

3. Федер Е. Фракталы. М. :Мир. 1991.
4. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М. : Наука. 1991.
5. Фракталы в физике / Труды VI международного симпозиума по фракталам в физике. М. : Мир. 1988.
6. Плохов И. В., Савраев И. Е. Вычислительная модель развития перколяционных кластеров контактной проводимости // Труды Псковского политехнического института. С.-Петербург/Псков : СПбГТУ, 1997. Вып.1. С.51–54.

*I. V. Plohov, A. V. Iliin, O. I. Kozyreva*

## **GENERAL APPROACHES TO SIMULATION OF THE DYNAMICS ELECTRO FRICTION ENGAGEMENT**

*Electro friction engagement in electric machines is considered. General approach for building of the dynamic simulation system slide electric contact is developed. Mathematical relations for general groups components of state vector of contact element are given.*

**Keywords:** electro friction engagement, slide electric contact, simulation system, fractal clusters.

Плохов Игорь Владимирович — заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д.т.н., профессор, igor\_plohov@list.ru.

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, аспирант, al.ilyin@yandex.ru.

Козырева Оксана Игоревна — старший лаборант кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, аспирант, ks\_33n@rambler.ru.

УДК 51-74; 62-768.3

*И. В. Плохов, А. В. Ильин, О. И. Козырева*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

*Рассматривается динамическая модель электрофрикционного взаимодействия. Заданы три основных класса компонент вектора состояния: механический, тепловой и химический, для которых приведены основные математические соотношения.*

**Ключевые слова:** электрофрикционное взаимодействие, компоненты вектора состояния, скользящий электрический контакт, контактный элемент, динамическая модель.

Для реализации динамической модели электрофрикционного взаимодействия (ЭФВ) необходимо определить компоненты вектора состояния [1, 2]. В данной статье уделим внимание заданию трёх основных классов компонент:

механического, теплового и химического. Определению электрического класса посвятим отдельную статью.

### Механический класс компонент

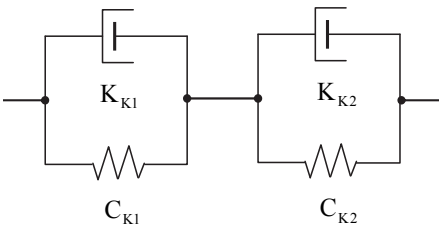
*Контактная жёсткость* элемента нелинейно зависит от температуры. Точное определение данной зависимости сопряжено со значительными трудностями. Поэтому определим её исходя из следующих соображений.

Контактная жёсткость имеет слабую зависимость от температуры в области, охватывающей диапазон от комнатных температур до температуры рекристаллизации ( $\theta_p$ ). В диапазоне от  $\theta_p$  до температуры плавления  $\theta_n$  наступает размягчение материала и постепенная потеря жёсткости (до  $C_k=0$ ). После этого действуют лишь усилия вязкого сопротивления, пропорциональные скорости изменения величины сближения  $Y_k$  и определяемые коэффициентом демпфирования  $K_k$ . Изменение жёсткости до нулевого значения происходит в диапазоне  $]\theta_p, \theta_n[$ , поэтому:

$$C_k = \begin{cases} C_{кн} \forall \theta \leq \theta_p, \\ C_{кн} \cdot \frac{\theta_n - \theta}{\theta_n - \theta_p} \forall \theta \in ]\theta_p, \theta_n[, \\ 0 \forall \theta \geq \theta_n, \end{cases} \quad (1)$$

где  $C_{кн}$  — номинальная жёсткость контактного элемента.

Температура рекристаллизации для меди  $\sim 190^\circ\text{C}$ , для железа  $\sim 500^\circ\text{C}$ . Прочностные характеристики графита возрастают по мере увеличения температуры. Уменьшение механической прочности контактного материала (размягчение) начинается при температуре на контактной поверхности равной примерно 0,3 температуры плавления.



