

К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЗОНЕ ТОКОВ ПЕРЕГРУЗКИ

Терешин В.Н., д.т.н., проф., Богданова Л.Е.,

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, УкрГАЗТ, кафедра "Электротехника и электрические машины",

Представлено результати аналізу впливу на час спрацьовування автоматичних вимикачів при малих струмах перевантаження приведеної маси до кінця термоелемента, що впливає, термобіметалічного розчіплювача частин, що переміщуються, по визначеному шляху відключення.

Представлены результаты анализа влияния на время срабатывания автоматических выключателей при малых токах перегрузки приведенной массы к воздействию концу термоэлемента термобиметаллического расцепителя перемещающихся частей по определенному пути отключения.

ВВЕДЕНИЕ

Время срабатывания автоматических выключателей (АВ) на токах перегрузки I_{Π} ($1.05I_N \leq I_{\Pi} < 10I_N$, где I_N - номинальный ток АВ) определяется, прежде всего, скоростью нарастания температуры нагрева термоэлемента (ТЭ) $\vartheta_2(\tau) = [t_2(\tau) - t_0]$ ($t_2(\tau)$ - температура ТЭ, t_0 - температура окружающей среды, τ - текущее время протекания тока I_{Π} через ТЭ).

Таким образом, величина перемещения S свободного конца ТЭ и развиваемое им при этом усилие F_2 являются функциями времени τ

$$S = \frac{Al_2^2}{\delta_2} \vartheta_2(\tau); \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{AE_2 b_2 \delta_2^2}{4l_2} \vartheta_2(\tau), \quad (2)$$

где A - удельный изгиб; δ_2, l_2 и b_2 - соответственно толщина, длина и ширина ТЭ; $\vartheta_2(\tau)$ - превышение температуры ТЭ над температурой окружающей среды; E_2 - модуль упругости Юнга.

Однако исследования показали, что время срабатывания АВ τ_{cp} отстает от времени нарастания температуры нагрева $\vartheta_2(\tau)$ ТЭ. На рис. 1,а показана зависимость нарастания температуры перегрева ТЭ (ϑ_2 - сплошная линия) от времени, а на рис. 1,б - зависимость температуры перегрева ТЭ от величины перемещения воздействующего конца ТЭ на рейку механизма свободного расцепления АВ. Экспериментальные исследования показали, что срабатывание АВ происходит

за время $\tau_{cp} = 600$ с, и перемещение воздействующего конца ТЭ при этом составляет 2 мм (S_{cp}). Из рис. 1,а видно, что за 600 с $\vartheta_2 = 80^\circ\text{C}$, а из рис. 1,б следует, что перемещению воздействующего конца ТЭ $S_{cp} = 2$ мм соответствует температура перегрева ТЭ $\vartheta_2 = 55^\circ\text{C}$. В соответствии с рис. 1,а для температуры перегрева ТЭ $\vartheta_2 = 55^\circ\text{C}$ время нагрева составляет всего 250 с. Это в 2,4 раза меньше, чем экспериментальные данные времени срабатывания АВ.

Можно предположить, что такое расхождение обусловлено тем, что не учтена инерционность перемещающихся масс АВ по определенному пути отключения.

Примером термобиметаллического расцепителя АВ является механизм, принцип действия которого схематически изображен на рис. 2 (рис. 2,а - взведенное состояние АВ, рис. 2,б - АВ после срабатывания).

Приведем действующие силы механизма свободного расцепления АВ к свободному концу ТЭ и обозначим перемещение свободного конца ТЭ от начального положения через S . Диаграмма сил в зависимости от перемещения S изображена на рис. 3.

На участке "0- S_0 " перемещению свободного конца ТЭ от начального положения $S = 0$ противодействующие силы механизма свободного расцепления АВ не препятствуют и потому в соответствии с [1] и рис. 3 можно записать

