

К ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Грищук Ю.С., к.т.н.,
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ"
тел. (0572) 707-69-76.

Кузнецов А.И., к.т.н., Грищук С.Ю.
Харьковская Национальная Академия Городского Хозяйства
Украина, 61001, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ
тел. (0572) 707-31-51.

Ржевский А.Н.
Государственный институт подготовки кадров
Украина, Киев, ул. Металлистов, 17, ГИПК
тел. (044) 457-92-44.

Отримано аналітичну залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі із зовнішньої поверхні плавкого елемента, що дозволяє визначити еквівалентний коефіцієнт тепловіддачі. Побудована емпірична залежність для опору модуля плавкого елемента, яка враховує опір стягування. Запропонована методика теплового розрахунку швидкодіючого запобіжника з комбінованим дугогасним наповнювачем.

Получено аналитическое выражение коэффициента теплоотдачи с наружной поверхности плавкого элемента, позволяющее определить эквивалентный коэффициент теплоотдачи. Построена эмпирическая зависимость для сопротивления модуля плавкого элемента с учетом сопротивления стягивания. Предложена методика теплового расчета быстродействующего предохранителя с комбинированным дугогасительным наполнителем.

ВВЕДЕНИЕ

Рост мощностей электроэнергетических установок промышленности и транспорта требует улучшения технико-экономических характеристик электрических аппаратов защиты, автоматических выключателей, предохранителей, реле защиты и др. Наиболее простыми и широко применяемыми для этих целей электрическими аппаратами, являются быстродействующие предохранители. Это объясняется их относительно низкой стоимостью и особенностями их защитных характеристик. Вместе с тем, анализ литературных и патентных источников и конструкций, отечественных и зарубежных предохранителей [2–5], указывает на необходимость дальнейшего улучшения их защитных, интегральных и технико-экономических характеристик. В работах [3, 4] показана возможность решения этой задачи путем применения более эффективных дугогасительных наполнителей, одним из которых является гетерогенный, комбинированный наполнитель в виде смеси кварцевого наполнителя с четыреххлористым углеродом [3, 4, 5]. Применение комбинированного наполнителя позволяет, при среднем уровне потерь, в 1,5 раза увеличить номинальный ток, существенно снизить интеграл Джоуля и повысить относительное быстродействие [3–5]. Для разработки и проектирования предохранителей повышенного быстродействия с комбинированным быстродействием необходимо создать методику расчета защитных и тепловых характеристик. Для решения этой задачи могут быть использованы общая методика теплового расчета и оптимизации токоведущих систем приведенная в [7] и выражение для определения коэффициента теплоотдачи с внутренней поверхности плавкого элемента предложенное авторами в [8].

Целью данной статьи является определения эквивалентного коэффициента теплоотдачи для предохранителя с комбинированным наполнителем, сопротивления модуля плавкого элемента и построение методики теплового расчета.

Процессы теплообмена и горения дуги в дугогасительном наполнителе, состоящем из кварцевого песка и четыреххлористого углерода, в настоящее время мало изучены. На рис.1 представлена конструкция быстродействующего предохранителя.

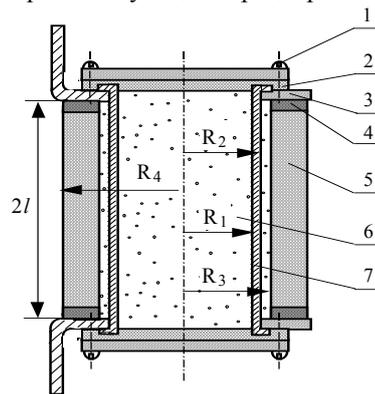


Рис. 1

Для расчета тепловых характеристик рассматриваемых предохранителей необходимо определить коэффициенты теплоотдачи через указанный наполнитель как с внутренней, так и с наружной поверхности плавкого элемента. Коэффициент теплоотдачи с поверхности плавкого элемента в предохранителе с комбинированным наполнителем зависит от большого числа параметров. К ним относятся: температура поверхности плавкого элемента и окружающей среды,

геометрические и теплофизические параметры плавкого элемента 7, наполнителя 6, электрофарфорового корпуса 5, асбестовых прокладок 2, 4, металлической крышки 1, токоподводящих выводов 3 и др.

