

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МИКРОКОНТАКТЕ

*Рассматривается проблема аналитического решения задачи расчёта нестационарного температурного поля в области микроконтакта. Описана трехмерная модель электрического контакта в среде COMSOL Multiphysics. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.*

**Ключевые слова:** *электрофрикционное взаимодействие, скользящий электрический контакт, имитационное моделирование.*

Для определения нестационарного температурного поля контактного слоя в имитационной модели электрофрикционного взаимодействия [1–4] необходимо решить задачу нестационарной теплопередачи для каждого контактного элемента (КЭ) переходной плоскости. Если узел находится в состоянии контакта через поверхностные плёнки, то в нём выделяется теплота, равная работе сил трения. Если узел находится в состоянии электрической проводимости, то в нём выделяется как теплота в результате работы сил трения, так и в джоулево тепло в результате протекания электрического тока. При отсутствии взаимодействия в КЭ происходит только перераспределение тепла с соседними КЭ и телом контакта. На рис. 1 показана модель микроконтакта (ось  $Y$  направлена от нас). Пятно микроконтакта, на котором происходит взаимодействие КЭ, представлено окружностью радиусом  $r_b$  в центре КЭ. Через окружность радиусом  $r_c < r_b$  протекает электрический ток. Через кольцо  $r_b - r_c$  между контактами осуществляется теплопередача. По остальной площади контактного слоя взаимодействие между контактами отсутствует. Через боковые поверхности  $x = \pm l_x$ ,  $y = \pm l_y$  осуществляется теплопередача с соседними КЭ, а через поверхности  $z = \pm l_z$  — с телом контактов. Необходимо определить изменение средней температуры перегрева узлов щётки и ротора, изменение средней температуры щётки и ротора в области контакта (объёме полусферы радиусом  $r_b$ ) и изменение максимальной температуры щётки и ротора в области контакта.

Решение подобных задач встречается у Р. Хольма [5, С. 252–255] и В. Т. Омельченко [6].

Хольм рассматривает задачу определения температуры в контакте между угольной щёткой и медным кольцом или коллектором. Среднюю температуру меди сравнительно легко определить путём непосредственного наблюдения, в то время как температура перегрева в контактных пятнах ограничена настолько малыми участками, что её невозможно определить экспериментально. Далее автором рассматривается задача определения температуры перегрева контактных пятен относительно средней температуры медного контакта. При этом Хольм не делает различия между электропроводящей поверхностью и теплопроводящей, хотя на практике

последняя может быть в несколько раз больше первой. Т. к. определить какая часть тепла отводится в медь, а какая в щётку и рассеивается в окружающую среду затруднительно, а обычно щётка нагревается сильнее меди, следовательно, и градиент тёплого потока в контактной поверхности направлен в сторону меди. К нему добавляется часть джоулева тепла, которое выделяется в щётке за счёт прохождения электрического тока через сопротивление стягивания. Пренебрегая теплом, выделяющемся при протекании электрического тока через сопротивления стягивания меди в силу его незначительности, будем считать, что в медь течёт половина джоулева тепла, выделяющегося в щётке. Такое допущение эквивалентно, тому, что температура контактной поверхности равна средней температуре щётки, а самая горячая изотерма делит область стягивания на две части с равными сопротивлениями. Таким образом, в медь поступает тепло  $Q = \frac{1}{2}UI + \mu P v$ , а тепловой поток:

$q = \frac{Q}{n\pi a^2}$ . На основании данных рассуждений Хольм приходит к выводам, что:

обычно средняя температура перегрева не достигает температуры размягчения; при уменьшении радиуса пятна тепло от электрического тока уменьшается пропорционально радиусу, а работа сил трения — пропорционально радиусу в квадрате; температура перегрева щётки не зависит от числа пятен контакта, а температура на контактной поверхности существенно зависит от числа пятен только при  $n < 10$ .