$$F_{20} = \frac{F_{2M}}{S_M} (S_M - S_0), \quad (3)$$

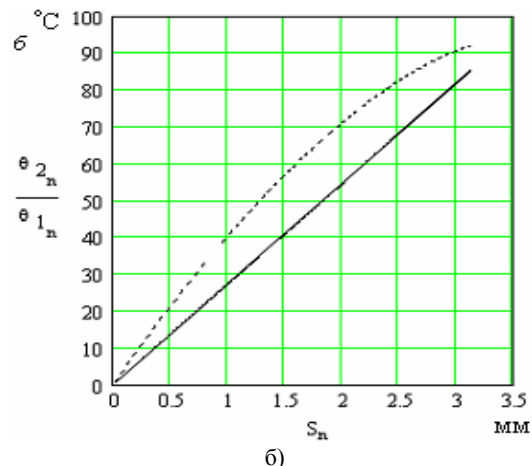
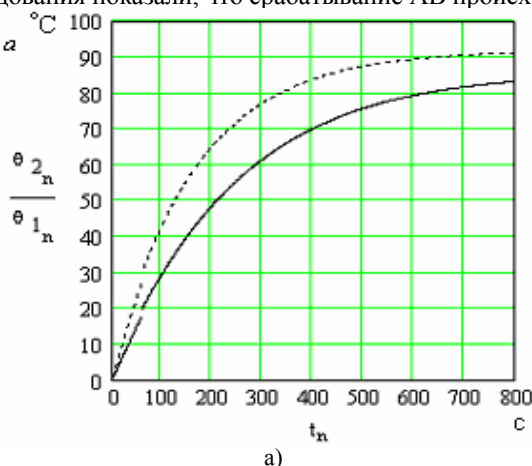


Рис. 1

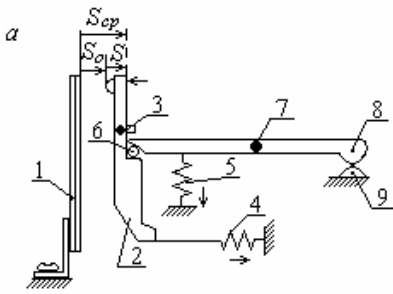


Рис. 2

1 – ТЭ; 2 – рейка механизма свободного расцепления; 3 – ось вращения рейки; 4 – пружина рейки 2; 5 – противодействующие усилия механизма свободного расцепления; 6 – стальной валик; 7 – ось вращения механизма свободного расцепления; 8-9 – контактная система АВ

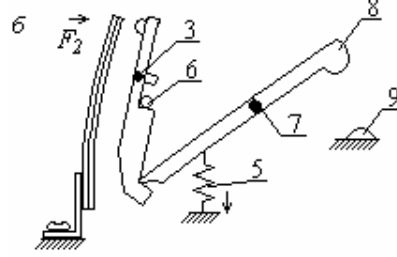
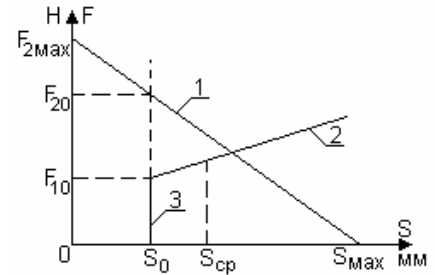


Рис. 3



1 – сила, развиваемая свободным концом ТЭ при его деформации; 2 – сила противодействующей пружины 4 рейки механизма свободного расцепления; 3 – сила трения покоя механизма свободного расцепления АВ

где $F_{2M} = p^2 F_{2H}$ - наибольшая развиваемая свободным концом ТЭ сила при $S = 0$; S_M - наибольшее перемещение свободного конца ТЭ при $F_2 = 0$; F_{2H} - сила, развиваемая свободным концом ТЭ при установившемся его нагреве номинальным током I_H ;

$p = \frac{I_{II}}{I_H}$ - кратность тока перегрузки.

Время перемещения свободного конца ТЭ на участке "0-S₀" можно определить из известного выражения

$$S_0 = S_M (1 - e^{-\frac{\tau_0}{T}}), \quad (4)$$

где T - постоянная времени нагрева ТЭ; τ_0 - время, соответствующее положению свободного конца ТЭ, при котором $S = S_0$.

После соответствующих преобразований из (4) получим

$$\tau_0 = T \ln \frac{S_M}{S_M - S_0}. \quad (5)$$

На участке "S₀- S_{cp}" (рис. 3) принцип действия термометаллического расцепителя по рис. 2 схематически показан на рис. 4. Рассмотрим зависимость для времени срабатывания АВ. Приведем действующие силы к свободному концу ТЭ. Диаграмма сил в зависимости от перемещения свободного конца ТЭ изображена на рис. 3. Как видно из рис. 3 ТЭ подвержен тепловой деформации, зависящей от температуры (зависимость 1), а после достижения воздействующим концом ТЭ рейки механизма свободного расцепления АВ – также механической деформации (зависимость 3-2), которая достигает максимума в момент срабатывания АВ.