Известны выражения для определения обобщенного коэффициента теплоотвода электрического аппарата, который может быть представлен в виде следующей суммы [6]:

$$K = K_k + K_{и},$$

где K_k – коэффициент теплоотвода за счет теплопроводности и конвекции; $K_{и}$ – коэффициент теплоотвода излучением.

Так как известные выражения для коэффициентов теплоотдачи получены для других условий, то они не могут использоваться при проведении тепловых расчетов предохранителя с гетерогенным наполнителем. В [6] показано, что в стационарном режиме нагрева плавкого элемента предохранителя теплоотводом путем лучеиспускания можно пренебречь. Из рассматриваемой конструкции предохранителя с гетерогенным наполнителем, представленной на рис. 1, следует, что при нагреве плавкого элемента теплоотдача в окружающую среду происходит как с внутренней, так и с наружной поверхности плавкого элемента. Теплоотдача с внутренней поверхности плавкого элемента происходит через гетерогенный наполнитель 6 и асбестовые прокладки 2 к металлической крышке 1 предохранителя.

Расчет коэффициента теплоотдачи с внутренней поверхности цилиндрического плавкого элемента быстроедействующего предохранителя с комбинированным наполнителем произведен авторами ранее и приведен в [8].

Для определения эквивалентного коэффициента теплоотдачи необходимо еще определить коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности плавкого элемента.

Для расчета коэффициента теплоотдачи с наружной поверхности плавкого элемента обратимся к рис. 2, на котором обозначено: r, z – текущие координаты; l – расстояние от центра до места соединения плавкого элемента с токоподводящим контактом; R_2 – расстояние от центра до наружной поверхности плавкого элемента; R_3 – расстояние от центра до внутренней поверхности и фарфорового корпуса; ϑ_2 – температура корпуса предохранителя; ϑ_0 – температура окружающей среды.

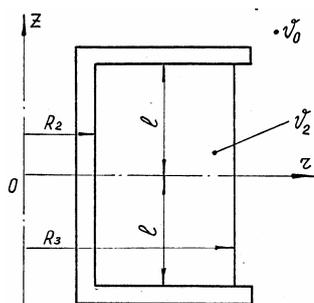


Рис. 2. Расчетная схема определения коэффициента теплоотдачи с внешней поверхности плавкого элемента

Передача тепла с наружной поверхности плавкого элемента в установившемся режиме описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial z^2} = 0 \quad (R_2 < r < R_3; -l < z < l). \quad (1)$$

Приближенное решение задачи ищем в виде:

$$\vartheta_2(r, z) = \vartheta_e + (\vartheta_m - \vartheta_e) \cos \frac{\pi}{2l} z \cdot f(r), \quad (2)$$

$$R_2 < r < R_3$$

Неизвестная функция $f(r)$ определяется из уравнения (10), которое получается после подстановки соотношения (9) в уравнение (8).

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} - \frac{\pi^2}{4l^2} f = 0. \quad (3)$$

Одним из граничных условий для уравнения (10) является соотношение

$$f(R_2) = 1. \quad (4)$$

Граничное условие третьего рода, учитывающее теплоотдачу с наружной поверхности кварцевого наполнителя, представим в интегральной форме:

$$2 \int_0^l -\lambda_n \frac{\partial \vartheta_2(R_3, z)}{\partial r} 2\pi R_3 dz = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l \vartheta_2(R_3, z) dz - \vartheta_0}{R_T}. \quad (5)$$