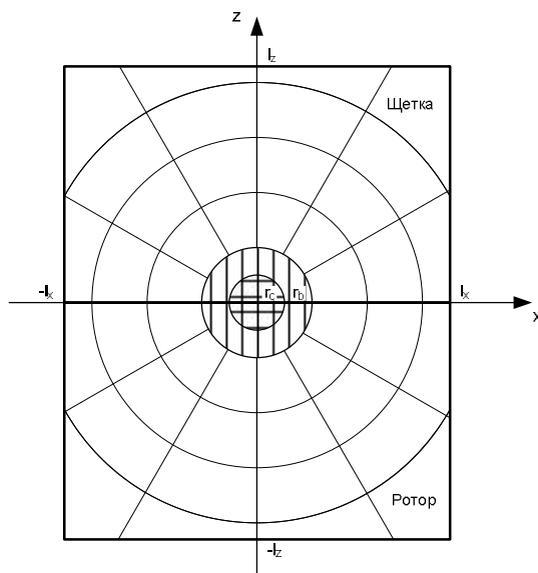


Рис. 1. Модель микроконтакта

Омельченко [6, С. 9–12], рассматривая сферическую модель температурного поля в области контакта, выводит уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \left( \frac{d^2 \theta}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{q}{r^4} \right),$$

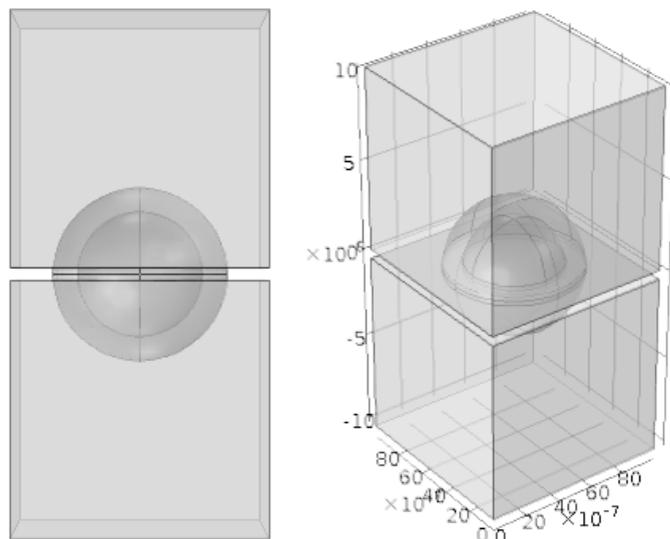
в пределах  $r_b \leq r \leq \infty$ , где  $a^2 = \frac{\lambda}{\rho c}$ .

Далее [6, С. 58–62] приводится решение данного дифференциального уравнения с нулевым перегревом в качестве начального состояния и для граничных условий: заданного входящего теплового потока по сфере с радиусом  $r_b$  и нулевым перегревом на бесконечном удалении от контакта. Недостатками такого подхода являются: решение только для одного контакта в области  $r \geq r_b$  при заданном тепловом потоке, на практике же распределение теплового потока между контактами зависит от свойств их материалов и внешних воздействий.

Таким образом, определение температурного поля в области контакта аналитическими методами является достаточно сложной математической задачей. Обеспечить необходимую точность решения возможно применением современных программных продуктов, основанных на использовании методов численного моделирования. Одним из таких продуктов является COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать практически все физические процессы, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Программа COMSOL содержит множество решателей, с помощью которых можно производить численное моделирование сложных физических систем, взаимодействующих друг с другом.

