

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕРМОБИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ

Терешин В.Н., д.т.н., проф., Богданова Л.Е.,  
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта  
Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, УкрГАЖТ, кафедра "Электротехника и электрические машины"

*Запропоновано основи розрахунку термобіметалічних виконавчих механізмів пристроїв захисту і керування, що дозволяють вибрати форму термoeлемента і марку термобіметала з якого він буде виконаний, а також його оптимальні геометричні параметри і способи нагрівання.*

*Предложены основы расчета термобиметаллических исполнительных механизмов устройств защиты и управления, позволяющие выбрать форму термоэлемента и марку термобиметалла из которого он будет выполнен, а также его оптимальные геометрические параметры и способы нагрева.*

### ВВЕДЕНИЕ

При расчете термобиметаллических исполнительных механизмов электромеханических устройств защиты и управления вводится большое количество допущений и потому полученные результаты полезны лишь для предварительного проектирования, которые впоследствии необходимо уточнить экспериментально. Из-за большого разнообразия термобиметаллических механизмов единого метода их расчета пока не существует. В задачу расчета таких механизмов входит определение зависимостей между перемещением свободных точек термобиметаллического элемента (в дальнейшем тексте термоэлемента) и развиваемых в этих точках изгибающих усилий, а также установление зависимостей между температурой термоэлемента и его параметрами.

Перед расчетом выбирают форму термоэлемента и марку термобиметалла. Выбор формы термоэлемента и марки термобиметалла зависит от назначения того устройства, в котором он будет установлен, и от его предельной температуры. Поэтому общих рекомендаций для всех возможных случаев по выбору формы термоэлемента и марки термобиметалла не существует. Предлагалось брать несколько наиболее рациональных для проектируемого устройства форм термоэлемента, просчитывать их и выбирать наилучшую.

Чаще всего расчет подобных механизмов ведется методом подобия, что в известной степени является тормозом развития творческой мысли относительно перспектив создания эвристических конструкций термобиметаллических исполнительных механизмов.

Для отхода от метода подобия предлагается, по мнению авторов, одна из первых попыток создания общих основ расчета термобиметаллических исполнительных механизмов всевозможных устройств защиты и управления.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходные данные для расчета:

- температурные условия работы проектируемого устройства;
- усилие противодействующих сил устройства в момент его срабатывания;
- предельные значения соответственно ширины и длины термоэлемента по конструктивным сообра-

жениям;

- номинальный, пограничный и ток срабатывания;
- среднестатистическое значение перемещения воздействующего участка термоэлемента на механизм управления устройства при его срабатывании;
- интервал времени срабатывания устройства защиты при токе срабатывания.

В результате расчета необходимо определить:

- форму термоэлемента;
- марку термобиметалла;
- оптимальное значение геометрических параметров термоэлемента;
- способ нагрева термоэлемента.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

С точки зрения надежности функционирования термобиметаллических исполнительных механизмов наиболее перспективным является равномерное распределение температуры по длине термоэлемента [1]. А потому наиболее распространенным является исполнение термоэлемента в виде консольно закрепленной термобиметаллической пластины постоянного сечения, свободный конец которой отодвигает защелку или воздействует на рейку механизма свободного расцепления автоматического выключателя (в дальнейшем тексте АВ), или непосредственно воздействует на контакты. К таким термоэлементам относится и консольно закрепленная U-образная термобиметаллическая пластина (рис. 1).

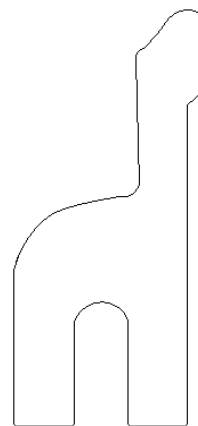


Рис. 1

По крайней мере нагрев термобиметаллических пластин вышеуказанных форм равномерный, а некоторая неравномерность распределения температуры по длине термоэлемента обусловлена разным теплоотводом по его концам. Наибольшая температура наблюдается в центре термоэлемента, а наименьшая по его краям. Обычно средняя температура при срабатывании термобиметаллического исполнительного механизма для термоэлемента выбирается из условия [2]

$$\vartheta_C = (0,7 \div 0,9)\vartheta_M, \quad (1)$$

где:  $\vartheta_M$  - превышение температуры наиболее нагретой точки термоэлемента;  $\vartheta_C$  - среднее превышение температуры термоэлемента при срабатывании устройства.