Тепловое сопротивление R_T складывается из суммы теплового сопротивления фарфорового патрона и сопротивления, обусловленного теплоотдачей с поверхности фарфора в окружающую среду:

$$R_T = R_{ТФ} + R_{ТО}. \quad (6)$$

Значения указанных сопротивлений соответственно равны

$$R_{ТФ} = \frac{1}{4\pi l \lambda_{Ф}} \ln \frac{R_4}{R_3}; \quad (7)$$

$$R_{ТО} = \frac{1}{4\pi l \lambda_{Ф} R_4 K_{ТП}} \quad (R_3 < r < R_4). \quad (8)$$

Таким образом, имеем

$$R_T = \frac{1}{4\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_{Ф}} + \ln \frac{R_3}{R_4} + \frac{1}{R_4 K_{ТП}} \right). \quad (9)$$

Введем новую независимую переменную x согласно соотношению

$$x = \frac{r\pi}{2l}. \quad (10)$$

При этом, приведенное в [8] уравнение (5.19) принимает вид:

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{df}{dx} - f = 0. \quad (11)$$

Решением уравнения (11) является выражение

$$f(r) = B_1 I_0 \left(\frac{\pi r}{2l} \right) + B_2 K_0 \left(\frac{\pi r}{2l} \right), \quad (12)$$

где B_1, B_2 – постоянные, определяемые из граничных условий (4) и (5); $I_0 \left(\frac{\pi r}{2l} \right), K_0 \left(\frac{\pi r}{2l} \right)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка.

Из граничного условия (11) следует

$$B_1 I_0\left(\frac{\pi r}{2l}\right) + B_2 K_0\left(\frac{\pi r}{2l}\right) = 1. \quad (13)$$

Подставляя (2) в (5) и вычислив интеграл, найдем

$$\begin{aligned} a'f'(R_3) + a_2 + a_3 f(R_3) &= 0; \\ a_1 &= 8l\lambda_n R_T R_3 (\vartheta_m - \vartheta_b); \\ a_2 &= \vartheta_b - \vartheta_0; \\ a_3 &= \frac{2}{\Pi} (\vartheta_m - \vartheta_b). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя значение функции $f(r)$ из выражения (12) в (14), после преобразований получим второе уравнение относительно постоянных B_1 и B_2

$$\begin{aligned} a_4 B_1 + a_5 B_2 + a_2 &= 0; \\ a_4 &= \frac{\pi a_1}{2l} I_1\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right) + a_3 I_0\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right); \\ a_5 &= a_3 K_0\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right) - \frac{\pi a_1}{2l} K_1\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right). \end{aligned} \quad (15)$$

$I_1\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right); K_1\left(\frac{\pi R_3}{2l}\right)$ - модифицированные функции

Бесселя первого и второго рода первого порядка.

Система уравнений (13), (15) позволяет определить постоянные B_1 и B_2

$$B_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = -\frac{\left[a_5 + a_2 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) \right]}{a_4 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) - a_5 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right)}; \quad (16)$$

$$B_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{\left[a_4 + a_2 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) \right]}{a_4 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) - a_5 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right)}; \quad (17)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_4 & a_5 \\ I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) & K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) \end{vmatrix} = a_4 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) - a_5 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right);$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -a_2 & a_5 \\ 1 & K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) \end{vmatrix} = -a_5 - a_2 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right);$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_4 & -a_2 \\ K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) & 1 \end{vmatrix} = a_4 + a_2 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right).$$

Удельный тепловой поток с наружной поверхности плавкого элемента равен:

$$q_2 = -\lambda_n \frac{\partial \vartheta_2(R_2, z)}{\partial r} = -\lambda (\vartheta_m - \vartheta_0) \cos \frac{\pi}{2l} z \cdot f'(R_2). \quad (18)$$

Определяем приведенный коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности плавкого элемента:

$$K_{T2} = \frac{q_2}{\vartheta_2(R_2, z) - \vartheta_0} = -\lambda_n \frac{(\vartheta_m - \vartheta_0) f'(R_2) \cos \frac{\pi}{2l} z}{\vartheta_b - \vartheta_0 + (\vartheta_m - \vartheta_0) f(R_2) \cos \frac{\pi}{2l} z}, \quad (19)$$

$$\text{где } f(R_2) = B_1 I_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) + B_2 K_0\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right);$$

$$f'(R_2) = \frac{\pi}{2l} \left[B_1 I_1\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) - B_2 K_1\left(\frac{\pi R_2}{2l}\right) \right].$$