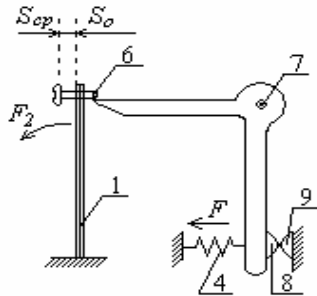


Рис. 4

Имеющие место процессы протекают независимо. Для расчета времени срабатывания АВ при токах перегрузки достаточно проследить за изменением температурного режима до момента расцепления. Ус-

ловие расцепления включает в себя полученные тепловые деформации за вычетом обратно направленных механических.

Сила, развиваемая свободным концом ТЭ, в произвольном положении S , будет определяться

$$F_2 = F_{2M} (1 - e^{-\frac{\tau_0 + \tau}{T}}) - K_2 S, \quad (6)$$

где $K_2 = \frac{E_2 b_2 \delta_2^3}{4l_2^3}$ - механическая постоянная ТЭ.

Сила, с которой механизм свободного расцепления АВ действует на свободный конец ТЭ, будет определяться

$$F_1 = F_{10} + K_1 S, \quad (7)$$

где F_{10} - сила трения покоя механизма свободного расцепления АВ в положении $S = S_0$ (рис. 3); K_1 - постоянная противодействующей пружины 4.

Разность этих сил условно можно назвать ускоряющей силой ΔF

$$\Delta F = F_2 - F_1 = \left[p^2 F_{2H} \left(1 - e^{-\frac{\tau_0 + \tau}{T}} \right) - K_2 S \right] - (F_{10} + K_1 S). \quad (8)$$

($F_{10} + K_1 S$).

Введем обозначение

$$F_{10} = p^2 F_{2H} \left(1 - e^{-\frac{\tau_0}{T}} \right) = p_0 F_{2H}.$$

Тогда подставив это в (8), получаем

$$\Delta F = p^2 F_{2H} - p^2 F_{2H} \left(1 - e^{-\frac{\tau_0}{T}} \right) - p^2 F_{2H} e^{-\frac{\tau_0}{T}} e^{-\frac{\tau}{T}} - KS, \quad (9)$$

где $K = K_1 + K_2$.

После упрощений выражение (9) примет вид

$$\Delta F = p^2 F_{2H} e^{-\frac{\tau_0}{T}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) - KS. \quad (10)$$

Введем обозначение

$$\Delta F_K = p^2 F_{2H} e^{-\frac{\tau_0}{T}} = F_{2M} e^{-\frac{\tau_0}{T}}.$$

После этого выражение (10) преобразуется

$$\Delta F = \Delta F_K \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) - KS. \quad (11)$$

Так как ускоряющая сила ΔF равна произведе-

нию приведенной массы m к свободному концу ТЭ 1 на ускорение $S'' = \frac{d^2 S}{dt^2}$, то уравнение (11) будет иметь вид

$$mS'' + KS = \Delta F_K \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right). \quad (12)$$

Приведем уравнение (12) к нормализованному виду

$$S'' + \frac{K}{m} S = \frac{\Delta F_K}{m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right). \quad (13)$$

Введем обозначение $a = \sqrt{\frac{K}{m}}$.

Тогда (13) примет вид

$$S'' + a^2 S = \frac{\Delta F_K}{m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right). \quad (14)$$

Проинтегрируем уравнение (14) при начальных условиях $\tau = \tau_0$, $S = S_0$ и $S' = 0$.

В уравнении (14) не учитывается демпфирование за счет трения движущихся масс о воздух. Однако при коротком пути существенной ошибки не появляется.

