

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ В ПРОЦЕССЕ КОММУТАЦИИ

В статье рассмотрена методика определения температуры поверхности сильноточных разрывных контактов работающих при бездуговой коммутации цепи переменного тока. Определение температуры основывалось на численном решении граничной обратной задачи теплопроводности. Получены расчеты температуры контактных поверхностей в зависимости от времени. Расчет выполнен с помощью пакета прикладных программ MathCAD. Полученные значения температуры с помощью данной методики являются более точные, чем при использовании известных.

Ключевые слова: электрический контакт, температура, задача теплопроводности, контактная поверхность, коммутация.

ВВЕДЕНИЕ

Причины, по которым происходят повреждения контактных систем электрических аппаратов, носят как эксплуатационный, так и конструкторско-технологический характер [1–4]. Последние, не столько результат просчетов в проектировании или технологии изготовления контакт-деталей, такие причины с ростом опыта их производства, как правило, устраняются, а результат неполного понимания условий работы контактных систем. В первую очередь, это происходит из-за слабого обеспечения средствами и методиками диагностики состояния работы разрывных контактов (РК). Основную сложность в оценке разрушающего действия эксплуатационных факторов на РК, оказывает быстротечный характер выделения энергии при их коммутации. Этот процесс проявляется скачкообразным ростом температуры и динамикой механических и физико-химических реакций на контактных поверхностях и в рабочей среде. Отмечено что, несмотря на различную природу деструктивных процессов происходящих при коммутации сильноточных электрических аппаратов, все они проявляются ростом температуры контактных поверхностей РК. Температурный режим работы контактов, считается оперативным и надежным индикатором их рабочего состояния [5]. Рост температуры контактных поверхностей в процессе коммутации обусловлен нарушением баланса тепла генерируемого согласно закону Джоуля-Ленца на контактных соединениях и его количества отдаваемого в окружающую среду. Применение получивших широкое распространение эллиптической и сферической модели невозможно для данной задачи, т. к. они используются для слаботоочных контактов или для контактов работающих в установившемся режиме, что не рассматривалось в данной статье [6, 7].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в разработке методики определения температуры поверхности сильноточных разрывных контактов в процессе коммутации.

МАТЕРИАЛИ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Процесс теплоотвода в окружающую среду значительно более длительный, чем генерация тепла, что приводит к локализации температуры в узком слое контактных поверхностей РК. На рис. 1 показан снимок сильноточного РК (материал – медь М1), с типичными следами электротермического повреждения, локализованными в верхнем слое рабочей поверхности. На рисунке видно, что поверхность контакта нагревалась до температуры плавления (для меди $T_{пл} = 1083^{\circ}\text{C}$). На это отчетливо указывают оплавленные участки и застывшие на поверхности расплава окисные пленки. Такая картина повреждения не соответствует используемым методикам оценки температуры контактных поверхностей [6, 7], при использовании которых значения, получаемые расчетным путем, составили бы менее 300°C .

Для устранения этого противоречия предложен метод оценки температуры контактной поверхности во время замыкания сильноточных контактов на основе численного эксперимента. При его использовании температура недоступных для прямого измерения рабочих зон, какой является поверхность сильноточных разрывных контактов во время коммутации, оценивается по результатам интерполяции значений температур в других точках контакт-детали.

По примеру исследования быстротечных тепловых процессов в других отраслях науки и техники (в области сварки, металлургии, двигателестроении, аэрокосмической технике и др.) применялся хорошо зарекомендовавший себя метод численного эксперимента на основе решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ), что, существенно упрощает и одновременно повышает точность получаемых результатов.

