

РАСЧЕТ ТЕРМОБИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ТИПА АЕ-2056ММ И АЕ-2046М

Терешин В.Н., Богданова Л.Е.

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

Введение.

Наибольшее нареkanie у потребителей электроэнергии вызывает работа автоматических выключателей (в дальнейшем тексте АВ) в зоне токов перегрузки в отношении стабильности срабатывания при одинаковых аварийных ситуациях. Стабильность работы АВ, в основном, определяется работой термобиметаллического расцепителя. С учетом материалоемкости и трудоемкости себестоимость термобиметаллического расцепителя составляет 50% от себестоимости всего АВ. Для обеспечения всего ряда номинальных токов АВ, даже одного типа, конструкции термобиметаллических расцепителей весьма разнообразны. Однако разнообразие конструкций термобиметаллических расцепителей достигается, в основном, материалом, расположением, геометрическими параметрами нагревателя или шунта при неизменных параметрах термоэлемента. Так для АВ типа АЕ-2056ММ и АЕ-2046М с номинальными токами 31,5; 40; 50; 63; 80 и 100 А разработана конструкция теплового расцепителя схематически представленная на рис. 1 [1]. Он содержит стальную пластину 1, к которой приварен термобиметаллический элемент 2 одним из своих концов в точке 3, а к свободному концу элемента 2 в точке 5 приварена часть 4 гибкого токопровода, которая имеет длину не менее допустимых тепловых деформаций свободного конца термобиметаллического элемента 2. Таким образом, токопровод 6 теплового расцепителя разделен на две электрически параллельные части 1 и 2. Часть гибкого токопровода 4, обеспечивающая прямой нагрев током термобиметаллического элемента 2, включена с ним последовательно. Оставшаяся часть токопровода 6 приварена в точке 7 к свободному концу стальной пластины 1. С одной стороны противоположного конца стальной пластины 1 в точке 8 крепится гибкий токопровод 6, который соединяет тепловой и электромагнитный расцепители АВ. С другой стороны противоположного конца стальной пластины 1 приварен узел регулировки 9 положением свободного конца термобиметаллического элемента 2. Узел регулировки 9 жестко крепится к корпусу АВ. Размещение термобиметаллического

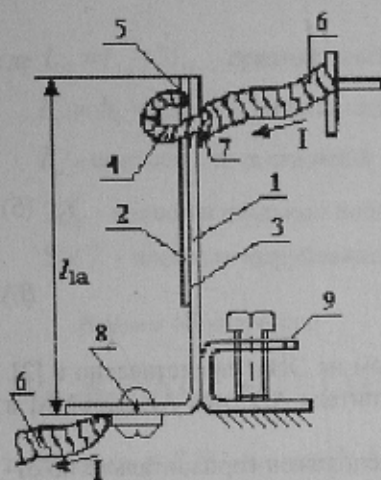


Рисунок 1 Конструкция теплового расцепителя

элемента 2 активным слоем к стальной пластине 1 исключает возможность возникновения механических помех при его деформации. Выполнение гибкого токопровода из шеточного материала типа ПЩ дает возможность легкого изменения сечения его части 4.

Постановка задачи.

Расчетная модель и уравнение энергетического баланса для расцепителя по рис. 1 имеет вид [2]:

$$c_1 m_1 dt_1 = Q_1 d\tau - \bar{\alpha} b_1 l_{10} (t_1 - t_0) d\tau - \bar{\alpha}_3 b_1 l_2 (t_1 - t_2) d\tau \quad (1)$$

$$c_2 m_2 dt_2 = Q_2 d\tau - \bar{\alpha} b_2 l_2 (t_2 - t_0) d\tau + \bar{\alpha}_3 b_2 l_2 (t_1 - t_2) d\tau \quad (2)$$

(индекс "1" относится к параметрам стальной пластины 1, а индекс "2" - к параметрам термобиметаллического элемента 2).

Здесь: m_1 и m_2 - масса соответственно стальной и термобиметаллической пластин;

c_1 и c_2 - удельная теплоемкость соответственно элементов 1 и 2;

l_1, l_2 - длина элементов 1 и 2 ($l_1 = l_2$);

b_1, b_2 - ширина элементов 1 и 2;

Q_1 и Q_2 - мощности нагрева элементов 1 и 2 соответственно;

$\bar{\alpha}$ - средний коэффициент теплоотдачи от элементов 1 и 2 в окружающую среду;

$\bar{\alpha}_3$ - средний коэффициент теплоотдачи за счет теплопроводности воздуха в зазоре между элементами 1 и 2 [1];

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{2\bar{\lambda}}{S_2(\tau)} \quad (3)$$

