

## О РАЗОГРЕВЕ ШУНТА ПРИ ДЕЙСТВИИ ТОКОВ ПЕРЕГРУЗКИ

Л. Г. ФУКС

(Представлена кафедрой котлостроения и котельных установок)

В расчетах многих электротехнических приборов необходимо определить максимальные температуры разогрева при действии токов перегрузки. Эти температуры позволяют оценить термическую стойкость аппарата. В некоторых технически важных случаях знание максимальных температур является важным для выяснения стабильности материалов во времени.

Ниже предлагается способ определения максимальной температуры разогрева шунтов постоянного тока.

Как известно, шунты с марганциновыми пластинами или стержнями не допускают высокого разогрева из-за возможного нарушения стабильности сопротивления. Рабочие температуры наиболее нагретых точек шунта ограничивают обычно пределами в 150—185°C. В этих условиях прибор может длительное время находиться в работе без заметного увеличения погрешности измерений, связанной с сохранением постоянства сопротивления.

К наиболее простому определению температуры разогрева относится расчет, основанный на пренебрежении теплоотдачей от пластин во время действия токов перегрузки. Считают, что все подводимое тепло идет на повышение теплосодержания пластин и что во время своего действия ток перегрузки сохраняет постоянное значение. Другими словами, такое упрощение расчета основывается на пренебрежении отводом тепла в наконечники и теплоотдачей в окружающую среду. Этот метод использован, например, в работе [1].

Дадим решение задачи разогрева шунта с учетом теплоотвода от пластин. Для этого рассмотрим упрощенную схему шунта, рис. 1.

Коэффициент теплопроводности марганцина составляет величину порядка  $21-25,5 \frac{вт}{м \cdot ^\circ C}$ . В шунтах обычных конструкций коэффициент

теплоотдачи конвекцией имеет в среднем значение около  $11,6 \frac{вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ .

Ширина пластин колеблется в пределах 16—40 мм. Величина критерия Био, рассчитанного по ширине пластины, будет находиться в пределах

$$Bi = 0,008 - 0,02.$$

При таких малых значениях критерия Био допустимо пренебречь

распространением тепла по ширине пластины, считая, что температура пластин изменяется только по их длине.

Баланс тепла элементарного объема  $fdx$ , выделяющегося на пластине за время  $d\tau$ , после сокращений и преобразований дает дифференциальное уравнение температурного поля пластины

$$\frac{1}{a} \vartheta'_\tau = \vartheta''_{xx} - m^2 \vartheta + \frac{q'_v}{\lambda}. \quad (1)$$

Здесь  $a$  — коэффициент температуропроводности,  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  
 $c$  — теплоемкость,  
 $\gamma$  — удельный вес,  
 $\vartheta$  — превышение температуры пластины над температурой окружающей среды,  
 $\tau$  — время,  
 $q'_v$  — объемное тепловыделение.

В уравнении (1) введено известное обозначение

$$m^2 = \frac{\alpha P}{\lambda f},$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  
 $P$  — периметр,  
 $f$  — площадь поперечного сечения.

Наконечники шунта представляют из себя массивные детали из материала высокой тепло- и электропроводности (обычно медные).

