

В.В. ЗИНОВКИН, д-р техн. наук

О.Г. ВОЛКОВА, аспирант

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТОВ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Запропонована методика діагностування технічного стану контактів перемикаючих пристроїв, яка заснована на математичній моделі температурного стану робочої поверхні електричних контактів з використанням зворотної задачі теплопровідності.

Предложена методика диагностики технического состояния контактов переключающих устройств, основанная на математической модели температурного состояния рабочей поверхности электрических контактов с использованием обратной задачи теплопроводности.

Введение. Диагностика работы переключающих устройств является одним из определяющих факторов, направленных на своевременное предотвращение аварийных ситуаций электротехнических устройств. Любые дефекты контактной системы (износ, поломка, нарушение регулировки, изменение переходного сопротивления и т.д.) приводят к увеличению температуры [1-3]. Основными факторами определяющие техническое состояние контактных соединений является температура рабочей поверхности контактов и их проводимость. Несмотря на то, что исследованию электроконтактного нагрева уделяется достаточно большое внимание изучение тепловых процессов непосредственно происходящих на контактных поверхностях, остается актуальной и достаточно сложной научно-технической задачей.

Анализ предварительных исследований. В научной литературе представлены модели тепловых процессов использующие различные методы вычислительной математики, теплотехники и теплофизики [3-5]. Однако широкого применения из-за своей сложности и громоздкости они пока не получили. При отсутствии единого подхода к решению задач тепловыделения при электроконтактном нагреве, происходит дальнейшее усовершенствования уже зарекомендовавших себя теоритических наработок и адаптации их к конкретным задачам исследования. Проведенный анализ показал [6, 7], что наиболее перспективным для исследования тепловых процессов при электроконтактном нагреве можно считать метод гранич-

ной обратной задачи теплопроводности [5]. При использовании этого метода температура в недоступных для прямого измерения зонах оценивается по результатам интерполяции температур в точках, расположенных на доступном для измерения расстоянии от зоны нагрева.

Экспериментальные методики позволяют измерить усредненную температуру на поверхности контактов. По этим результатам определить температуру наиболее нагретых участков не представляется возможным. При этом при непосредственных измерениях используются термосвечи, термопары, термометры, термопленочные датчики и термосопротивления. Поскольку электротермические процессы в контактах зачастую быстротечны, то ввиду инерционности указанных датчиков даже средняя температура определяется с погрешностью.

Целью работы является разработка методики диагностики технического состояния контактов переключающих устройств методом обратной задачи теплопроводности.

Методика и схема диагностики. Структурная схема диагностики технического состояния контактов переключающих устройств приведена на рис. 1.

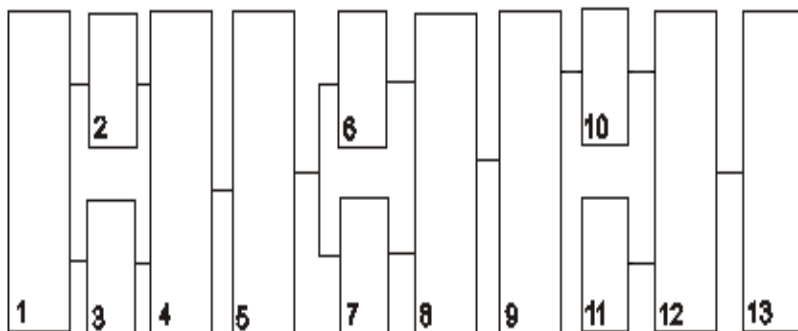


Рис. 1. Структурная схема диагностики технического состояния контактов переключающих устройств.

1 – переключающее устройство; 2 и 3 – система датчиков для измерения температуры в соответствующих местах контакта (согласно рис. 2); 4 – осреднение результатов измерения; 5 – программно-аналитический блок приведения измеренной температуры к температуре в рабочей области; 6 и 7 – блоки прогнозирования (экстраполяции) возможных температур нагрева контактов при дальнейшей эксплуатации при номинальной и резкопеременной нагрузке; 8 и 9 – блоки сопоставительного анализа нагрева относительно нормированного значения и определения реальных перегре-

вов соответственно; 10 – блок расчета проводимости контакта в зависимости от количества коммутаций и данной температуры; 11 – библиотека номинальных и нормированных значений проводимости и перегрева контактов; 12 – блок автоматизированного анализа текущих значений проводимости и перегрева; 13 – блок индикации, аварийной сигнализации и передачи информации оперативному персоналу.