$\bar{\lambda}$ - средняя теплопроводность воздуха в зазоре между элементами 1 и 2 (в интервале температур $30 \div 160$ °C $\bar{\lambda} = 0,03$ Вт/м·К);

$S_2(\tau)$ - отклонение свободного конца термозлемента 2

$$S_2(\tau) = \frac{Al_2^2 \vartheta_2}{\delta_2}; \quad (4)$$

A - удельный изгиб термобиметалла элемента 2;

δ_2 - толщина элемента 2;

$\vartheta_2 = t_2 - t_0$ - температура перегрева термозлемента 2.

t_1 и t_2 - температуры нагрева элементов 1 и 2 соответственно;

t_0 - температура окружающей среды;

l_{10} - длина стальной пластины 1 вместе с токопроводом (длина всей стальной пластины 1 к которой приварен термозлемент 2);

τ - время нагрева.

Вводятся обозначение:

$\vartheta_1 = t_1 - t_0$ - температура перегрева стальной пластины 1;

После этого уравнения (1) и (2) приводятся к виду

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} = \frac{Q_1}{c_1 m_1} - \frac{\bar{\alpha} b_1 l_{10}}{c_1 m_1} \vartheta_1 - \frac{\bar{\alpha}_3 b_1 l_2}{c_1 m_1} (\vartheta_1 - \vartheta_2); \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta_2}{d\tau} = \frac{Q_2}{c_2 m_2} - \frac{\bar{\alpha} b_2 l_2}{c_2 m_2} \vartheta_2 + \frac{\bar{\alpha}_3 b_2 l_2}{c_2 m_2} (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (6)$$

Решение системы уравнения (5), (6) численным и аналитическим методом на ЭВМ представлено в [2]. Оно не учитывает ряд конструктивных и функциональных особенностей расцепителя АВ типа АЕ-2056ММ и АЕ-2046М.

1. Рабочее положение АВ вертикальное и потому расцепитель по рис. 1 расположен горизонтально по отношению к поверхности земли, пластина 2 находится над пластиной 1. В соответствии с этим коэффициенты теплоотдачи с их поверхностей в окружающую среду разные $\bar{\alpha}_1 < \bar{\alpha}_2$. Кроме того, АВ такого типа это закрытый объем и потому значения α_1 и α_2 будут меньше, чем по расчетной формуле [2].

2. С точки зрения оптимальности функционирования термобиметаллической пластины 2 распределение температуры по ее длине должно быть равномерным [3]. Для приближения к этому сечение пластины 1 делается неодинаковым за счет изменения ее ширины b_1 .

3. Часть стальной пластины 1, между точками 8 и 3 (рис. 1), является токопроводом по которому протекает полностью весь ток I и который является дополнительным источником нагрева пластины 1.

4. Теплоотдача за счет теплопроводности воздуха в зазоре между пластинами 1 и 2 определяется шириной пластины 2 (b_2), так как всегда $b_2 \leq b_1$.

Математическая модель расцепителя.

Для учета вышеперечисленных особенностей, рассмотрим конструктивное исполнение стальной пластины 1 (рис. 2) и электрическую схему замещения теплового расцепителя (рис. 3).

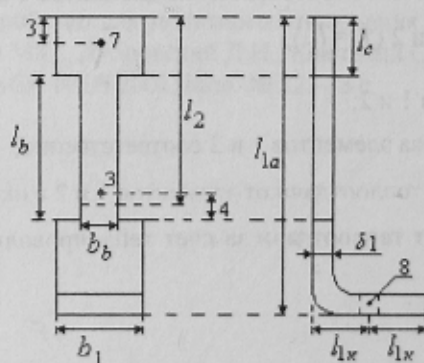


Рисунок 2 – Конструкция стальной пластины теплового расцепителя

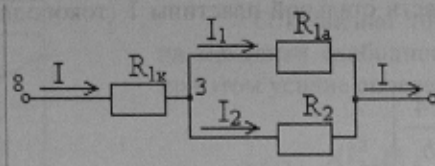


Рисунок 3 – Схема замещения теплового расцепителя

Так как для обеспечения всего ряда номинальных токов в конструкции термобиметаллического расцепителя по рис. 1 всегда $b_2 \leq b_1$, а третье слагаемое в уравнении (5) обуславливает теплоотдачу со стороны пластины 1 в термозлемент 2 за счет теплопроводности воздуха в зазоре между ними, то третье слагаемое уравнения (5) должно содержать b_2 вместо b_1 .