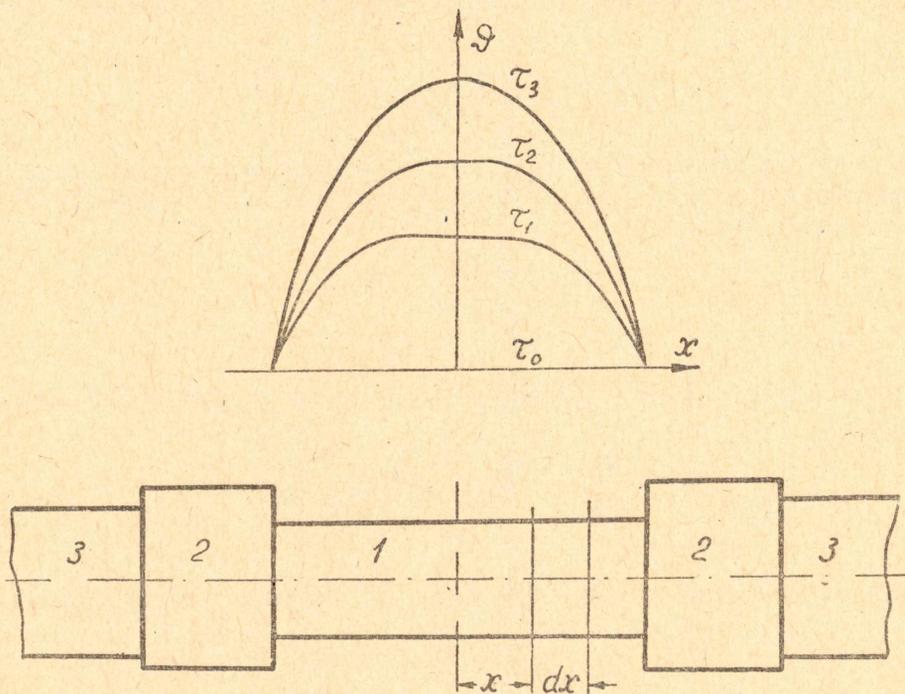


Рис. 1. 1—пластина; 2—наконечник; 3—токоподводящая шина. На рисунке вверху приведены кривые примерного распределения температур по пластине в различные моменты времени при разогреве.

В условиях действия кратковременных токов перегрузки допустимо считать их температуру постоянной.

Тогда граничные условия задачи запишутся как

$$\vartheta\left(\tau, \frac{l}{2}\right) = \vartheta_n, \quad (2)$$

$$\vartheta'_{,x}(\tau, 0) = 0, \quad (3)$$

где  $l$  — длина пластин,

$\vartheta_n$  — превышение температуры наконечника.

Условие (3) является математическим выражением симметрии температурного поля пластины.

Выбор начального условия зависит от вида начального распределения температур по шунту. В общем случае

$$f(x) = \vartheta(0, x). \quad (4)$$

Если разогрев начинается от температуры окружающей среды, то для упрощения решения принимаем

$$f(x) = 0, \quad \vartheta_n = 0.$$

Более сложным случаем будет внезапный разогрев шунта, который до этого длительно нагревался при нормальной нагрузке. Тогда под  $f(x)$  мы будем понимать начальное распределение температур по шунту. Ясно, что  $f(x)$  в наших условиях будет непрерывной, симметричной и четной функцией от  $x$ .

Для решения уравнения (1) полагаем, что температура представляет собой сумму двух пока неизвестных функций вида

$$\vartheta(\tau, x) = Z(\tau, x) + w(x). \quad (5)$$

Так как  $w(x)$  зависит только от координаты, то подстановка в (1) даст

$$\frac{1}{a} Z'_\tau = Z''_{,xx} - m^2 Z + \left\{ w'' - m^2 w + \frac{q'_v}{\lambda} \right\}. \quad (6)$$

Определим функцию  $w$  так, чтобы выражение в фигурных скобках было равно нулю. При этом потребуем для  $w$  соблюдения граничных условий в виде

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \vartheta_n, \quad (7)$$

$$w'(0) = 0. \quad (8)$$

Тогда после решения дифференциального уравнения  $w$  принимает форму

$$w = \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \left( \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \vartheta_n \right) \frac{\operatorname{ch} mx}{\operatorname{ch} \frac{ml}{2}}. \quad (9)$$