Для выбранного нами модуля плавкого элемента, на основании экспериментальных измерений, проведенных методом вольтметра—амперметра, получена следующая эмпирическая зависимость сопротивления модуля R_m от его параметров

$$R_m = \frac{2.25\rho}{\delta} (0.947 + 0.586l), \quad (20)$$

где δ - толщина фольги, мм; l - длина перешейка, мм; ρ - удельное сопротивление, Ом·мм.

Полученное выражение (20) для сопротивления модуля плавкого элемента позволяет учитывать сопротивление стягивания при проведении тепловых расчетов быстродействующих предохранителей

Для выполнения тепловых расчетов вводятся следующие исходные данные.

1) Теплофизические и геометрические параметры выводов предохранителя:

K_1 - коэффициент теплоотдачи с выводов предохранителя, Вт/мм² град; λ_1 - коэффициент теплопроводности выводов, Вт/мм град; ρ_{01} - удельное сопротивление выводов, Ом мм; α_1 - температурный коэффициент удельного сопротивления выводов; l_1 - длина вывода, мм; P_1 - периметр выводов, мм; S_1 - площадь сечения выводов, мм²

2) Теплофизические и геометрические параметры модуля плавкого элемента:

K_m - эквивалентный коэффициент теплоотдачи с поверхности модуля, Вт/мм² град; λ_m - коэффициент теплопроводности модуля, Вт/мм град; ρ_m - удельное сопротивление модуля, Ом мм; α_m - температурный коэффициент удельного сопротивления модуля; l_m - длина модуля, мм; P_m - периметр модуля, мм; S_m - сечение модуля, мм².

Длина модуля плавкого элемента, l_m определяется следующим выражением

$$l_m = 0.5(l + l_n), \quad (21)$$

где l - длина перешейка, мм; l_n - длина широкой части, мм.

Периметр модуля плавкого элемента P_m определяется из условия эквивалентности охлаждения

$$P_m = \frac{S_0}{l_m}, \quad (22)$$

где S_0 - поверхность охлаждения модуля, мм².

Площадь сечения модуля S_m определяется из условия эквивалентности нагрева

$$S_m = \frac{\rho l_m}{R_m}, \quad (23)$$

где R_m определяется выражением (20).

3) Параметры электрической цепи допустимые значения тепловых и защитных характеристик:

I_n - номинальный ток, А; U - номинальное напряжение, В; T - постоянная времени, мс; I_k - ожидаемый ток короткого замыкания, кА; $\theta_{в1д}$, $\theta_{в2д}$ - допус-

тимое значения температуры на выводах, °C; $\theta_{\text{мд}}$ - допустимое значение максимальной температуры плавкого элемента, °C; $y_{\text{ед}}$ - допустимое значение i -тых защитных характеристик: полного интеграла отключения $y_{1\text{д}}$, A²C; перенапряжения $y_{2\text{д}}$, В; тока ограничения $y_{3\text{д}}$, А.

Расчет температуры выводов $\theta_{\text{в1}}, \theta_{\text{в2}}$ и максимальной температуры плавкого элемента проводится на основе методики, изложенной в [7]. С этой целью токоведущую систему предохранителя (плавкий элемент и выводы) разбиваем на ряд участков, каждый из которых представляет собой модуль плавкого элемента, причем в пределах каждого участка сечение и периметр постоянны и равны эквивалентным значениям сечения и периметра модуля плавкого элемента.