В соответствии с конструктивными особенностями пластины 1 определим величины, входящие в систему уравнений (5), (6):

$$m_1 = \gamma_1 2\delta_1 (b_1 l_p - 5 \times 7) + \gamma_1 \delta_1 [b_1 l_{10} - l_b (b_1 - b_b)] = \gamma_1 \delta_1 [b_1 (2l_p + l_{10} - l_b) + l_b b_1 - 70],$$

где $l_{10} = l_{1a} + 2l_{1к}$ - средняя длина всей пластины 1 (радиусы сгибов 2 мм максимум);

l_b и b_b - длина и ширина оставшейся после выреза части пластины 1;

l_p - средняя длина стальной полосы, из которой выполнен узел регулировки 9;

$2\delta_1$ - толщина стальной полосы узла регулировки 9;

5×7 - площадь вырубленного окна в узле регулировки на сгибе в месте его жесткого крепления к корпусу АВ.

Введем обозначение

$$B_1 = [b_1 (2l_p + l_{10} - l_b) + l_b b_b - 70],$$

тогда $m_1 = \gamma_1 \delta_1 B_1$, $m_2 = \gamma_2 b_2 \delta_2 l_2$.

Теплоотдающая поверхность всей пластины 1 с токопроводом и узлом регулировки 9 в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}_1$, исходя из геометрии и конструктивной особенности пункта 1 расцепителя по рис. 1, будет определяться

$$B_2 = [b_1 (l_{10} + l_p - l_b) + b_b l_b - 35].$$

Теплоотдающая поверхность всей пластины 1 с токопроводом в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$, будет определяться

$$B_3 = [(b_1 - b_2)l_c + (b_b - b_2)(l_2 - l_c) + b_b(l_c + l_b - l_2) + (l_{10} - l_c - l_b)b_1] = b_1(l_{10} - l_b) + b_b l_b - b_2 l_2.$$

В [2] обеспечение всего ряда номинальных токов АВ данного типа одной конструкцией теплового расцепителя при одинаковых параметрах термобиметаллического элемента 2 достигалось изменением длины токоведущей части, ширины и толщины стальной пластины 1. В представленной работе эта цель достигается изменением длины токоведущей части, ширины стальной пластины и, в основном, изменением длины l_b и ширины b_b оставшейся после выреза части стальной пластины 1.

В соответствии с рис. 2 и рис. 3 часть стальной пластины 1 между точками 3 и 7, по которой протекает ток I_1 , имеет сопротивление

$$R_{1a} = \frac{\rho_1}{\delta_1} \left(\frac{l_c - 3}{b_1} + \frac{l_b - 4}{b_b} \right).$$

Сопротивление термобиметаллического элемента 2 между точками 3 и 5, по которому протекает ток I_2 ,

$$R_2 = \frac{\rho_2 l_{2н}}{\delta_2 b_2}.$$

Сопrotивление оставшейся части стальной пластины 1 (токоподвод) между точками 3 и 8, по которой протекает общий ток $I = I_1 + I_2$,

$$R_{1к} = \frac{\rho_1}{\delta_1} \left[\frac{l_{1к} + l_{1а} - l_c - l_b}{b_1} + \frac{4}{b_b} \right].$$

В выражениях для сопротивлений $R_{1а}$, $R_{1к}$, R_2 , а также в выражениях для m_1 , m_2 , B_1 , B_2 и B_3 значения геометрических параметров взяты в миллиметрах.

Составляющие полного тока равны

$$I_1 = \frac{IR_2}{g}; \quad I_2 = \frac{IR_{1а}}{g},$$

где $g = R_{1а} + R_2$.

Мощность, выделяемая в пластинах 1 и 2, согласно рис. 3 будет определяться соответственно

$$Q_1 = I^2 R_{1к} + I_1^2 R_{1а} = I^2 \left[R_{1к} + \left(\frac{R_2}{g} \right)^2 R_{1а} \right], \quad Q_2 = I_2^2 R_2 = I^2 \left(\frac{R_{1а}}{g} \right)^2 R_2.$$

Средний коэффициент теплоотдачи с поверхности всей пластины 1 с узлом регулировки 9 в окружающую среду вдвое меньше среднего коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины 2: $\bar{\alpha}_1 = \frac{\bar{\alpha}_2}{2}$.