Жёсткость КЭ  $C_k$  представим как последовательное  $C_{к1}$  и  $C_{к2}$ , соответствующих материалам контактной пары. Температуры размягчения и плавления могут быть различными, поэтому в каждом КЭ зададим последовательное соединение двух реологических моделей Кельвина-Фохта [3].

$$C_{к1} = \begin{cases} C_{кн1} \forall \theta \leq \theta_{p1}, \\ C_{кн1} \cdot \frac{\theta_{n1} - \theta}{\theta_{n1} - \theta_{p1}} \forall \theta \in ]\theta_{p1}, \theta_{n1}[, \\ 0 \forall \theta \geq \theta_{n1}, \end{cases} \quad C_{к2} = \begin{cases} C_{кн2} \forall \theta \leq \theta_{p2}, \\ C_{кн2} \cdot \frac{\theta_{n2} - \theta}{\theta_{n2} - \theta_{p2}} \forall \theta \in ]\theta_{p2}, \theta_{n2}[, \\ 0 \forall \theta \geq \theta_{n2}, \end{cases} \quad (2)$$

$$C_k = C_{к1} + C_{к2}. \quad (3)$$

Зависимость контактной жёсткости от сближения и температуры  $C_k = f(\theta, Y_k)$  представим в упрощённом виде:

$$C_k = \sum_{i=1}^n \begin{cases} C_{kni} \forall Y_{ki} < 0 \wedge \theta_i \leq \theta_{pi}, \\ C_{kni} \cdot \frac{\theta_{ni} - \theta_i}{\theta_{ni} - \theta_{pi}} \forall Y_{ki} < 0 \wedge \theta \in ]\theta_{pi}, \theta_{ni}[, \\ 0 \forall Y_{ki} \geq 0 \vee \theta_i \geq \theta_{ni}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $n$  — количество разнородных слоёв различной жёсткости в КЭ.

Так, например, наличие окисной плёнки и (или) продуктов износа между контактирующими материалами представляется как третье промежуточное тело с типовой реологической моделью. Тогда  $n = 3$ , и

$$C_k = C_{k1} + C_{k2} + C_{k3}. \quad (5)$$

Контактное демпфирование вычисляем в диапазоне  $\theta < \theta_n$ , а контактное сближение определяем из взаимосвязанных механических колебаний скользящего контакта по модели, представленной на рис. [1].

$$K_k = \sqrt{2m \cdot C_k \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon^2}\right)}. \quad (6)$$

Так как введение в обобщённую модель ЭФВ расчёта механических колебаний существенно снижает быстродействие, используем заранее вычисленные колебания, или используем наложение типовых колебательных процессов, характерных для данного СК. Введение в обобщённую модель возмущающих инерциальных и кинематических воздействий выполняется путём задания закона модуляции вектора нажимного усилия  $F_n$  как по модулю, так и по направлению, а совокупное контактное сближение микрорельефов формируется из условия достижения номинальной жёсткости на контакте.

Контактное усилие  $F_k$  представим в динамике двумя составляющими  $F_k = F' + F''$ .

