ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 137 1965

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 манганиновыми 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 манганина составляет величину порядка $21-25{,}5\ \frac{вт}{м.°C}$. В шунтах обычных конструкций коэффициент теплоотдачи конвекцией имеет в среднем значение около $11{,}6\ \frac{вт}{м^2°C}$. Ширина пластин колеблется в пределах 16—40 *мм*. Величина критерия Био, рассчитанного по ширине пластины, будет находиться в пределах

$$\mathrm{Bi} = 0{,}008 - 0{,}02.$$

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

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

Здесь a — коэффициент температуропроводности,

λ — коэффициент теплопроводности,

c — теплоемкость,

γ — удельный вес,

ϑ — превышение температуры пластины над температурой окружающей среды,

τ — время,

q'_v — объемное тепловыделение.

В уравнении (1) введено известное обозначение

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

где α — коэффициент теплоотдачи,

P — периметр,

f — площадь поперечного сечения.

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

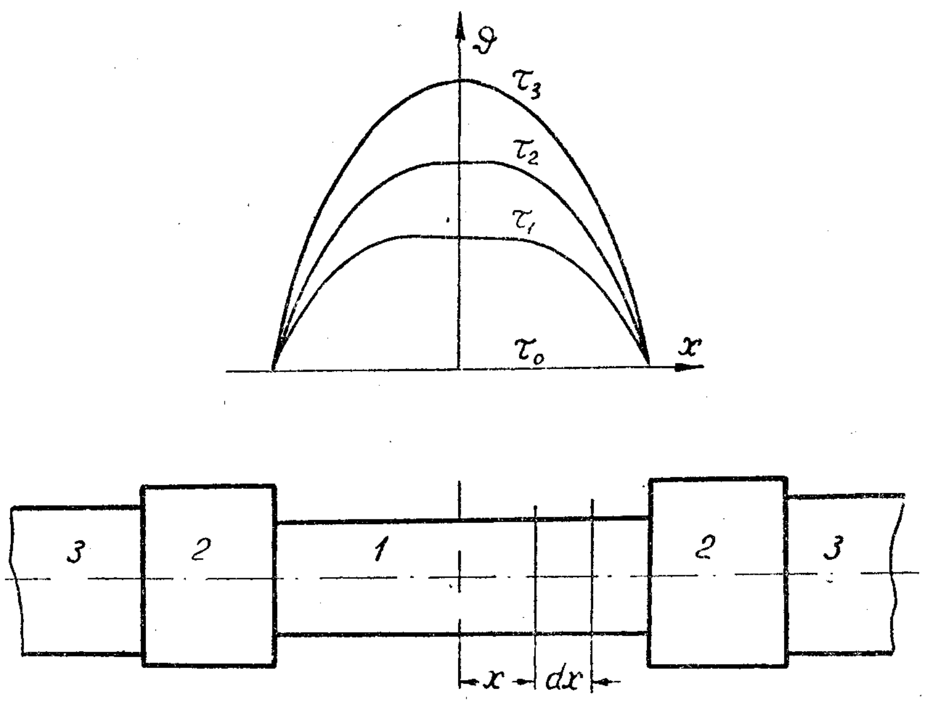

Рис. 1. 1—пластина; 2—наконечник; 3—токоподводящая шина. На рисунке вверху приведены кривые примерного распределения температур по пластине в различные моменты времени при разогреве.

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

Тогда граничные условия задачи запишутся как

$$\vartheta\left(\tau, \frac{l}{2}\right) = \vartheta_{н}, \tag{2}$$

$$\vartheta'_x(\tau, 0) = 0, \tag{3}$$

где l — длина пластин,

$\vartheta_{н}$ — 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

$$f(x) = \vartheta(0, x). \tag{4}$$

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

$$f(x) = 0, \qquad \vartheta_{н} = 0.$$

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

$$\vartheta(\tau, x) = Z(\tau, x) + w(x). \tag{5}$$

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

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

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

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \vartheta_{н}, \tag{7}$$

$$w'(0) = 0. \tag{8}$$

Тогда после решения дифференциального уравнения w принимает форму

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

Для нахождения второй функции из выражения (6) получаем

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

при начальном и граничных условиях

$$Z(0, x) = f(x) - w(x) = \varphi(x), \tag{11}$$

$$Z'(\tau, 0) = 0, \tag{12}$$

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

Применяя обычный метод разделения переменных, имеем

$$Z(\tau, x) = \sum_{1}^{\infty} C_n \exp\left[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau\right] \cos \beta_n x, \tag{14}$$

где собственные числа находятся из

$$\beta_n = (2n - 1)\frac{\pi}{l}; \qquad n = 1,\ 2,\ 3,\ldots \tag{15}$$

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

$$C_n = \frac{4}{l}\int_{0}^{\frac{l}{2}} \varphi(x) \cos \beta_n x\, dx. \tag{16}$$

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

$$f(x) = 0, \tag{17}$$

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

Для последнего, как показано в работе [1],

$$f(x) = \frac{q_v}{\lambda m^2} - \left(\frac{q_v}{\lambda m^2} - \vartheta_{\text{н}}\right)\frac{\operatorname{ch} mx}{\operatorname{ch}\dfrac{ml}{2}}. \tag{18}$$

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

$$\vartheta(\tau, x) = \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \left(\frac{q'_v}{\lambda m^2} - \vartheta_{\text{н}}\right)\frac{\operatorname{ch} mx}{\operatorname{ch}\dfrac{ml}{2}} -$$

$$- \frac{4(q'_v - q_v)}{\pi l}\sum_{1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}\exp\left[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau\right]\cos\beta_n x}{(2n-1)\,(\beta_n^2 + m^2)}, \tag{19}$$

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

$$\vartheta(\tau, 0) = \frac{q'_v}{\lambda m^2} - \left(\frac{q'_v}{\lambda m^2} - \vartheta_{\text{н}}\right)\frac{1}{\operatorname{ch}\dfrac{ml}{2}} -$$

$$- \frac{4(q'_v - q_v)}{\pi l}\sum_{1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}\exp\left[-a(\beta_n^2 + m^2)\tau\right]}{(2n-1)\,(\beta_n^2 + m^2)}. \tag{20}$$

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

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.