

УДК 621.316.84.

*В.И. ФОМИН*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАВКОГО ЭЛЕМЕНТА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

У статті представлені результати розрахунку опору плавкого елемента швидкодіючого запобіжника з урахуванням нерівномірного розподілу струму по його перерізу.

В статье представлены результаты расчета сопротивления плавкого элемента быстродействующего предохранителя с учетом неравномерного распределения тока по его сечению.

**Введение.** Появление полупроводниковых приборов большой мощности предъявило новые, более жесткие требования к аппаратуре их защиты, в том числе плавким быстродействующим предохранителям. Это касается уменьшения габаритов предохранителей, понижения величин интервалов Джоуля, максимального пропускаемого тока и ряда других характеристик. Для выполнения таких требований применяются различные пути, что нашло выражение, как в появлении новых технических решений, так и в развитии и совершенствовании традиционных.

Можно указать несколько основных путей создания плавких быстродействующих предохранителей с улучшенными характеристиками. Одним из наиболее перспективным является усовершенствование классического предохранителя с кварцевым наполнителем на основе разработки плавких элементов различной конфигурации с оптимальными соотношениями сопротивления плавкой вставки и выделяемой при отключении тока короткого замыкания энергии. Геометрия плавкого перешейка, в частности, форма вырезов металла в плавком элементе является важнейшим фактором, определяющим все основные характеристики предохранителя [1]. С помощью изменения формы плавкого элемента можно управлять теплоотдачей и гашением дуги в различных режимах.

В общем случае, изменение конфигурации плавкого элемента приводит к изменению его электрического и теплового сопротивлений. От их величины зависит тепловой режим предохранителя, причем, не только при протекании номинального тока и токов перегрузки, но и при отключении токов короткого замыкания. Последнее определяется ролью объемного источника тепла в процессе выгорания материала плавкого элемента, так как плотность тока при выгорании широкой части достигает  $10^5$  А/см<sup>2</sup> и более. Как результат влияния тепла является тот факт, что в процессе выгорания плавкого элемента количество электричества, приходящегося на единицу объема выгоревшего металла, уменьшается во времени.

Определение сопротивления плоского проводника переменного

сечения необходимо при расчете плавких вставок предохранителя и анализе комплекса электрических и тепловых явлений у этого аппарата. Как показывает опытные данные, определение сопротивления тока по сечению для быстродействующих предохранителей в большинстве случаев бывает неточным.

В работе [2] дается приближенная методика определения сопротивления плавкого ленточного элемента произвольной формы с помощью так называемых критериев сопротивления отдельных участков постоянного сечения и части кольца. Этот расчет справедлив, когда ширина перешейка не менее 0,2 ширины элемента и неприемлем для расчета современных быстродействующих предохранителей.

**Цель работы** – разработка уточненной методики расчета сопротивления плавкого элемента быстродействующего предохранителя.

**Геометрия профилей плавких вставок.** Для более точного определения сопротивления проводника переменного сечения с учетом неравномерности распределения тока по сечению проводника, необходимо иметь представление о линиях тока и эквипотенциальных поверхностях в данном проводнике [3]. Так как электрическое поле и поле вектора плотности постоянного в проводящей среде вне источника ЭДС является потенциальным и удовлетворяет уравнению Лапласа, то данная задача может быть решена методом конформных отображений.

Для исследования вопроса влияния отдельных элементов геометрии профиля на картину распределения тока по сечению проводника рассмотрены профили, изображенные на рис. 1.

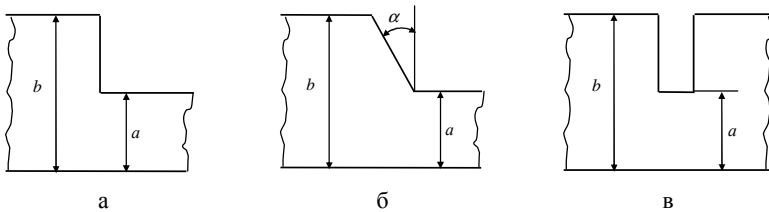


Рис. 1. Геометрия профилей плавких вставок

Суть этого метода заключается в том, что с помощью специальной функции конформного отображения  $w = f(z)$  плоскость плавкого элемента переменного сечения переводится в плоскость плавкого элемента постоянного сечения. Каждая точка плоскости  $z = x + jy$  переходит в соответствующую точку плоскости  $w = u + jv$ .

На основании расчетов по данной методике получено следующее приближенное выражение для сопротивления, рассматриваемого плавкого элемента (а):

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{\rho_0}{\Delta} \left[ \frac{l}{b} + \frac{2}{\pi} \ln \left( \operatorname{cosec} \left( \frac{a}{b} \frac{\pi}{2} \right) \right) + l_1 \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \right], \quad (1)$$

где  $R_1$  – сопротивление плавкого элемента без выреза;  $R_2$  – сопротивление стягивания;  $R_3$  – сопротивление узкого перешейка за вычетом сопротивления отрезка плавкого элемента, соответствующего длине узкого перешейка;  $b$  и  $l$  – ширина и длина плавкого элемента;  $a$  и  $l_1$  – ширина и длина узкого перешейка;  $\Delta$  – толщина;  $\rho_0$  – удельное сопротивление.