#### ВЫБОР МАРКИ ТЕРМОБИМЕТАЛЛА

Выбор марки термобиметалла зависит от назначения и условий эксплуатации того устройства защиты, в котором он будет установлен. Например, если речь идет о тепловых расцепителях АВ, то в соответствии с предъявленными требованиями к АВ температура токоведущих элементов не должна превышать  $105^\circ\text{C}$ . Таким образом температура термоэлемента при срабатывании АВ должна быть  $t_C > 105^\circ\text{C}$ . Обычно для АВ  $t_C \approx 140^\circ\text{C}$  [1]. Учитывая неравномерное распределение температуры по длине термоэлемента в соответствии с (1) превышение температуры наиболее нагретой его точки будет составлять

$$\vartheta_M = \frac{\vartheta_C}{(0,7 \div 0,9)} \quad (2)$$

По аналогии с (2) температура наиболее нагретой точки будет составлять

$$t_{MC} = \frac{t_C}{(0,7 \div 0,9)} \quad (3)$$

Для  $t_C = 140^\circ\text{C}$   $t_{MC} = (156 \div 200)^\circ\text{C}$ .

Еще необходимо учесть, что максимальная температура термоэлемента при пограничном токе должна быть [2]

$$t_{MC} \leq 0,55t_{MT}, \quad (4)$$

где  $t_{MT}$  - максимальная температура термобиметалла.

Исходя из (4) термобиметалл по максимальной температуре выбирается в соответствии с условием

$$t_{MT} \geq \frac{t_{MC}}{0,55}. \quad (5)$$

Так как температура наиболее нагретой точки термоэлемента находится в пределах  $t_{MC} = (156 \div 200)^\circ\text{C}$ , то максимальная температура термобиметалла для использования его в АВ должна удовлетворять условию

$$t_{MT} \geq 364^\circ\text{C}. \quad (6)$$

В случае использования термобиметалла в реле температура термоэлемента должна быть  $t_{cp} > 55^\circ\text{C}$  [3].

Тогда в соответствии с (5) максимальная температура термобиметалла для реле  $t_{MT} > 146^\circ\text{C}$ .

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

Наибольшее перемещение свободного конца термоэлемента  $S_M$  (наибольшая деформация) имеет место при "нулевой" развиваемой силе  $F_M=0$ . Наибольшая развиваемая сила  $F_M$  возникает при "нулевом" перемещении свободного конца термоэлемента  $S_M=0$  (рис. 2) [4].

$$S_M = \frac{A \cdot l^2 \cdot \vartheta_{MC}}{\delta}, \quad (7)$$

$$F_M = \frac{E \cdot b \cdot \delta^3 \cdot S_M}{4 \cdot l^3}, \quad (8)$$

где  $A$  - удельный изгиб,  $E$  - модуль упругости,  $\vartheta_{MC} = t_{MC} - t_0$  - превышение температуры наиболее нагретой точки термоэлемента ( $t_0$  - температура окружающей среды);  $l$ ,  $b$ ,  $\delta$  - соответственно длина, ширина, толщина термоэлемента.

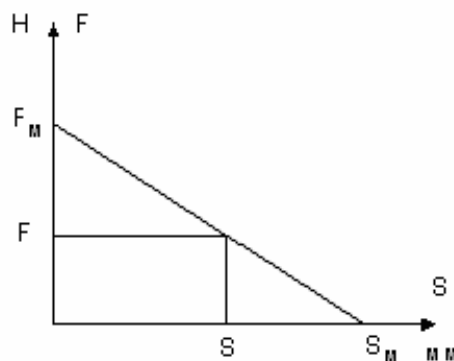


Рис. 2

Математическое выражение для зависимости  $F(S)$  на рис. 2 будет иметь вид

$$\frac{F}{F_M} = \frac{S_M - S}{S_M} \Rightarrow F = F_M \left( \frac{S_M - S}{S_M} \right), \quad (9)$$

где  $S$  и  $F$  - соответственно частичное перемещение и развиваемое усилие термоэлемента при его деформации для определенного превышения температуры  $\vartheta < \vartheta_M$ .

Минимальный объем термоэлемента  $V_{min}$  (минимальный расход термобиметалла) при заданной работоспособности будет в точке  $F = \frac{F_M}{2}$  и  $S = \frac{S_M}{2}$  [5].

Подставляя в (7) значение  $S_M = 2S$ , а в (8) значение  $F_M = 2F$  получаем

$$l = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta \cdot S}{A \cdot \vartheta_{MC}}}, \quad (10)$$

$$F = \frac{E \cdot b \cdot \delta^3 \cdot S}{4 \cdot l^3}, \quad (11)$$

где  $S$  - среднестатистическое перемещение свободного конца термоэлемента до срабатывания устройства (для АВ  $S = 2 \div 4$  мм).