Теоретической основой тепловых нестационарных электротермических процессов служит уравнение теплопроводности:

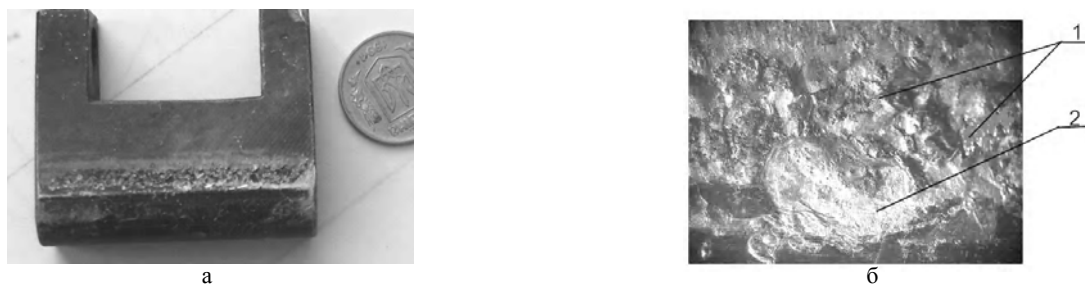


Рисунок 1 – Картина электротермического повреждения контактной поверхности: а – общий вид РК; б – зона повреждения контактной поверхности при увеличении в 30 раз

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T), \quad (1)$$

где $c\gamma$ – удельная объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; $Q_w(x, y, z, t, T)$ – мощность источников тепловыделения.

Поскольку уравнение является многовариантным, необходимо вводить уточняющие условия, содержащие информацию о размерах и теплофизических свойствах изучаемого объекта, а также о начале и продолжительности процесса теплопередачи и зоне нагрева. Это существенно упрощает математическую постановку задачи, сведя ее к одномерному нестационарному решению

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T). \quad (2)$$

В результате, сформулированные условия вместе с крайевыми условиями (начальными и граничными) позволяют получить численную модель теплового процесса, т. е. тепловое поле в виде таблиц чисел, получаемых расчетным путем [8].

На рис. 2 показана общая схема алгоритма решения граничной ОЗТ, которая на разных этапах может быть сформулирована как псевдообратная задача, или как задача Коши [9], решаемая методом конечных разностей или методом квазиобращения соответственно [10].

Для проверки методики была взята модель сильноточного контакта в виде прямоугольного теплоизолированного стержня, нагрев которого осуществляется одномерным тепловым потоком $q_0(t)$ со стороны полупространства $x < 0$ (рис. 3).

Решение уравнений теплопереноса проводится путем рассмотрением двух граничных ОЗТ. При этом первая задача решается как прямая граничная задача теплопроводности. Использование численного метода решения уравнения конечных разностей позволило получить

значение искомой сеточной функции на участке $x_1 - x_2$

$$T_i^{k+1} = \left(1 - \frac{2\tau\lambda}{c\gamma h^2} \right) T_i^k + \frac{\tau\lambda}{c\gamma h^2} (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k), \quad N-1 < i < M-1, k = 0, 1, 2, \dots, K-1. \quad (3)$$

Далее вычислялся тепловой поток $q_1(t)$ на глубине $x = x_1$

$$q_1 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1}, \quad (4)$$

При решении второй ОЗТ, представленной в виде неклассической задачи Коши, используются экспериментальные значения температуры $\hat{T}_1(t)$ и рассчитанный тепловой поток $q_1(t)$. Задача относится к типу некорректных обратных задач математической физики, принцип решения которых, сводится к замене исходного уравнения на регуляризованное (с коэффициентом регуляризации β), обладающее свойствами устойчивости. В дальнейшем, на основе этого уравнения, строится расчетная разностная схема

$$q_{i+1}^0 = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^1 - T_i^0) - \left(\alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^0; \quad j = 0;$$

$$q_{i+1}^j = -\frac{hc\gamma}{2\tau} (T_i^{j+1} - T_i^{j-1}) - \left(\alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^j, \quad j = 1, \dots, M-1;$$

$$q_{i+1}^M = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^M - T_i^{M-1}) - \left(\alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^j, \quad j = M;$$

$$T_{i+1}^j = -\frac{h}{\lambda} q_i^j - \alpha \frac{c\gamma^2 h}{\tau^2} (T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1}) + T_i^j, \quad j = 1, \dots, M-1. \quad (5)$$



Рисунок 2 – Схема моделирования и идентификации тепловых процессов, протекающих при электроконтактном нагреве

Трудности, обусловленные соблюдением устойчивости решения, в дальнейшем потребовали корректировки алгоритма.

Эта методика прошла проверку при исследовании температуры рабочих поверхностей главных контактов контактора РПН в период их замыкания. Входными данными при исследовании служили значения температуры двух точек внутри тела контакта, полученные экспериментальным путем. Измерение и фиксация температуры в этих точках проводилась с помощью термопар по методике и на оборудовании ВИТ.