В этом случае составленное дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности для i -го участка, будет иметь вид:

$$\frac{d^2\theta_i}{dx_i^2} - \frac{k_i P_i}{\lambda_i S_i} \theta_i + \frac{I^2 \rho_i (1 + \alpha_i \theta_i)}{\lambda_i S_i^2} = 0, \quad (24)$$

где l_i - длина i -того участка; X_i - переменная координата вдоль i -го участка; Q_i - сосредоточенный источник тепла на стыке двух соседних участков; θ_i - превышение температуры над нормированной температурой окружающей среды; K_b, P_b, λ_b, S_b - соответственно коэффициент теплоотдачи, периметр, коэффициент теплопроводности и сечение i -го участка токоведущей системы; ρ_{0i} и α_i - удельное электрическое сопротивление и его температурный коэффициент;

Вид решения этого уравнения определяется величиной произведения $K_i P_i$ рассмотрим два возможных случая когда выполняются неравенства (25):

$$K_i P_i > \frac{I^2 \rho_{0i} \alpha_i}{S_i} \quad \text{или} \quad K_i P_i < \frac{I^2 \rho_{0i} \alpha_i}{S_i} \quad (25)$$

При определении температуры выводов и плавкого элемента постоянные интегрирования A_i и B_i выражаются на основе закона Фурье через тепловые потоки Φ_i, Φ_{i+1} , входящие соответственно в i -тый и $i+1$ -ый участок. Полученная система алгебраических уравнений относительно неизвестных тепловых потоков $\Phi_i (i=1, 2, \dots, N-1)$ решается методом прогонки [7].

ВЫВОДЫ

1. Полученные выражения коэффициентов теплоотдачи с внутренней и наружной поверхностей плавкого элемента позволяют определить эквивалентный коэффициент теплоотдачи с учетом распределения температуры по длине плавкого элемента.

2. Построенная эмпирическая зависимость для сопротивления модуля плавкого элемента позволяет учитывать сопротивление стягивания.

3. Полученные результаты позволяют с достаточной точностью находить оптимальное значение геометрических и конструктивных параметров плавкого элемента и предохранителя при заданных значениях защитных и тепловых характеристик на основе методики теплового расчета и оптимизации токоведущих систем, изложенной в [7].

4. Результаты рекомендуются к использованию при проведении тепловых расчетов быстродействующих предохранителей с комбинированным наполнителем в процессе разработки и проектирования предохранителей повышенного быстродействия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глух Е.М., Зеленов В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
- [2] Намитоков К.К., Хмельницкий Р.С., Аникеева К.Н. Плавкие предохранители. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
- [3] Гришук Ю.С., Гришук С.Ю. Расчет предохранителей повышенного быстродействия с алюминиевыми плавкими элементами // Вестник Харьк. госуд. политехн. ун-та. Сб. науч. трудов. – Харьков: ХГПУ, 2000. – №84 – С. 62-64.
- [4] Гришук Ю.С., Ржевский А.Н., Гришук С.Ю. Многофакторные исследования предохранителей с плавкими алюминиевыми элементами повышенного быстродействия // Вісник національного техн. ун-ту "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №16 – С. 62-64.
- [5] Пастор Ю.А. Теплообмен и гашение электрической дуги в плавких предохранителях с дисперсным и жидкостным наполнителем // Дисс...канд. техн. наук. – Рига: Физико-энергетический ин-т АН Латв. ССР. – 1978. – 221с.
- [6] Баранов М.И., Гришук Ю.С и др. Температурное поле быстродействующего предохранителя с комбинированным наполнителем // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – №1. – С. 8-11.
- [7] Гришук Ю.С., Долинский Ю.М. Тепловые расчеты быстродействующих плавких предохранителей // Труды 2-й Всес. Школы-семинара по тепло- и массообмену в электр. контактах. – Алма-Ата, 1979. – С. 83-86.
- [8] Гришук Ю.С., Кузнецов А.И., Гришук С.Ю., Ржевский А.Н. Определение коэффициента теплоотдачи в быстродействующих предохранителях с комбинированным наполнителем // Вісник національного техн. ун-ту "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 35 – С. 41-46.

Поступила 12.04.2007