

*Е.И. БАЙДА*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

## **МУЛЬТИФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ГРАНИЧНОГО ТОКА СВАРИВАНИЯ КОНТАКТОВ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ**

Рассмотрена мультифизическая модель изменения площади контакта нагруженных тел в функции температуры контактной поверхности. Описана математическая постановка задачи и приведен пример расчета граничного тока сваривания. Разработанная модель базируется на комплексных расчетах теории упругости и теплопередачи. Показана зависимость контактных давлений размеров контактной площадки в функции температуры. Установлено, что значение температуры контактной площадки существенно зависит от температуры удаленных точек при протекании аварийных сверхтоков. Разработанная методика может применяться для оценки и расчета термической стойкости электрических аппаратов.

**Ключевые слова:** вакуумный выключатель, ток сваривания, площадь контакта.

**Введение.** Одним из требований технического задания на проектирование вакуумных выключателей средних напряжений является условие термической стойкости. Это условие заключается в нормальном функционировании аппарата после прохождения через его контакты априори заданного тока в течение определенного промежутка времени (ток 20 кА (действующее значение), время – 3 секунды). Для оценки этого параметра (термической стойкости) необходимо иметь зависимость радиуса контактной площадки в функции температуры ее нагрева и значение граничного тока сваривания контактов.

**Цель статьи.** Разработка и исследование математической модели по определению граничных токов сваривания контактов вакуумных выключателей на напряжение (6-10) кВ и номинальный ток 1250 А.

### **Основная часть.**

Допущения, принятые в модели:

- вид контакта – линейный;
- постоянная времени нагрева контактной поверхности невелика (0,1 мс) [1];
- температура контактной поверхности "мгновенно" отслеживает изменение температуры любой ее точки (мала постоянная времени);
- модуль упругости материала является линейной функцией температуры [2].

Расчетная модель контактной поверхности показана на рис. 1.

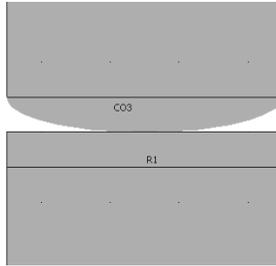


Рис.1 – Расчетная модель контактной поверхности:  
CO3, R1 – программные названия расчетных областей

Нижний контакт (верхняя часть которого представляет собой полый цилиндр) показан на рис. 2.



Рис. 2 – Нижний подвижный контакт

Расчет проводился исходя из значения конечного контактного нажатия 2,5 кН (согласно техническим условиям на выключатель); сквозной ток короткого замыкания по ТУ на выключатель – 20 кА (действующее значение); материал контактов – медь; время протекания тока – 3 с.

Методика расчета граничного тока сваривания:

1. На основании решения мультифизической задачи (совместное решение уравнений теории упругости и теплопроводности) определяется зависимость эквивалентной площади контактной площадки в функции температуры (при заданном контактном нажатии). Полученные дискретные данные аппроксимируются сплайном.

2. На основании температуры нагрева контактной площадки и с учетом адиабатического нагрева тела контакта сквозным током короткого замыкания при задаваемой температуре контактной площадки определяется граничный ток сваривания.

3. Проводится сравнительный анализ полученного значения граничного сквозного тока со значением, заданным в технических условиях на выключатель (значение тока по ТУ должно быть меньше расчетного).

Математическая модель.

Уравнения для определения площади контакта [3-5]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot ((\lambda(\vartheta) + G(\vartheta)) \cdot \operatorname{div}(\vec{u})) + \nabla \cdot (G(\vartheta) \cdot \nabla \vec{u}) &= 0; \\ \nabla \cdot (k(\vartheta) \cdot \nabla \vartheta) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $G$  – коэффициенты, зависящие от модуля упругости (который линейно изменялся в зависимости от температуры) и коэффициента Пуассона;  $\vec{u}$  – вектор перемещений;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $\vartheta$  – температура.

Уравнение (1) должно быть дополнено граничными условиями: фиксация нижней поверхности контакта и задание контактное нажатие на верхней поверхности.

Уравнения адиабатического нагрева [5-6]:

$$\begin{cases} c \cdot \gamma \cdot \frac{d\vartheta_0(t)}{dt} = j^2 \cdot \rho_s \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_0(t) - \vartheta_s)); \\ \vartheta_0(0) = \vartheta_u, \end{cases} \quad (2)$$

где  $c$  – теплоемкость;  $\gamma$  – плотность материала;  $j$  – плотность тока удаленного участка;  $\vartheta_u$  – установившееся значение температуры в номинальном режиме.

Уравнение нагрева контактной площадки [6]:

$$\arccos\left(\frac{\vartheta_0(t) + 273}{\vartheta_m(t) + 273}\right) = \frac{I \cdot \sqrt{L}}{4 \cdot k(\vartheta_m(t)) \cdot a_e(\vartheta_m(t))}, \quad (3)$$

где  $\vartheta_0(t)$  – температура удаленной от контактной поверхности точки;  $\vartheta_m(t)$  – температура контактной поверхности;  $I$  – действующее значение тока;  $L$  – постоянная Лоренца;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $a_e$  – эквивалентный радиус площади контакта.