Подставляя (4) в (3), получим:
$$\bar{\alpha}_1 = \frac{2\bar{\lambda}\delta}{Al_2^2\vartheta_2}.$$

После соответствующих подстановок и с учетом выражения $m_2 = \gamma_2 b_2 \delta_2 l_2$ уравнения (5) и (6) запишутся следующим образом:

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} = \frac{Q_1}{c_1 m_1} - \frac{(\bar{\alpha}_1 B_2 + \bar{\alpha}_2 B_3)}{c_1 m_1} \vartheta_1 - \frac{2\bar{\lambda}\delta_2 b_2}{Al_2 c_1 m_1} \left(\frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_2} \right), \quad (7)$$

$$\frac{d\vartheta_2}{d\tau} = \frac{Q_2}{c_2 m_2} - \frac{\bar{\alpha}_2}{c_2 \delta_2 \gamma_2} \vartheta_2 + \frac{2\bar{\lambda}}{Al_2^2 c_2 \gamma_2} \left(\frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_2} \right). \quad (8)$$

Введем обозначения

$$M_1 = \frac{Q_1}{c_1 m_1}, \quad M_2 = \frac{Q_2}{c_2 m_2}, \quad N_1 = \frac{(\bar{\alpha}_1 B_2 + \bar{\alpha}_2 B_3)}{c_1 m_1}, \quad N_2 = \frac{\bar{\alpha}_2}{c_2 \delta_2 \gamma_2}, \quad P_1 = \frac{2\bar{\lambda}\delta_2 b_2}{Al_2 c_1 m_1}, \quad P_2 = \frac{2\bar{\lambda}}{Al_2^2 c_2 m_2}.$$

Тогда уравнения (7) и (8) примут вид

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} = M_1 - N_1 \vartheta_1 - P_1 \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_2}, \quad (9)$$

$$\frac{d\vartheta_2}{d\tau} = M_2 - N_2 \vartheta_2 + P_2 \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_2}. \quad (10)$$

Результаты решения уравнений (9) и (10) на ЭВМ по разработанной в [2] программе для $I_H = 31.5$ А (уставка тока срабатывания $I = 1.35I_H \approx 42.5$ А) представлены на рис. 4 и рис. 5 с указанием конкретных значений параметров теплового распеителя по рис.1 и рис. 2.

Расчеты представленных кривых проведены по следующим исходным данным:

$$\begin{aligned} I &= 42.5 \text{ А}; \quad \rho_1 = 1.3 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{ м}; \quad \rho_2 = 9.2 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{ м}; \quad \lambda = 0.03 \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{С}^{-1}; \quad A = 1.56 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}; \\ E_2 &= 1.7 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{ мм}^{-2}; \quad \gamma_1 = 7.8 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}; \quad \gamma_2 = 8.1 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}; \quad c_1 = 450 \text{ Дж} \cdot \text{ кг}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{С}^{-1}; \\ c_2 &= 460 \text{ Дж} \cdot \text{ кг}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{С}^{-1}; \quad \delta_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ м}; \quad \delta_2 = 9 \times 10^{-4} \text{ м}; \quad \alpha_2 = 6.0 \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ град}^{-1}; \quad b_1 = 0.012 \text{ м}; \\ b_2 &= 8 \times 10^{-3} \text{ м}; \quad b_b = 8 \times 10^{-3} \text{ м}; \quad l_b = 0.042 \text{ м}; \quad l_{10} = 0.075 \text{ м}; \quad l_{2а} = 0.046 \text{ м}; \quad l_{2н} = 0.043 \text{ м}; \\ l_2 &= 0.051 \text{ м}; \quad l_p = 0.045 \text{ м}; \quad l_c = 0.01 \text{ м}; \quad l_{1а} = 0.065 \text{ м}; \quad l_{1к} = 5 \times 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

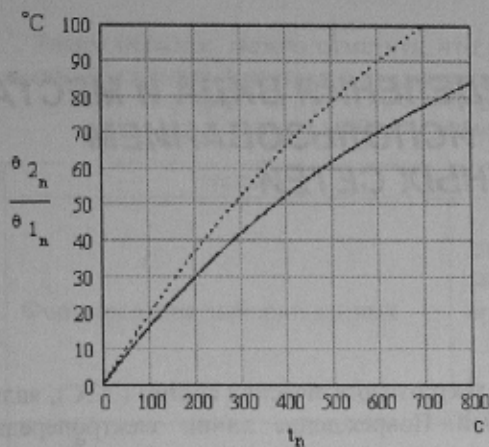
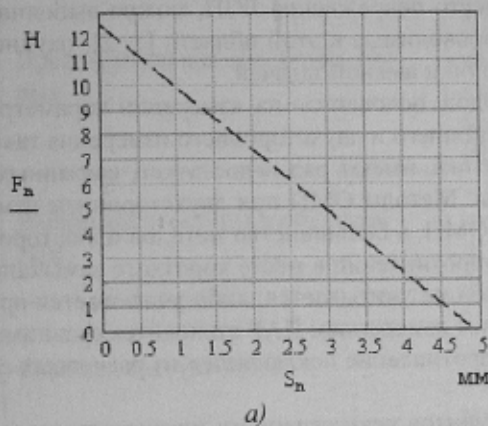
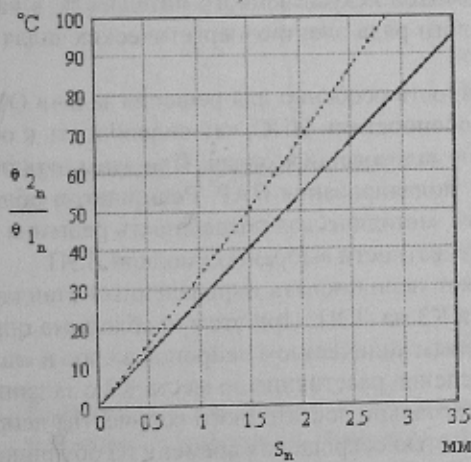