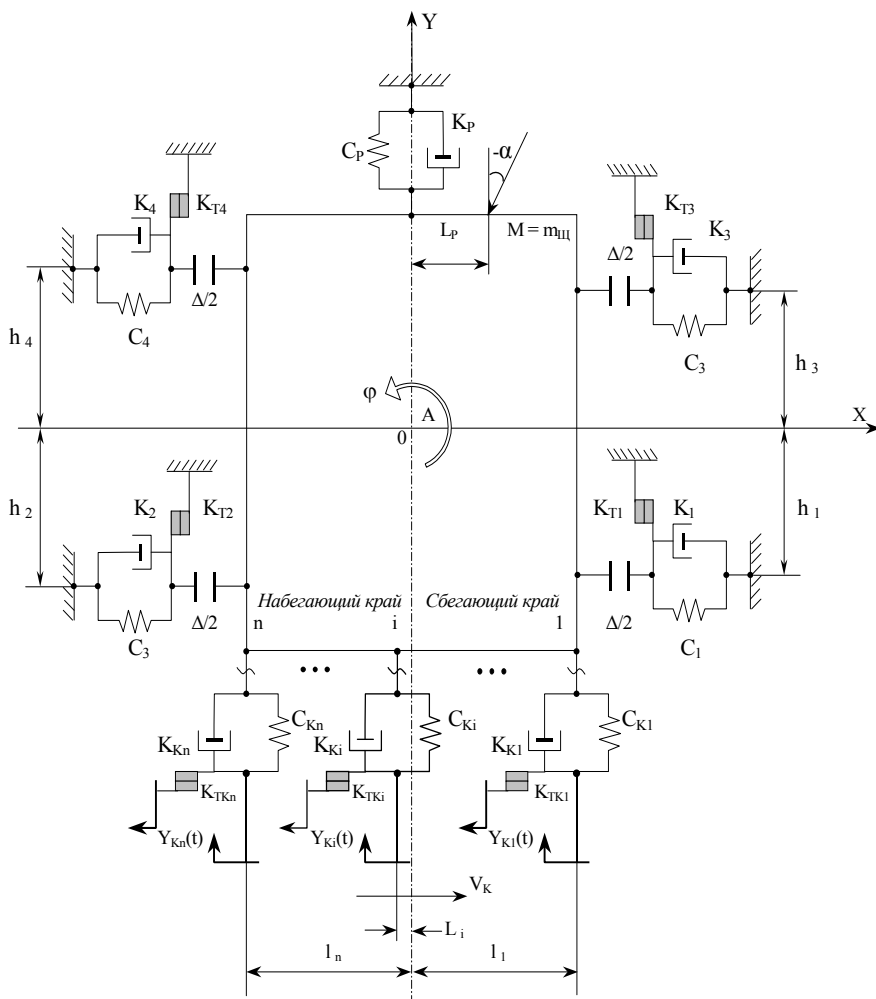
Первая содержит реакцию контактной жёсткости на сближение и силу вязкого сопротивления

$$F'_k = C_k Y_k + K_k \frac{dY_k}{dt}, \quad (7)$$

а вторая — суммарное электродинамическое усилие

$$F''_k = F_{\mathcal{E}} + F_{II}, \quad F_{\mathcal{E}} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_0}{r}, \quad F_{II} = \frac{\mu_0 I^2}{6\pi}, \quad (8)$$

где  $R_0, r$  — эквивалентный радиус площади непосредственной токопередачи и радиус поперечного сечения контакта;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость, Гн/м.



**Рис.** Динамическая модель механики скользящего контакта

Расчёт усилий производим для отдельных кластеров, а усилие в отдельном КЭ определяем путём равномерного распределения расчётного усилия по всем элементам кластера.

Плотность  $\rho$  определяем через массы  $m_i$  материалов слоёв в фиксированном объёме КЭ:

$$\rho = \frac{1}{V_{КЭ}} \sum_{i=1}^n m_i. \quad (9)$$

### Тепловой класс компонент

В данном разделе рассмотрены основные математические соотношения, описывающие тепловые свойства КЭ, а также отношения тепловой связи граничащих друг с другом элементов.

Контактный слой содержит три типа элементов: 1) элементы, относящиеся к телу неподвижного контакта; 2) элементы тела подвижного контакта; 3) элементы промежуточных включений (газ, плёнки, продукты износа). Каждый элемент обладает теплоёмкостью  $C$ , которая определяется его массой  $m$  и удельной теплоёмкостью материала  $c$ .

$$C = c \cdot m, \quad m = \Delta x^2 \cdot \Delta h \cdot \rho, \quad (10)$$

где  $\Delta h$  — высота элемента;  $\Delta x$  — величина шага сетки разбиения переходной плоскости;  $\rho$  — плотность материала КЭ.