Увеличение отношения поперечного сечения широкой части плавкого элемента к поперечному сечению его узкого перешейка приводит к быстрому росту сопротивления стягивания.

В тех случаях, когда плавкий элемент содержит несколько последовательно соединенных узких перешейков, плавкий элемент следует разбить на несколько участков, в каждом из которых число перешейков не должно превышать одного. При этом необходимо, чтобы длина широкой части плавкого элемента на каждом участке была, во-первых, одинаковой с обеих сторон узкого перешейка, а, во-вторых, достаточно большой, чтобы неравномерность распределения линий тока на концах участка уже исчезла. Как отмечалось выше, можно считать, что на расстоянии ширины плавкого элемента от узкого перешейка эквипотенциальные линии становятся прямыми и неравномерность распределения тока исчезает. Расчет электрического сопротивления таких участков может производиться по выше приведенной формуле. При таком разбиении плавкого элемента могут оставаться участки без узких перешейков. Их сопротивление определяется по обычной формуле для сопротивления проводника постоянного сечения.

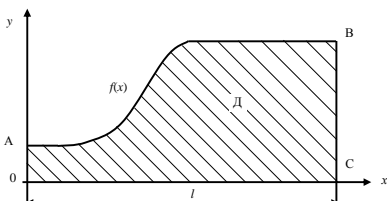


Рис. 2. Конфигурация модуля плавкого элемента с произвольной формой выреза

В работе [3] приводятся такие функции отображения для плавких элементов с формами вырезов (рис. 1, б и в). В работе [4] разработана методика расчета сопротивления плавкого элемента (модуля) с учетом неравномерного распределения тока по сечению плавкого элемента, имеющего произвольную форму перехода от узкой его части к широкой (рис. 2).

Воспользуемся результатами, представленными в [4]

$$R = \frac{\rho}{2\Delta} \sum_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} \int \Psi_2(x) dx; \quad (2)$$

$$i = 2, 4, 6, \dots, N.$$

Для вычисления интегралов, входящих в формулу, воспользуемся формулой прямоугольников с использованием средних ординат.

$$R = \frac{h\rho}{\Delta} \sum \Psi_{2i}; \quad (i = 2, 4, 6, \dots, N), \quad (3)$$

где  $\Psi_{2i} = \Psi_2(xi) = \frac{1}{\varphi_i} + \frac{1}{3} \varphi_i^3 (f_i^2 + \Psi_{1i}^2) - 0,5 \varphi_i^4 f_i' \Psi_{1i} + 0,2 \varphi_i^5 f_i'^2$ ;

$$\Psi_{1i} = \left( f_i - \frac{1}{\varphi_i^2} \right) \varphi_i' + \varphi_i f_i'; \quad f_i' = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h}.$$

Функция  $\varphi(x)$ , определяющая форму перехода от узкого перешейка к широкой части плавкого элемента, должна быть, как следует из предыдущего, достаточно гладкой, дважды дифференцируемой. Возьмем в качестве указанной функцию

$$\varphi(x) = A - B \cdot \exp(-\alpha x^\beta); \quad (4)$$

$$\varphi'(x) = B\alpha\beta x^{\beta-1} \exp(-\alpha x^\beta); \quad \varphi'(0) = 0;$$

$$\varphi''(x) = B\alpha\beta[(\beta-1)x^{\beta-2} \exp(-\alpha x^\beta) + x^{\beta-1}(-\alpha\beta x^{\beta-1})\exp(-\alpha x^\beta)].$$

Для ограничения второй производной в области  $(0 \leq x \leq l)$  следует принять  $\beta \geq 2$ . В частности, при  $\beta = 2$   $\varphi''(0) = B\alpha\beta$ . Если  $\beta > 2$ , например,  $\beta = 3$ , то  $\varphi''(0) = 2B\alpha\beta$ .

Из геометрических соотношений (рис. 2)  $\varphi(0) = a$ ,  $\varphi(l) = b$ , можно определить значения параметров  $A$  и  $B$ , входящих в выше приведенную формулу. Учитывая, что  $l$  существенно превосходит длину переходной области, полагаем  $\varphi(\infty) = b$ , найдем

$$a = A - B; \quad A = b; \quad B = b - a.$$

При этом будем иметь:

$$\varphi(x) = b - (b - a) \exp(-\alpha x^\beta). \quad (5)$$

Порядок расчета сопротивления  $R$  модуля плавкого элемента предохранителя следующий. Вначале определяется  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N+1$ ) с учетом соотношения (5). В дальнейшем вычисляется сопротивление модуля по формуле (3) с учетом приведенных выше соотношений.

**Вывод.** Предложена уточненная методика расчета плавкого элемента быстродействующего предохранителя.

**Список литературы:** 1. *Намитокоев К.К., Шкловский И.Г.* Электрическая дуга в плавких предохранителях. – М.: 1981. – 82 с. 2. *Кузнецов Р.С.* Аппараты распределительных устройств низкого напряжения. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 448 с. 3. *Сабанеева Г.И.* Расчет сопротивления плоского проводника переменного сечения. – Электротехника, 1966. – С. 56-58. 4. *Фомин В.И.* Определение тепловых и коммутационных характеристик быстродействующих предохранителей на стадии проектирования. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1983. – 204 с.

Поступила в редколлегию 24.02.2009