В соответствии с предложенным алгоритмом, подстановка аналитического решения (2) в (3), совместно с данными полученными на основании решения (1) – определение эквивалентного радиуса контактной площадки в функции температуры – дает возможность определить значение граничного тока сваривания контактов.

### Результаты расчетов.

На рис. 3 показано распределение удельных усилий в теле контактов.

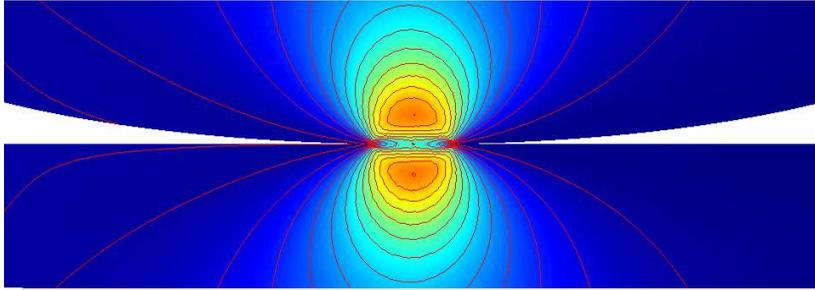


Рис.3 – Распределение напряжений в теле контакта

На рис. 4 показано изменение ширины контактной площадки в долях температуры плавления, где 0 – температура окружающей среды (длина площадки неизменна – длина окружности).

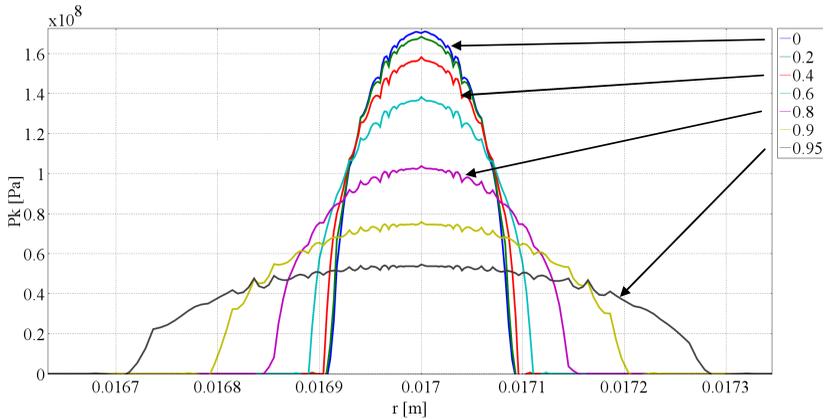


Рис. 4 – Изменение ширины контактной площадки в функции температуры в долях температуры плавления

На рис. 5 показано изменение удельного давления в центре контактной площадки в долях температуры плавления.

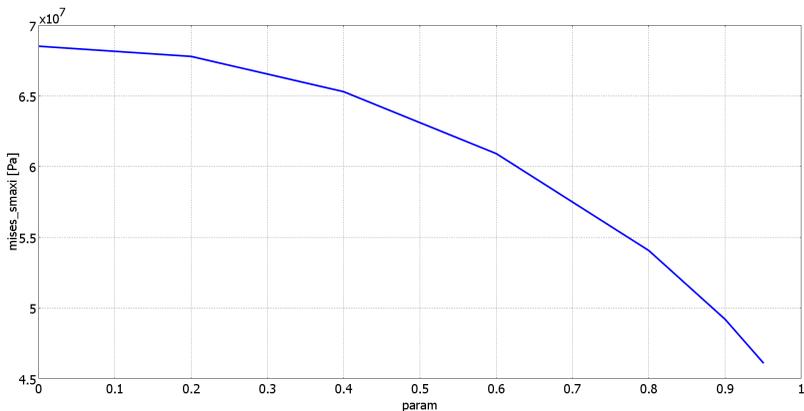


Рис. 5 – Изменение давления в центре контактной площадки в зависимости от температуры

Изменение эквивалентного радиуса контактной площадки показано на рис. 6.

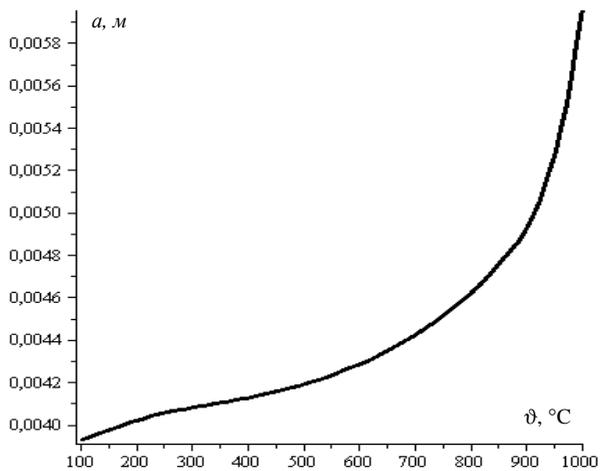


Рис. 6 – Изменение эквивалентного радиуса в функции температуры

Полученных данных вполне достаточно для определения граничного тока сваривания.