Удельная теплоёмкость зависит от температуры материала. Данную зависимость для каждого материала представим в модели соответствующей аппроксимирующей функцией. Достаточной оказывается линейная аппроксимация.

Теплоёмкость фигурирует в модели на стадии тепловыделения в КЭ, вызванном протеканием тока и граничным трением. Перераспределение тепла в зоне контакта обусловлено теплопроводностью  $k$ , которая также зависит от температуры. Для большинства материалов данную зависимость  $c$  достаточной точностью можно считать линейной

$$k = k_0 \cdot [1 + b \cdot (\theta - \theta_0)], \quad (11)$$

где  $k_0$  — значение коэффициента теплопроводности при температуре  $\theta_0$ ;  $b$  — постоянная, определяемая опытным путем.

*Теплопроводность газов* определяется переносом кинетической энергии молекулярного движения через хаотические столкновения отдельных молекул. При этом коэффициент теплопроводности определяется соотношением:

$$k = \frac{1}{3} \bar{v} \cdot l \cdot C_v \rho, \quad (12)$$

где  $\bar{v} = \sqrt{\frac{3R\theta}{\mu}}$  — средняя скорость перемещения молекул газа;  $l$  — средняя длина свободного пробега молекул между соударениями;  $C_v$  — теплоёмкость при постоянном объёме;  $\rho$  — плотность;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\mu$  — молекулярная масса газа.

При наличии разного рода примесей коэффициент теплопроводности металлов резко убывает. В отличие от чистых металлов коэффициенты теплопроводности сплавов при повышении температуры увеличиваются.

### **Химический класс компонент**

Данный класс является трудно определяемым, поскольку практически отсутствуют экспериментальные данные о химических процессах, протекающих в электрическом СК. Поэтому ограничимся при моделировании введением пре-

дельно упрощённых закономерностей.

В зоне контакта, а также на поверхностях, не контактирующих в данный момент времени, протекают два основных типа химических реакций — окисления и восстановления металлов с участием кислорода и водорода. Окислительные процессы увеличивают толщину окисной пленки на контактной поверхности, а восстановительные действуют в противоположном направлении. Скорость протекания реакций в каждом КЭ определяется главным образом значением локальной температуры.

При рассмотрении быстрых процессов ЭФВ данными зависимостями пренебрегаем.

### Выводы

Определены компоненты вектора состояния, необходимые для реализации динамической модели электрофрикционного взаимодействия. Заданы три основных класса компонент: механический, тепловой и химический. Результаты, приведённые в статье, используются при создании алгоритмов динамической имитационной модели ЭФВ. Дальнейшие исследования планируется посвятить подробному описанию электрического класса компонент модели и представлению основных имитационных алгоритмов.

### Литература

1. Плохов И. В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъёма турбогенераторов. Диссертация д.т.н. С.-Петербург, СПбГПУ, 2002.
2. Плохов И. В. Модель динамики токопередачи через скользящий контакт. Электротехника. №2. 2005. С. 28–33.
3. Рейнер М. Реология. М. : Наука. 1965.

*I. V. Plohov, A. V. Iliin, O. I. Kozyreva*

## DETERMINATION GROUPS COMPONENT OF STATE VECTOR DYNAMIC SIMULATOR OF ELECTRO FRICTION ENGAGEMENT

*Dynamic simulator of electro friction engagement is considered. Three main groups of components of state vector of contact element are defined: mechanical, thermal, chemical for which the basic equations are given.*

**Keywords:** electro friction engagement, component of state vector, slide electric contact, contact element, dynamic simulator.

Плохов Игорь Владимирович — заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, профессор, igor\_plohov@list.ru.

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, аспирант, al.ilyin@yandex.ru.

Козырева Оксана Игоревна — старший лаборант кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, аспирант, ks\_33n@rambler.ru.