на рис. 3 – контактные распределения.

**Выводы.** Анализ характеристик, полученных при различных условиях и для разных кинематических возмущений показывает, что контактные распределения имеют нелинейный характер; при осевом приложении нажимного усилия набегаящий край контактирует более устойчиво, чем сбегающий; контактное давление выше по краям щетки, чем посередине; распределение контактной жесткости имеет форму, качественно инверсную по отношению к распределению КОН; повышения линейности распределений жесткости и КОН можно достигнуть при положительных величинах угла  $\alpha$  и плеча  $L_p$ . Программа позволяет подбирать рациональные параметры контактных пар (материалы, размеры, усилия нажатия и др.)

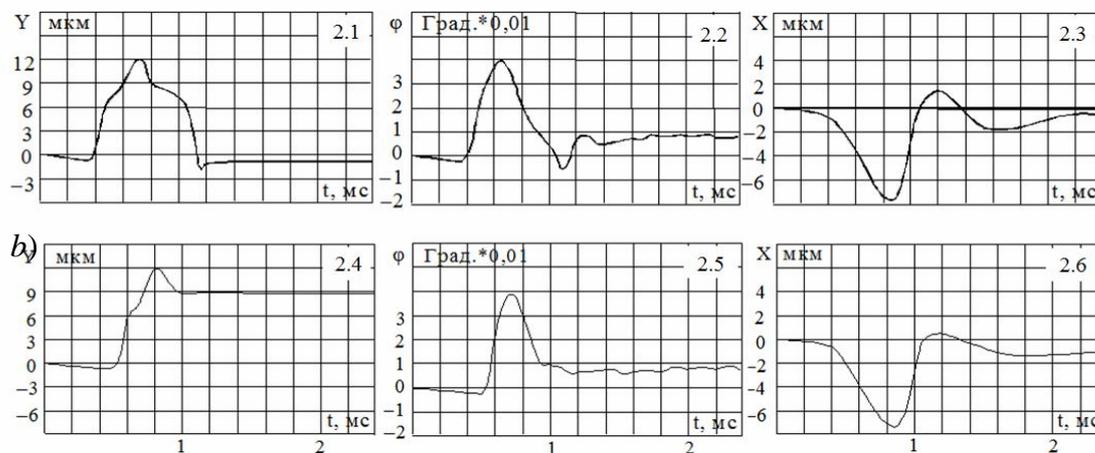


Рис. 2. Реакции на импульсное (2.1-2.3) и ступенчатое (2.4-2.6) возмущения при  $\alpha=0$

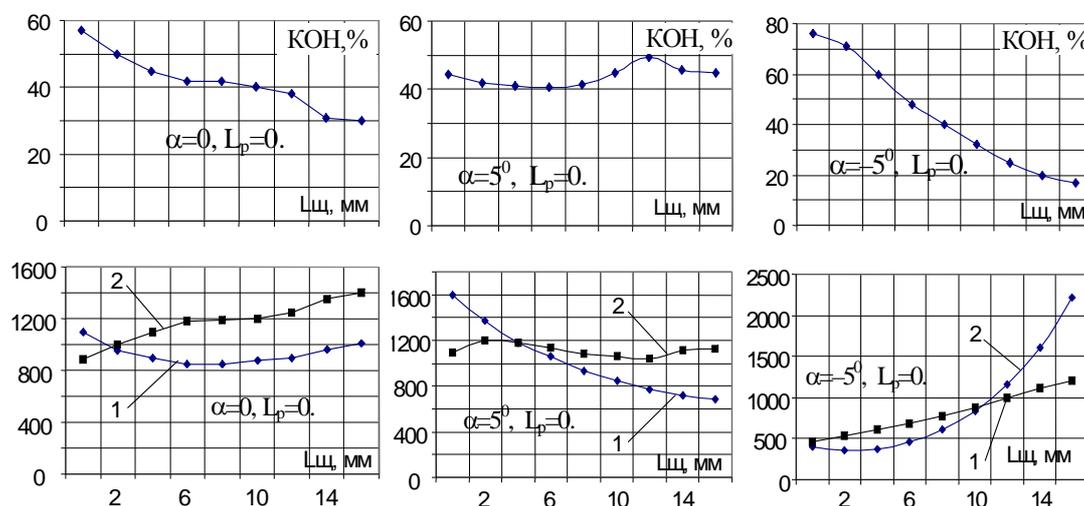


Рис. 3. Контактные распределения при различных величинах  $\alpha$  и  $L_p$ .  
1 – удельное нажатие, Н/м, 2 – удельная контактная жесткость, МН/м/м

**Список литературы:** 1. Плохов И. В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов. Диссертация доктора технических наук. – СПб: СПбГПУ, 2001. 2. Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование микрорельефа поверхностей контактирующих деталей. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – №5. – С. 180–183. 3. Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование процессов электрофрикционного взаимодействия в узлах скользящего токосъема. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – №4. – С. 166–173. 4. Плохов И.В., Козырева О.И., Ильин А.В. Общие подходы к моделированию динамики электрофрикционного взаимодействия. Вестник Псковского государственного университета. 2013. №3. 5. Alexander Ilyin, Igor Plokhov, Andrey Isakov. The simulation model of a sliding contact. Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference June 20–22, 2013. Volume II. Rezekne, 2013. P. 111–115. ISSN 1691-5402. 6. Плохов И.В., Козырева О.И., Ильин А.В. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия. Вестник Псковского государственного университета. 2013. №3. С.