

*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 граничной 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.

Экспирементальные методики позволяют измерить усредненную температуру на поверхности контактов. По этим результатам определить темпера-

туру 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.

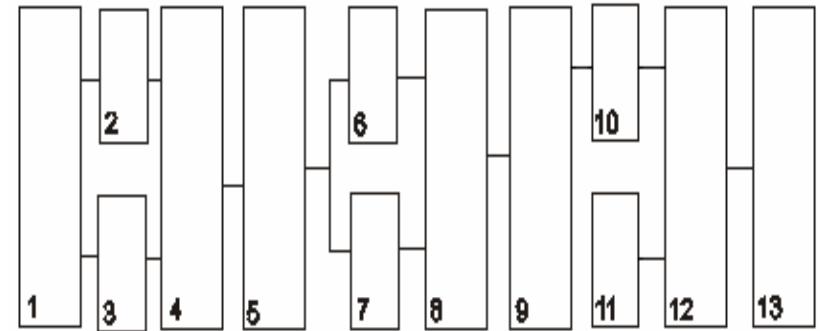


Рис. 1. Структурная схема диагностики технического состояния контактов переключающих устройств.

1 – переключающее устройство; 2 и 3 – система датчиков для измерения температуры в соответствующих местах контакта (согласно рис. 2); 4 – средние результаты 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 перегревов 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 идентификации, 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.

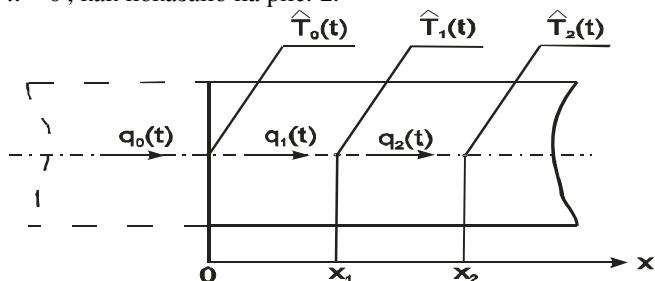


Рис. 2. Схема распространения теплового потока по толщине контакта.

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:

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

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

И граничных условиях:

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

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

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

где  $c_i \gamma_i$  – удельная объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>°C);  $\lambda_i$  – теплопроводность, Вт/(м°С);  $T_i$  – искомое  $x$  – 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;  $i = 1, 2$ .

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.

$$q_1 = -\lambda_2 \frac{\mathcal{I}T_2}{\mathcal{I}x} \quad (8)$$

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:

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

$$\frac{\mathcal{I}T}{\mathcal{I}x} = -q, \quad 0 < x < x_1, \quad 0 < t < t_k. \quad (10)$$

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

где  $T(t, x)$  – искомое температурное поле, °С;  $\hat{T}_1$  и  $q_1(t)$  – заданные функции;  $q(t, x)$  – тепловой поток, °С/с;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/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 рассчитаем значение температуры и теплового потока на поверхности контакта:

$$q_{i+1}^0 = -\frac{l}{a\tau} \mathcal{E}T_i^1 - T_i^0 \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{I}t} - (\alpha l - 1)q_i^0, \quad j = 0; \quad (12)$$

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

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

$$T_{i+1}^j = -\frac{\alpha l}{a^2 \tau^2 \xi} T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1} \frac{\delta}{\theta} + T_i^j - lq_i^j, \quad j = 1, \dots, M - 1; \quad (15)$$

где  $\tau$  – дискретные значения координат времени, с;  $l$  – дискретные значения пространственных координат, м;  $\alpha$  – корректирующий параметр [8].

Блок-схема программы 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 (экстраполяции) 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) проводимости и выводится на экран монитора 13.

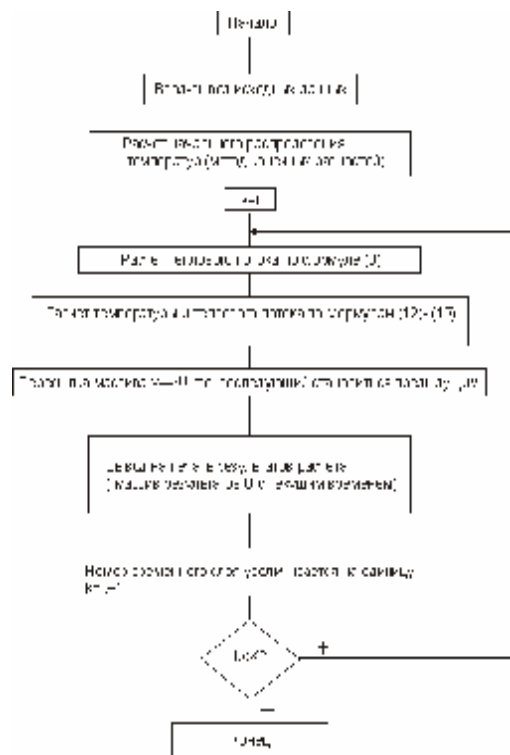


Рис. 3. Блок-схема приведения температуры по результатам измерений к температуре в рабочей поверхности контакта переключающего устройства

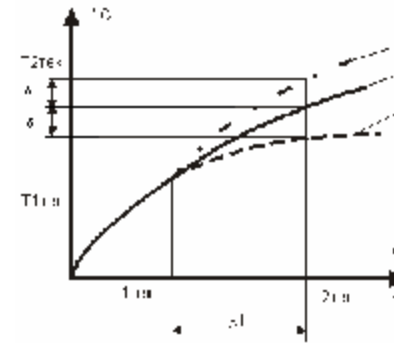


Рис. 4. Прогнозирование изменения температуры. 1 – кривая экстраполяции температуры; 2 – реальное значение температуры (уменьшение проводимости); 3 – реальное значение температуры (увеличение проводимости).

**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 резкопеременной 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. – Машгиз, 1951. – 296 с. 8. *Лаврентьев 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