Для увеличения надежности срабатывания устройства обычно берется  $F = (6 \div 10)F_{II}$  [2], где  $F_{II}$  - усилие противодействующих сил устройства защиты

в момент его срабатывания. Например, для однополюсных АВ выбирается  $F \geq 6F_{II}$ .

Тогда (11) для однополюсных АВ и реле запишется в виде

$$F_{II} \leq \frac{E \cdot b \cdot \delta^3 \cdot S}{24 \cdot I^3}. \quad (12)$$

Для 3-х полюсных АВ из (11) можем записать (при  $F \geq 10F_{II}$ )

$$F_{II} = \frac{E \cdot b \cdot \delta^3 \cdot S}{40 \cdot I^3}. \quad (13)$$

Например, для 3-х полюсных АВ исходя из (13) выразим  $b$

$$b = \frac{40 \cdot F_{II} \cdot I^3}{E \cdot S \cdot \delta^3}. \quad (14)$$

Чтобы термозлемент не деформировался по сфере рекомендуется выдерживать соотношение [2]

$$\delta \geq \frac{b}{20}. \quad (15)$$

Задавая различные приемлемые значения  $\delta$ , начиная с  $\delta = b_{пр}/20$  и далее увеличивая  $\delta$  через каждые 0,1 мм, будем получать по (10) и (14) различные значения  $l \leq l_{пр}$  и  $b \leq b_{пр}$ , удовлетворяющие условию оптимальности исполнительного механизма по минимуму занимаемого термозлементом объема (минимуму расхода термобиметалла).

Таким образом получаются значения  $b \leq b_{пр}$ ,  $l \leq l_{пр}$  и  $\delta$  при которых термозлемент развивает максимальную работоспособность при минимальном объеме термозлемента (минимуме расхода термобиметалла).

#### ВЫБОР СПОСОБА НАГРЕВА ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

Предварительно выбираем непосредственный нагрев термозлемента, так как при этом его изгибные деформации не испытывают внешних помех и нагрев термозлемента равномерный. Это самый простой, стабильный и распространенный в практике нагрев термозлементов.

Уравнение теплового баланса за время неустановившегося теплового процесса будет иметь вид

$$P \cdot d\tau = \alpha \cdot S \cdot \vartheta \cdot d\tau + c \cdot M \cdot d\vartheta, \quad (16)$$

где:  $P \cdot d\tau$  - тепловая энергия, выделяемая в термозэлементе при протекании в нем тока уставки;  $\alpha \cdot S \cdot \vartheta \cdot d\tau$  - энергия, отводимая от термозлемента в окружающее пространство;  $c \cdot M \cdot d\vartheta$  - энергия, расходуемая на нагрев термозлемента за счет теплоемкости;

$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l}{b \cdot \delta}$  - мощность тепловых потерь в термозэлементе ( $S$  - площадь поперечного сечения термозлемента,  $I$  - ток уставки срабатывания устройства);  $c$  - удельная теплоемкость термозлемента;  $M = \gamma \cdot \delta \cdot b \cdot l$  - масса термозлемента;  $S = q \cdot l = 2l \cdot (b + \delta)$  - поверхность охлаждения термозлемента ( $q$  - периметр поперечного сечения термозлемента);  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $\tau$  - время

нагрева;  $\vartheta = t - t_0$  - превышение температуры термозлемента  $t$  над температурой окружающей среды  $t_0$ .

Для прогрева термозлемента током уставки с "холодного" состояния, т.е.  $\vartheta = 0$  при  $\tau = 0$ , уравнение (16) примет вид

$$P = \alpha \cdot S \cdot \vartheta + c \cdot M \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau}, \quad (17)$$

Уравнение (17) в нормализованной форме запишется

$$\frac{P}{\alpha \cdot S} = \vartheta + \frac{c \cdot M}{\alpha \cdot S} \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau}, \quad (18)$$

Так как  $\delta \ll b$ , то полагая  $S = 2 \cdot b \cdot l$  и подставляя в (18) выражения для  $P, S, c, M$ , получаем

$$\frac{\rho \cdot I^2}{2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot b^2} = \vartheta + \frac{c \cdot \gamma \cdot \delta}{2 \cdot \alpha} \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau}, \quad (19)$$

Решением уравнения (19) будет

$$\vartheta = \vartheta_y \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right), \quad (20)$$

где:  $\vartheta_y$  - установившаяся температура перегрева термозлемента;  $T$  - постоянная времени нагрева термозлемента.

Для определения  $T$  по уравнению (19) составляется характеристическое уравнение

$$1 + \frac{c \cdot \gamma \cdot \delta}{2 \cdot \alpha} \cdot p = 0, \quad (21)$$

где  $p$  - корень характеристического уравнения.