Решением уравнения (14) после соответствующих преобразований будет [2]

$$S = \frac{\Delta F_K}{ma^2(1+a^2T^2)} \left\{ a^2 T^2 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) - \sqrt{1+a^2T^2} * \right. \quad (15)$$

$$\left. \sin \left[a\tau + \operatorname{arcsin} \frac{1}{\sqrt{1+a^2T^2}} \right] \right\}.$$

Так как $T \gg 1$, а для АВ $1 < a < 2$, то $aT \gg 1$, тем более $a^2T^2 \gg 1$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} (1+a^2T^2) &= a^2T^2 \\ \sqrt{(1+a^2T^2)} &= aT \\ \frac{1}{\sqrt{(1+a^2T^2)}} &= 0 \\ \operatorname{arcsin} \frac{1}{\sqrt{(1+a^2T^2)}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В соответствии с (16) выражение (15) примет вид

$$S = \frac{\Delta F_K}{ma^4T^2} \left[a^2T^2 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) - aT \sin a\tau \right]. \quad (17)$$

После преобразования (17) получим

$$S = \frac{\Delta F_K}{ma^2} \left[\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) - \frac{\sin a\tau}{aT} \right]. \quad (18)$$

Так как $0 \leq \sin a\tau \leq 1$ при любых значениях τ , то в соответствии с (16) и после подстановки $a = \sqrt{\frac{K}{m}}$

выражение (18) примет вид

$$S = \frac{\Delta F_K}{K} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right). \quad (19)$$

Как видно из (19) при скоростях нарастания температуры нагрева ТЭ ($T \geq 100$ с) приведенная к концу ТЭ масса m перемещающихся частей АВ по определенному пути отключения не влияет на время срабатывания АВ. В выражении (19) можно считать

$$\Delta F_K = F_{20} - F_{10}.$$

Время срабатывания АВ на участке " $S_0 - S_{cp}$ " в соответствии с (19) будет определяться

$$\tau = T \ln \frac{\Delta F_K}{\Delta F_K - KS}. \quad (20)$$

Таким образом полное время срабатывания АВ на токах перегрузки τ_{cp} будет определяться

$$\tau_{cp} = \tau_0 + \tau. \quad (21)$$

Подставляя в выражение (21) вместо τ_0 и τ их выражения из (5) и (20) соответственно, получим

$$\tau_{cp} = T \ln \frac{S_M}{S_M - S_0} + T \ln \frac{\Delta F_K}{\Delta F_K - K(S_{cp} - S_0)}. \quad (22)$$

Используя известную формулу $\ln a + \ln b = \ln ab$ выражение (22) для времени срабатывания АВ примет вид

$$\tau_{cp} = T \ln \frac{\Delta F_K \cdot S_M}{(S_M - S_0)[\Delta F_K - K(S_{cp} - S_0)]}. \quad (23)$$

Для случая, рассмотренного в статье, время срабатывания АВ в соответствии с формулой (23) составило 390,9 с, что на 56% больше, чем в предыдущем расчете ($\tau_{cp} = 250$ с рис. 1). Однако это время еще меньше экспериментального (600 с) на 35%.

Очевидно, что причины отставания времени срабатывания АВ τ_{cp} от времени нарастания температуры ТЭ следует дополнительно искать в других физических процессах, протекающих в АВ при нагреве ТЭ. Например, разброс S_{cp} на 5% приводит к изменению времени срабатывания АВ на 18%. С другой стороны, при неизменном значении S_{cp} перераспределение между S_0 и $(S_{cp} - S_0)$ на 5% приводит к изменению τ_{cp} только на 4%.

ВЫВОДЫ

1. При нагреве ТЭ термобиметаллического расцепителя АВ с постоянной времени нагрева $T \geq 100$ с приведенная к воздействию концу ТЭ масса m перемещающихся частей АВ по определенному пути отключения не влияет на время срабатывания АВ.

2. Учет характера противодействующих сил с качественной и количественной стороны позволил значительно приблизить расчетное время срабатывания к экспериментальному.

3. Расхождение времени срабатывания АВ между экспериментальными (600 с) и расчетными (391 с) значениями обусловлено тем, что не учтены некоторые физические процессы, возникающие в АВ при его нагреве током перегрузки (уменьшение упругости пружины, увеличение сил трения и т.п.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методологические основы расчета термобиметаллических механизмов электромеханических устройств защиты / В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова // *Электротехника и электромеханика*, 2006, №6, С. 41-44.
- [2] Кашпар Ф. Термобиметаллы в электротехнике. – М.: Госэнергоиздат. 1961.

Поступила 26.04.2007