Диагностика технического состояния контактов переключающего устройства осуществляется автоматически в следующей последовательности. Текущая информация о температуре снимается с системы датчиков (блоки 2, 3). Эти датчики располагаются на двух расстояниях от недоступной поверхности контактов исследуемой фазы. Для трехфазной системы они устанавливаются в каждой фазе. Для исключения погрешности измерений в каждой области устанавливается не менее трех термопар, а результаты усредняются. Если информация одной из термопар не поступает ввиду механической неисправности, то при осреднении ее ложные показания не учитываются. Среднее значение температуры из каждой области анализируется в блоке 4.

Расчет температуры рабочей поверхности определяется по косвенным измерениям в зоне нагрева в программно-аналитическом блоке 5. Температура $T_0(t, x_0)$ в контактной области определяется на основе решения обратной задачи теплопроводности [7]. Рассмотрим решение задачи теплопроводности путем применительно к модели контактов контактора РПН. Модель представляет двухслойную теплоизолированную с внешних сторон систему, нагрев которой осуществляется тепловым потоком q_0 со стороны полупространства $x < 0$, как показано на рис. 2.

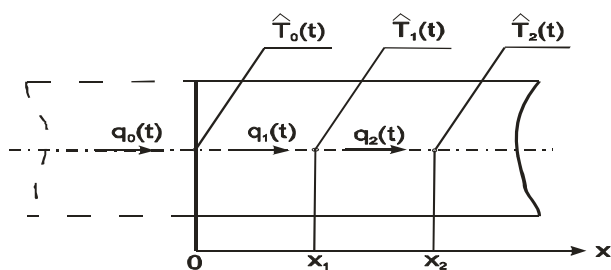


Рис. 2. Схема распространения теплового потока по толщине контакта.

В модели в качестве исходной информации используются экспериментальные значения температур $\hat{T}_1(t)$ и $\hat{T}_2(t)$ которые измерялись хромель-капелевыми термопарами установленными на расстоянии 2 и 4 мм

от контактной поверхности (блок 2, 3 соответственно).

Для определения нагрева в контактной зоне использовалась математическая модель теплопереноса в исследуемой области контакта представленная в следующем виде:

$$c_1\gamma_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right); \quad 0 < x < x_1; \quad 0 < t < t_k, \quad (1)$$

$$c_2\gamma_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right); \quad x_1 < x < x_2; \quad 0 < t < t_k. \quad (2)$$

Эти равенства решаются при следующих начальных условиях и граничных условиях:

$$T_1 = T_0; \quad 0 \leq x \leq x_1; \quad t = 0; \quad (3)$$

$$T_2 = T_0; \quad x_1 \leq x \leq x_2; \quad t = 0; \quad (4)$$

$$T|_{x=x_0=0} = \hat{T}_0(t); \quad x = x_0 = 0; \quad 0 < t < t_k; \quad (5)$$

$$T|_{x=x_1} = \hat{T}_1(t); \quad x = x_1; \quad 0 < t < t_k; \quad (6)$$

$$T|_{x=x_2} = \hat{T}_2(t); \quad x = x_2; \quad 0 < t < t_k. \quad (7)$$

В соотношениях (1)-(7) используются следующие обозначения: $c_i\gamma_i$ – удельная объемная теплоемкость, Дж/(м³°C); λ_i – теплопроводность, Вт/(м°С); T_i – искомое температура, °С ($i = 0,1,2$); x – координата, м; t_k – время протекания исследуемого процесса, с; x_1 – глубина первого слоя, м; x_2 – глубина второго слоя, м; T_0 – начальная температура, °С.