Начальное значение температуры во всех точках контакта T_0 принималось равным максимальной температуре рабочей среды (для маслонаполненных аппаратов это 90°C – температура трансформаторного масла в баке). Шаг сетки по шкале времени принимался равным $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ с, по пространству – $h = 0,001$ м. Теплофизические характеристики медного контакта: удельная теплоемкость – $c\gamma = 3,35 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}$, теплопроводность –

$$l = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Коэффициенты регуляризации подбирались в пределах $\alpha = 10^{-9} \dots 10^{-15}$ по аналогии со значениями, применяемыми при решении подобных задач тепловой диффузии. Размерность коэффициента регуляризации при вычислении теплового потока – $[\frac{\text{м}^5 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}]$, при вычислении температурного поля – $[\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}{^{\circ}\text{C}^2 \cdot \text{м}^3}]$. Шаг по шкале температур выбирался с учетом устойчивости численного решения уравнения диффузии.

На основе полученных алгоритмов составлена программа в среде «MathCAD», с помощью которой рассчитаны значения, теплового поля РК в период замыкания. Полученная в результате имитационного эксперимента температура рабочей поверхности представлена на рис. 4.

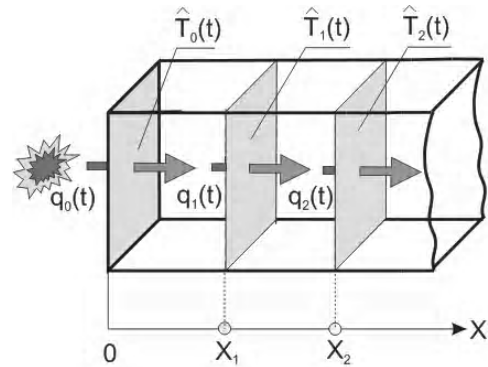


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения температуры контактной поверхности $T_0(t)$

Анализ результатов показывает, что расчетная температура контактных поверхностей значительно превосходит значения температуры в теле контакта даже на глубине 3 мм от поверхности. Динамика роста температуры активно проявляется за период не более 3 с после замыкания.

ВЫВОДЫ

1. Методы, применяемые для измерений температуры контактов в лабораторных условиях, недостаточно объективно оценивают тепловые процессы на поверхности разрывных контактов, поскольку не учитывают их быстротечность и локализацию.

2. Моделирование тепловых процессов при коммутации с помощью ОЗТ является перспективным методом оценки температуры контактных поверхностей. Численный эксперимент, проведенный по результатам имитирующего процесс коммутации сильноточных контактов показал, что температура контактной поверхности определяемая таким методом значительно ближе к реальным значениям.

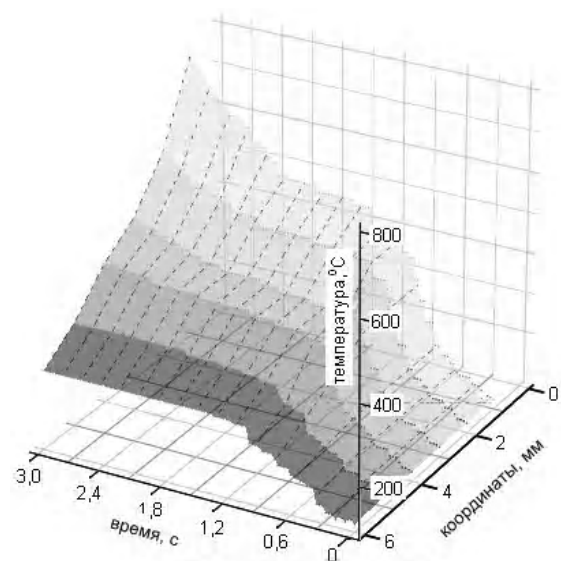


Рисунок 4 – Расчетные значения температуры контакта при электротермическом нагреве