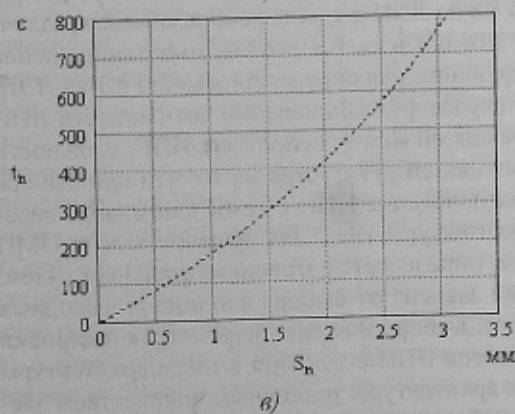
Рисунок 4 – Зависимость превышения температуры середины пластины 1 расцепителя от времени срабатывания реле



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зависимости рабочих характеристик расцепителя от хода свободного конца термобиметаллической пластины 2

Отклонение точки воздействия термозлемента 2 на механизм свободного расцепления АВ и развиваемое при этом усилие определяются

$$S(\tau) = \frac{Al_{2a}^2 \vartheta_2}{\delta_2}, F = \frac{AE_2 b_2 \delta_2^2 \vartheta_2}{4l_{2a}}$$

где l_{2a} - часть термозлемента 2 от точки 3, в которой он приварен к пластине 1, до точки его воздействия на механизм свободного расцепления АВ.

Расчетные данные по некоторым параметрам согласуются с экспериментальными результатами. Так в соответствии с экспериментом для АВ типа АЕ-2046М с $I_H = 31,5$ А время срабатывания составило 10 минут, ход свободного конца термобиметаллической пластины 2 при этом составил 2 мм и превышение температуры середины пластины 1 при срабатывании АВ достигло 90°C. Из рис. 4 видно, что превышение температуры середины пластины 1 за 600 с. достигло 90°C. Однако из рис.5 видно, что длительность нагрева пластины 1 при ходе свободного конца термобиметаллической пластины 2 до срабатывания АВ составило всего 420 с. Это в 1,4 раза меньше чем экспериментальные данные времени срабатывания АВ указанного типа.

Такое расхождение обусловлено тем, что возможно не учтена инерционность перемещающихся масс по определенному пути отключения.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный алгоритм расчета теплового расцепителя АВ типа АЕ-2046М и АЕ-2056ММ позволил получить превышение температуры пластины из стали близкое к экспериментальному 89,225°C (опытное значение 90°C) за время срабатывания АВ 600 с.

2. В предложенной конструкции теплового расцепителя обеспечение всего ряда номинальных токов (31,5; 40; 50; 63; 80 и 100А) АВ типа АЕ-2046М и АЕ-2056ММ при одинаковых параметрах термобиметаллического элемента 2 достигается изменением длины токоведущей части, длины l_b и ширины b_b оставшейся после выреза части пластины 1 из стали.

3. Расхождение времени срабатывания АВ между экспериментальными (600 с) и расчетными (420 с) значениями обусловлено тем, что возможно не учтена инерционность перемещающихся масс по определенному пути отключения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2160941. Автоматический выключатель / А.М. Гавриленко, В.И. Ломакин, В.Н. Терешин и др. // Бюл. №35 2000.
2. К расчету термобиметаллических расцепителей автоматических выключателей на номинальный ток свыше 25 А / В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова // Технічна електродинаміка – 2006 - № 6 - С.64-67.
3. Некоторые аспекты повышения эффективности защиты низковольтного электрооборудования / В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова // Електротехніка і електромеханіка – 2004 -№ 2 – С. 51-53.