Для нахождения второй функции из выражения (6) получаем

$$\frac{1}{a} Z'_\tau = Z''_{,xx} - m^2 Z, \quad (10)$$

при начальном и граничных условиях

$$Z(0, x) = f(x) - w(x) = \varphi(x), \quad (11)$$

$$Z'(\tau, 0) = 0, \quad (12)$$

$$Z\left(\tau, \frac{l}{2}\right) = 0. \quad (13)$$

Применяя обычный метод разделения переменных, имеем

$$Z(\tau, x) = \sum_1^{\infty} C_n \exp[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau] \cos \beta_n x, \quad (14)$$

где собственные числа находятся из

$$\beta_n = (2n - 1) \frac{\pi}{l}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

Постоянные  $C_n$  определяются из начального условия как коэффициенты разложения функции  $\varphi(x)$  в ряд Фурье

$$C_n = \frac{4}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} \varphi(x) \cos \beta_n x dx. \quad (16)$$

Окончательный вид интеграла устанавливается при определенном задании начального распределения температур. В практике может встретиться внезапный разогрев от температуры окружающей среды, когда

$$f(x) = 0, \quad (17)$$

и случай, когда шунт был подогрет до некоторого стационарного состояния при внутреннем тепловыделении  $q_v$ .

Для последнего, как показано в работе [1],

$$f(x) = \frac{q_v}{\lambda m^2} - \left( \frac{q_v}{\lambda m^2} - \vartheta_H \right) \frac{\operatorname{ch} mx}{\operatorname{ch} \frac{ml}{2}}. \quad (18)$$

Заметим, что при  $q_v = 0$  и  $\vartheta_H = 0$  выражение (18) тождественно переходит в равенство (17). Поэтому, приняв за основу распределение температур, описанное выражением (18), получаем после преобразований

$$\vartheta(\tau, x) = \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \left( \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \vartheta_H \right) \frac{\operatorname{ch} mx}{\operatorname{ch} \frac{ml}{2}} - \frac{4(q'_v - q_v)}{\pi l} \sum_1^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \exp[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau] \cos \beta_n x}{(2n - 1)(\beta_n^2 + m^2)}, \quad (19)$$

Наиболее нагретая точка будет в середине длины пластины, при  $x = 0$

$$\vartheta(\tau, 0) = \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \left( \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \vartheta_H \right) \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{ml}{2}} - \frac{4(q'_v - q_v)}{\pi l} \sum_1^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \exp[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau]}{(2n - 1)(\beta_n^2 + m^2)}. \quad (20)$$

В большинстве случаев применения формул (19) и (20) можно ограничиться первым членом бесконечной суммы, так как последующие члены весьма быстро убывают.

Были проведены расчеты максимальной температуры при разогреве. Для одного из вариантов, например, получены следующие дан-

ные. При действии на шунт трехкратного тока перегрузки в течение 5,55 сек расчет, выполненный по методике работы [1], дал величину максимального перегрева  $150^{\circ}\text{C}$ . Применяя формулу (20) и считая разогрев от температуры окружающей среды, получено значение максимальной температуры перегрева  $146,5^{\circ}\text{C}$ . Та же формула (20), использованная для расчета разогрева шунта, предварительно нагретого номинальным током, дает значение температуры перегрева  $255^{\circ}\text{C}$ .

### Выводы

При приближенном определении максимальной температуры перегрева элементов шунта при действии токов перегрузки можно использовать зависимость, опубликованную в работе [1]. При необходимости внести уточнение в расчет следует воспользоваться более точными выражениями (19) и (20) настоящей работы.

В особенности рекомендуется проверка температур по уточненным зависимостям в тех случаях, когда появляется возможность действия токов перегрузки на предварительно нагретый шунт.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Фукс. Тепловой расчет пластинчатых шунтов на большие постоянные токи. Приборостроение, № 3, 1960.
  2. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. ГИТТЛ, Москва, 1952.
  3. В. И. Смирнов. Курс высшей математики. Т. 3, часть 2, издание седьмое, ГИТТЛ, Москва, 1956.
  4. Х. С. Карслоу. Теория теплопроводности. ОГИЗ, Москва, 1947.
-