С использованием COMSOL разработана нестационарная трёхмерная модель микроконтакта (см. рис. 2). Геометрия модели включает два куба с размерами  $cell\_size$  и две сферы радиусами  $rb$  и  $rc$ . Центры сфер находятся в точке  $(cell\_size/2, cell\_size/2, 0)$ . Кубы отнесены друг от друга на расстояние  $d = cell\_size/100$ . Плоскость  $z = 0$  делит модель на две части: узел щётки  $z > 0$  и узел ротора  $z < 0$ . Для узлов щётки и ротора определены различные материалы с заданными свойствами:  $brush\_rho$  и  $rotor\_rho$  — плотность,  $brush\_rho\_el$  и  $rotor\_rho\_el$  — удельное электрическое сопротивление,  $brush\_Cp$  и  $rotor\_Cp$  — теплоёмкость,  $brush\_k$  и  $rotor\_k$  — теплопроводность. Электрическая проводимость материала кольцевого слоя  $rb - rc$ , находящегося между контактами  $z = -d/2 \dots + d/2$ , равна нулю, что соответствует области контактирования через поверхностные плёнки.

Для расчёта физических процессов в модели включены модули расчёта электрических токов (Electric Currents), теплопередачи в твёрдых телах (Heat Transfer in Solids), джоулева нагрева (Joule Heating).



**Рис. 2.** Нестационарная трёхмерная модель микроконтакта в COMSOL

Для модуля электрического в качестве начального значения задан нулевой потенциал для всего объёма модели. В качестве граничных условий: для боковой поверхности ротора  $z = -cell\_size$  земля, а для боковой поверхности щётки  $z = +cell\_size$  нормальная плотность тока  $J = I/cell\_size^2$ , где  $I$  — ток, протекающий через микроконтакт. Остальные боковые поверхности узлов ротора и щётки считаем электрически изолированными.

Для модуля теплопередачи в твёрдых телах в качестве начальных условий заданы исходные температуры узлов щётки  $T = brush\_T0$  и ротора  $T = rotor\_T0$ . В качестве граничных условий для всех боковых граней узлов щётки и ротора заданы тепловые потоки, определяемые выражением  $q = 2k/cell\_size \cdot (T_{ext} - T)$ , где  $k$  — теплопроводность материала  $brush\_k$  или  $rotor\_k$ ;  $T_{ext}$  — средняя температура соседнего узла на расстоянии  $cell\_size/2$  от граничной поверхности;  $T$  — температура граничной поверхности. В качестве  $T_{ext}$  для каждой боковой поверхности выступают температуры соседних узлов  $brush\_T1...brush\_T4$  и  $rotor\_T1...rotor\_T4$ , а для верхней и нижней поверхностей — средняя температура соответствующего контакта  $brush\_T$  и  $rotor\_T$ . В слое  $z = -d/2...+d/2$  сферы  $rb$  между контактами расположен источник тепла мощностью  $friction$ , равной по величине мощности работы сил трения. Внутренние боковые поверхности узлов щётки и ротора ( $z = +d/2$  и  $z = -d/2$ ) термически изолированы.

Для модуля джоулева нагрева задано преобразование электрического тока в тепло по всему объёму модели.

Время и шаг моделирования подобраны путём пробных экспериментов с использованием исходных данных из имитационной модели.

COMSOL предлагает широкие средства представления результатов моделирования, например: двухмерное графическое отображение распределения значений потенциала электрического поля, плотности тока, температуры, теплового потока и др.; вывод значений в любой точке модели в табличном или графическом виде; вывод средних, суммарных минимальных или максимальных значений для заданного объёма и т. п. На следующем рисунке показаны результаты моделирования: двухмерное температурное поле в разрезе  $x = cell\_size/2$  и графики изменения во времени средних температур узлов щётки и ротора, максимальных температур узлов щетки и ротора, средних температур щётки и ротора в области контактного пятна.