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей от 13.06.2003г. – Режим доступа: <http://www.rza.org.ua/download/o-31.html>
2. Braunovic M. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology / M. Braunovic, N.K. Myshkin, V. V. Konchits. – New York : CRC Press, – 2007. – P. 646.
3. Electrical contacts. Principles and applications / [Slade P. G., Abbott W. H., Braunovic M. etc.] ; ed. by P. G. Slade. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 1055.
4. Garzon R. D. High voltage breakers: design and applications / R. D. Garzon. – New York : Marcel Dekker, Inc. – 2002. – P. 456.
5. Timsit R. S. Electrical conduction through small contact spots / R.S. Timsit // Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – 2004. – Pp. 184–190.
6. Залесский А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А. М. Залесский, Г. А. Кукеков. – Л., 1967. – 378 с.
7. Александров Г. Н. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов. – М., 1985. – 312 с.
8. Волкова О. Г. Измерение температуры поверхности разрывных контактов / О. Г. Волкова // Электрика. – Москва. – 2013. – № 4. – С. 41–43.
9. Алифанов О. М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О. М. Алифанов. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
10. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности / Мацевитый Ю. М. – К. : Наукова думка, 2002. – Т. 2 – 408 с.

Статья поступила в редакцию 27.05.2015
После доработки 12.06.2015

Волкова О. Г.

Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ СИЛЬНОСТРУМНИХ РОЗРИВНИХ КОНТАКТІВ У ПРОЦЕСІ КОМУТАЦІЇ

У статті розглянуто методику визначення температури поверхні сильнострумних розривних контактів, що працюють при бездуговій комутації змінного струму. Визначення температури ґрунтувалося на чисельному рішенні граничної оберненої задачі теплопровідності. Отримано розрахунки температури контактних поверхні в залежності від часу. Розрахунок виконаний за допомогою пакета прикладних програм MathCAD. Отримані значення температури за допомогою даної методики є більш точними, ніж при використанні існуючих.

Ключові слова: електричний контакт, температура, задача теплопровідності, контактна поверхня, комутація.

Volkova O. G.

Ph.D., Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

METHOD FOR THE TEMPERATURE DETERMINATION OF HIGH CURRENT CONTACTS SURFACE DURING THE SWITCHING PROCESS

The article describes the method of temperature determination of the electrical contact surface, which works without electrical arc in AC circuits. Pictures of contact surfaces damage are shown. It indicates that the temperature rises above the melting point of the contact material and there is disagreement in use of the temperature calculation methods. The temperature determination is based on the numerical solution of the boundary inverse heat conduction problem. The regularized solutions are done with the help of quasi-inversion method. The feature of the method is the temperature determination from the experimental temperature values obtained at points available for measurement. Calculation of the contact surface temperature as a function of time is obtained. The calculation is made using the program «MathCAD». The resulting temperature obtained by this method is more accurate than using previously known methods.

Keywords: electrical contact, the temperature, the problem of heat conduction, the contact surface, switching.

REFERENCES

1. Tehnicheskaja jekspluatacija jelektricheskijh stancij i setej ot 13.06.2003g., Rezhim dostupa: <http://www.rza.org.ua/download/o-31.html>
2. Braunovic M., Myshkin N. K., Konchits V. V. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology. New York, CRC Press, 2007, P. 646.
3. Electrical contacts. Principles and applications. Slade P. G., Abbott W. H., Braunovic M. etc.; ed. by P. G. Slade, New York, Marcel Dekker, Inc., 1999, P. 1055.
4. Garzon R. D. High voltage breakers: design and applications. New York, Marcel Dekker, Inc, 2002, P. 456.
5. Timsit R. S. Electrical conduction through small contact spots. Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2004, pp. 184–190.
6. Zalesskij A. M., Kukekov G. A. Teplovye raschety jelektricheskijh apparatov. Leningrad, 1967, 378 s.
7. Aleksandrov G. N., Borisov V. V., Ivanov V. L. Teorija jelektricheskijh apparatov, Moscow, 1985, 312 s.
8. Volkova O. G. Temperature Measurement of a surface interrupting contacts. Electrician, Moscow, 2013, No. 4, pp. 41–43.
9. Alifanov O. M. Identifikacija processov teploobmena letatel'nyh apparatov. Moscow, Mashinostroenie, 1979, 216 s.
10. Macevityj Ju. M. Obratnye zadachi teploprovodnosti. Kiev, Naukova dumka, 2002, T. 2, 408 s.