### Определение граничного тока сваривания.

Из [1, 2, 6] известно, что сваривание электрических контактов может наступить при температуре много ниже, чем температура плавления материала. Это, так называемое, холодное сваривание. Этому процессу способствуют значительные контактные нажатия и температура нагрева контактов. Как правило, за минимальную температуру холодного сваривания принимается температура рекристаллизации материала, за которую в металлургии принимают температуру  $0,4$  от температуры плавления [7].

В этом случае задавшись временем протекания тока равным 3 с, получим уравнение (3) относительно граничного тока сваривания:

$$\arccos\left(\frac{\vartheta_0(I) + 273}{0,4 \cdot \vartheta_{pl} + 273}\right) = \frac{I \cdot \sqrt{L}}{4 \cdot k(0,4 \cdot \vartheta_{pl}) \cdot a_e(0,4 \cdot \vartheta_{pl})}, \quad (4)$$

где  $\vartheta_{pl}$  – температура плавления материала.

В результате получено значение граничного тока сваривания:

$$I_{gs} = 25800 \text{ A.}$$

Так как согласно ТУ, действующее значение тока сквозного тока равно  $I_s = 20 \text{ кА}$ , то:

$$I_s < I_{gs}.$$

Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [1], из которых следует, что контактное нажатие должно определяться исходя из соотношения:

$$F_k \geq 10 \cdot I, \quad (5)$$

где  $F_k$  – контактное нажатие в кг;  $I$  – ток, заданный по ТУ в кА.

**Выводы.** 1. Разработанная математическая модель является достаточно общей и может быть применена для любых силовых аппаратов. 2. Модель позволяет решить обратную задачу – определить температуру контактной поверхности при заданном аварийном сверхтоке и имеющимся контактным нажатии. 3. Данная модель, в отличие от имеющихся моделей, учитывает влияние температуры нагрева удаленной от контактной площадки точки в режиме протекания сверхтока. 4. Задавшись значением номинального тока, можно определить температуру нагрева контактной поверхности в номинальном режиме. 5. Данная модель позволяет проследить изменение значения переходного контактного сопротивления. 6. Модель позволяет оценить вклад температуры удаленной точки в температуру контактной поверхности в аварийных режимах и выбрать сечение токопровода.

**Список литературы:** 1. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В / Р.С. Кузнецов. – М.: Энергия, 1970. – 544 с. 2. Адоньев Н.М. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовоточных электрических аппаратов / Афанасьев В.В., Борисов В.В. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 425 с. 3. Френкель Я.И. Курс теоретической механики / Я.И. Френкель – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с. 4. Тимошенко С.П. Теория упругости: Пер. с англ. / Дж. Гудьер, С.П. Тимошенко [под редакцией Г.С. Шапиро]. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с. 5. Ким Е.И. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах / В.Т. Омельченко, С.Н. Харин, Е.И. Ким. – Алма-Ата: Наука Каз.ССР, 1977. – 236 с. 6. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеев. – Л-д., Энергия, 1973. – 379 с. 7. Википедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/Рекристаллизация](http://ru.wikipedia.org/wiki/Рекристаллизация).

**Bibliography (transliterated):** 1. Kuznetsov R.C. *Apfrati raspredeleniya elektrihskey energii do 1000 V*. Moscow: Energiya, 1970. Print. 2. Adoniev N.M. *Spravohnik po rashedu i ronstruirovaniu kontaktnix hastey elektrihskey aparatov*. Moscow: Energoatomizdat, 1988. Print. 3. Frenkel Y.I. *Kurs teoretihskey mexaniki*. Leningrad, 1939. Print. 4. Timohenko S.P. *Teoriya uprugosti*. Moscow: Nauka, 1979. Print. 5. Kim E.I. *Matematihskie modeli teplovihs procesov v elektrihskey kontaktax*. Alma-Ata: Nauka Kaz.SSR, 1977. Print. 6. Zaleskiy A.M., Kukekov G.A. *Teplovihs rashedi tlektihskey aparatov*. L-d.: Energiya, 1973. Print. 7. Vikipediya. Web. <[ru.wikipedia.org/wiki/Rekristalizaciya](http://ru.wikipedia.org/wiki/Rekristalizaciya)>.

*Поступила (received) 22.09.14*



**Байда Евгений Иванович**, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера-электромеханика по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1977 г., диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1999 г. Доцент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Научные интересы связаны с расчетами электромагнитных и тепловых полей.