Из (21) имеем

$$p = -\frac{2 \cdot \alpha}{c \cdot \gamma \cdot \delta}.$$

Постоянная времени нагрева термозлемента будет определяться

$$T = \frac{1}{|p|} = \frac{c \cdot \gamma \cdot \delta}{2 \cdot \alpha}, \quad (22)$$

Из (19) определяем установившееся значение температуры перегрева термозлемента

$$\vartheta_y = \frac{\rho \cdot I^2}{2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot b^2}, \quad (23)$$

Подставляя (22) и (23) в (20), получаем

$$\vartheta = \frac{\rho \cdot I^2}{2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot b^2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \alpha}{c \cdot \gamma \cdot \delta} \tau} \right), \quad (24)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от термозлемента в окружающее пространство определяется [4]

$$\alpha = 1,33 \left( \frac{\vartheta_C}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (25)$$

где  $L$  - характерный размер. В данном случае  $L = l$ .

Если не устраивает время нагрева, то как видно из (22) им можно варьировать только изменением толщины термозлемента  $\delta$ . Если же не устраивает температура перегрева термозлемента, то как видно из (23) ею можно варьировать только изменением  $\delta$  и ширины термозлемента  $b$ . Но в любом случае новые значения  $\delta$  и  $b$  должны проверяться по (10), (14) и (15)

для того, чтобы не нарушалось условие оптимальности термоэлемента по занимаемому объему. Если этого не удается, то необходимо менять непосредственный нагрев термоэлемента на косвенный или комбинированный. При этом необходимо выбирать конструкции нагревателей такие, чтобы они не препятствовали деформации термоэлемента, например [6, 7, 8].

Косвенный нагрев термоэлемента используется, если ток уставки срабатывания устройства недостаточен для нагрева термоэлемента до необходимой температуры. В этом случае на термоэлемент накладывается изоляция и на нее наматывается нагреватель из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением. Нагреватель наматывается равномерно по всей длине термоэлемента или по ее части, либо укладывается с одной стороны термоэлемента (со стороны его активного слоя). При косвенном нагреве необходимо, чтобы изоляция и нагревательный элемент были упругими и сопротивлялись истиранию. Однако независимо от этого нагревательный элемент с изоляцией препятствуют деформации термоэлемента, что ведет к дополнительному расходу термометалла, увеличению трудоемкости изготовления устройства, потребляемой мощности и, в конечном счете, к увеличению стоимости устройства.

Комбинированный нагрев термоэлемента применяется, когда ток уставки срабатывания устройства больше значения тока необходимого для непосредственного нагрева термоэлемента до температуры срабатывания. В этом случае часть тока отводится от термоэлемента с помощью шунтов. Нагрев термоэлемента осуществляется непосредственно частью тока, протекающего через термоэлемент, и косвенно от шунтов. Шунты по отношению к термоэлементу могут иметь как одностороннее, так и двухстороннее расположение. Однако у таких исполнительных механизмов увеличивается материалоемкость, трудоемкость и потребляемая мощность, что ведет к увеличению стоимости всего устройства.

#### ВЫВОДЫ

Предложенные методологические основы расчета термометаллических исполнительных механизмов электромеханических устройств защиты и управления с учетом конкретных условий их эксплуатации позволяют определить:

- 1) форму термоэлемента и марку термометалла из которого он выполнен;
- 2) оптимальные геометрические параметры термоэлемента из условия минимума занимаемого им объема (минимума расхода термометалла);
- 3) способ нагрева термоэлемента;
- 4) уставку тока срабатывания устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Некоторые аспекты повышения эффективности защиты низковольтного электрооборудования /В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова// Электротехника і електромеханіка, 2004, №2, С. 51-53.
- [2] Р.С. Кузнецов. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970. 543 с.
- [3] Электрические и электронные аппараты / Под ред. Ю.К. Розанова. М.: Энергоатомиздат, 1998. 750 с.
- [4] К расчету термометаллических расцепителей автоматических выключателей на номинальный ток свыше 25 А / В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова// Светотехника и электроэнергетика, 2004, №3, С. 22-26.
- [5] А.с. 995147 (СССР). Тепловой расцепитель косвенного нагрева /Ю.П. Астахов, А.В. Богословский, В.Н. Терешин. – 6 с.: ил.
- [6] Патент РФ №2095875. Автоматический выключатель/А.М. Гавриленко, В.И. Ломакин, В.Н. Терешин и др. – 12 с.: ил.
- [7] Патент РФ №2160941. Автоматический выключатель/А.М. Гавриленко, В.И. Ломакин, В.Н. Терешин и др. – 12 с.: ил.

*Поступила 30.05.2006*