Решение равенств осуществляется путем последовательного решения двух граничных обратных задач теплопроводности. Сначала по результатам измерений температур $\hat{T}_1(t)$ и $\hat{T}_2(t)$ решалась первая граничная обратная задача теплопроводности. Методом конечных разностей рассчитывалось температурное поле слоя контакта. Далее по формуле (8) определяем тепловой поток $q_1(t)$ на глубине $x = x_1$ и переходим к решению второй граничной обратной задачи теплопроводности,

$$q_1 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}. \quad (8)$$

Во второй граничной обратной задаче теплопроводности по результатам измерений температуры $\hat{T}_1(t)$ и рассчитанному тепловому потоку $q_1(t)$ на глубине $x = x_1$ определяется температура и тепловой поток на

поверхности $x = 0$. Данную задачу ставим в форме задачи Коши:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -a \frac{\partial q}{\partial x}; \quad 0 < x < x_1; \quad 0 < t < t_k; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -q; \quad 0 < x < x_1; \quad 0 < t < t_k; \quad (10)$$

$$T(0, t) = \hat{T}_1(t); \quad \frac{\partial T}{\partial x} = -q_1(t); \quad x = 0; \quad 0 < t < t_k, \quad (11)$$

где $T(t, x)$ – искомое температурное поле, °C; \hat{T}_1 и $q_1(t)$ – заданные функции; $q(t, x)$ – тепловой поток, °C/c; a – температуропроводность, м²/с.

Начальное распределение температур в контакте принималось равным температуре охлаждающей среды T_0 . Применяем метод квазиобращения и метод конечных разностей для выражений (9)-(11) и рассчитываем значение температуры и теплового потока на поверхности контакта [8]:

$$q_{i+1}^0 = -\frac{l}{a\tau} \left(T_i^1 - T_i^0 \right) - (\alpha l - 1) q_i^0; \quad j = 0; \quad (12)$$

$$q_{i+1}^j = -\frac{l}{2a\tau} \left(T_i^{j+1} - T_i^{j-1} \right) - (\alpha l - 1) q_i^j; \quad j = 1, \dots, M - 1; \quad (13)$$

$$q_{i+1}^M = -\frac{l}{2a\tau} \left(T_i^M - T_i^{M-1} \right) - (\alpha l - 1) q_i^M; \quad j = M; \quad (14)$$

$$T_{i+1}^j = -\frac{\alpha l}{a^2 \tau^2} \left(T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1} \right) + T_i^j - l q_i^j; \quad j = 1, \dots, M - 1, \quad (15)$$

где τ – дискретные значения координат времени, с; l – дискретные значения пространственных координат, м; α – корректирующий параметр.

Блок-схема алгоритма приведения результатов измерений температуры к рабочей области контакта приведена на рис. 3.

Информация о рассчитанной температуре рабочей поверхности переключающего устройства поступает в блоки 6 и 7 прогнозирования (экстрополяции) возможных температур нагрева контактов при дальнейшей эксплуатации при номинальной и резкопеременной нагрузках. Далее данные поступают в блоки 8 и 9 где производится сопоставительные анализ нагрева рабочих поверхностей контакта относительно нормированного значения и определяется перегрев контактной поверхности.

Далее текущая проводимость $\sigma_{\text{тек}}$ рассчитывается в блоке 10. В блоке 12 сравниваются значения текущей проводимости $\sigma_{\text{тек}}$ и номинальной $\sigma_{\text{ном}}$, заданной блоком 11, и вычисляется значение изменения проводимости от времени (рис. 4) и выводится на экран монитора 13.