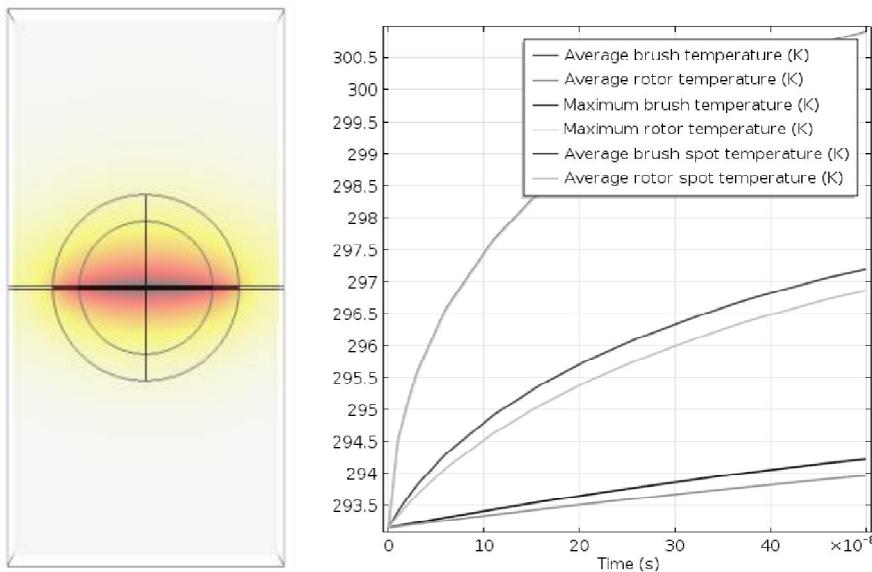


Рис. 3. Результаты моделирования

Расчёт модели одиночного КЭ (микроконтакта) в среде COMSOL достаточно длителен. В интегральной модели электрофрикционного взаимодействия количество КЭ составляет сотни тысяч. Поэтому в дальнейшем необходимо построить многофакторные регрессионные выражения аппроксимирующие результаты моделирования, полученные в среде COMSOL, с использованием теории планирования эксперимента.

#### Выводы:

Рассмотрена проблема аналитического решения задачи расчёта нестационарного температурного поля в области микроконтакта с применением новых подходов по определению сопротивления стягивания. Описана трёхмерная модель электрического контакта в среде COMSOL Multiphysics. Приведены результаты вычислительного эксперимента, который показал принципиальную возможность построения работоспособной многофакторной имитационной модели микроконтакта.

#### Литература

- 1) Плохов И. В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъёма турбогенераторов. Диссертация доктора технических наук. СПб.: СПбГПУ, 2001.
- 2) Плохов И. В. Модель динамики токопередачи через скользящий контакт // Электротехника. М., 2005. № 2. С. 28–33.
- 3) Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование процессов электрофрикционного взаимодействия в узлах скользящего токосъёма // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2013. № 4. С. 166–173.
- 4) Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование микрорельефа поверхностей контактирующих деталей // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2013. № 5. С. 180–183.
- 5) Хольм Р. Электрические контакты. М.: Иностранная литература, 1961.
- 6) Омельченко В. Т. Теория процессов на контактах. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1979. 128 с.

#### Об авторе (ах)

**Ильин Александр Викторович** — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: al.ilyin@yandex.ru

**Плохов Игорь Владимирович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: igor\_plohov@list.ru

**Козырева Оксана Игоревна** — старший лаборант кафедры «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

**Андрусич Андрей Владимирович** — учебный мастер кафедры «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

*A. V. Ilyin, I. V. Plohov, O. I. Kozyreva, A. V. Andrusich*

### 3D MODELING OF NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD IN MICROCONTACT

*The article considers issue of analytic calculation non-stationary temperature field in microcontact zone. There is described 3D-model of electrical contact in COMSOL Multiphysics. The outcomes of computational experiment are brought.*

**Key words:** *electro friction engagement, slide electric contact, simulation system.*

#### About the author(s)

**Ilyin Alexander Viktorovich**, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: al.ilyin@yandex.ru

**Plohov Igor Vladimirovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: igor\_plohov@list.ru

**Kozyreva Oksana Igorevna**, Assistant of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

**Andrusich Andrey Vladimirovich**, Assistant of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.