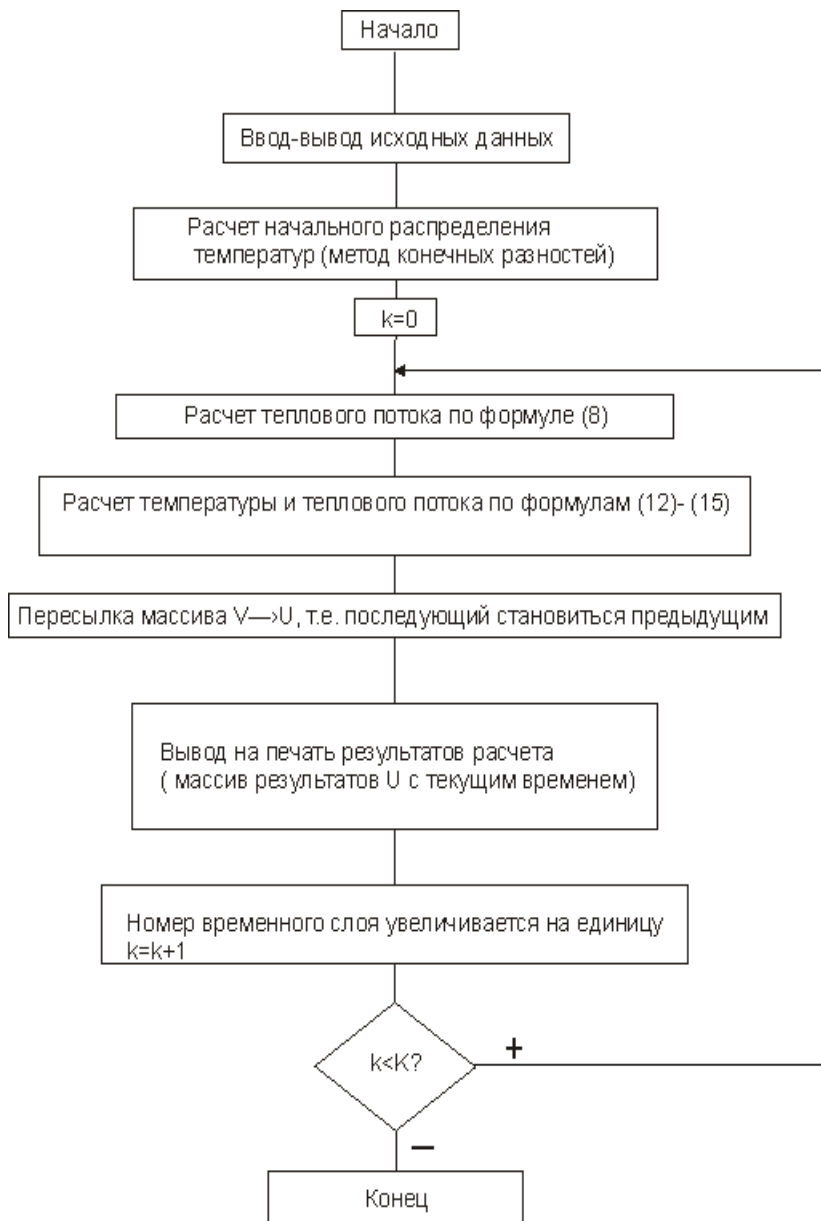


Рис. 3. Блок-схема алгоритма приведения температуры по результатам измерений к температуре в рабочей поверхности контакта переключающего устройства

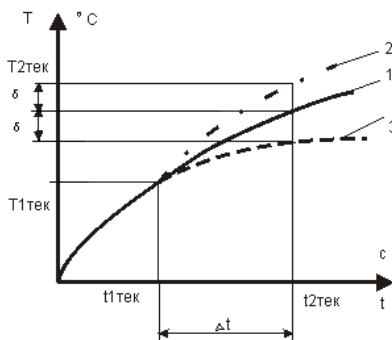


Рис. 4. Прогнозирование изменения температуры: 1 – кривая экстраполяции температуры; 2 – реальное значение температуры (уменьшение проводимости); 3 – реальное значение температуры (увеличение проводимости).

Выводы. Из результатов выполненных исследований следует: 1) применяемые в настоящее время методики не позволяют с достаточной для практики точностью контролировать температуру в области рабочей поверхности контактов переключающих устройств; 2) предложена методика диагностики технического состояния контактов переключающих устройств основанная на определении температуры рабочей поверхности контактов; 3) предложена методика моделирования температурных процессов в недоступных местах прямых измерений контактах переключающих устройств в основу, которой положена обратная задача теплопроводности.

Список литературы: 1. Зиновкин В.В., Волкова О.Г., Карпенко В.В. Исследование электротермических процессов в контактах переключающих устройств при резкочастотной нагрузке // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 52-57. 2. Аракелян В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования // Электротехника. – 2002. – № 5. – С. 23-27. 3. Матецкий Ю.М., Лушпенко С.Ф. Идентификация теплофизических свойств твердых тел. – Киев: Наукова думка, 1990. – 216 с. 4. Махненко В.И., Кравцов Т.Г. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров. – Киев: Наукова думка, 1976. – 156 с. 5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 322 с. 6. Алифанов О.М. Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 288 с. 7. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с. 8. Лавертьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некорректные задачи математической физики и анализа. – М.: Наука, 1980. – 270 с.

Поступила в редколлегию 13.10.08