

Пильцов Михаил Владимирович,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: mpilcov@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЯТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

Piltsov M.V.

CONSTRUCTION OF THE TIME-CURRENT CHARACTERISTICS ON THE BASIS OF THE MATHEMATICAL MODELS OF THE THERMAL PROTECTION OBJECTS

Аннотация. Статья посвящена получению стандартных времятоковых характеристик на основе математических моделей объектов тепловой защиты, применяемых в современных автоматических выключателях, снабженных цифровыми расцепителями.

Ключевые слова: цифровой расцепитель, тепловая защита.

Abstract. The article is devoted to obtaining standard time-current characteristics on the basis of mathematical models of thermal protection objects used in modern automatic circuit breakers equipped with digital releases.

Keywords: digital breaker, thermal protection.

Основным защитным коммутационным устройством в цепях до 1000 В является автоматический выключатель. Данное устройство должно выполнять защиту электрических цепей от двух аварийных режимов: режима короткого замыкания и режима перегрузки [1]. Для защиты от короткого замыкания, характеризующегося резким скачком тока, применяют электромагнитные расцепители. Они представляют собой соленоиды, втягивающие якорь под действием большого тока, и воздействующие последним на механизм свободного расцепления, обеспечивая срабатывание автомата. Защиту от перегрузки, характеризующейся длительным протеканием токов, превышающих номинальные, но меньших токов короткого замыкания, осуществляют с помощью тепловых расцепителей. Они представляют собой биметаллические пластины, деформирующиеся под действием нагрева, вызванного протекающими через них токами.

Тепловые расцепители, описанные выше, обладают рядом существенных недостатков:

- малая точность определения температуры срабатывания, обусловленная технологией производства биметаллических пластин;
- высокая стоимость биметалла;
- отсутствие возможности выбора желаемой времятоковой характеристики путем подстройки параметров расцепителя;
- ограниченная функциональность автомата, комплектуемого биметаллическим расцепителем.

Современный подход к защите от перегрузки, избавляющий автоматы от рассмотренных недостатков, состоит в применении цифровых расцепителей,

представляющих собой микропроцессорные устройства, снабженные датчиками тока, напряжения и температуры. Сам защищаемый объект при этом заменяется его математической моделью в виде дифференциального уравнения. Микропроцессор в режиме реального времени определяет температуру объекта и принимает решение о срабатывании расцепителя. В настоящее время такие расцепители находят применение только в мощных автоматах, а их распространение сдерживается экономическим фактором.

Основной характеристикой, определяющей работу автоматического выключателя, является его времятоковая характеристика. Она представляет собой зависимость времени срабатывания автомата от отношения тока текущего к току номинальному и приведена на рисунке 1.

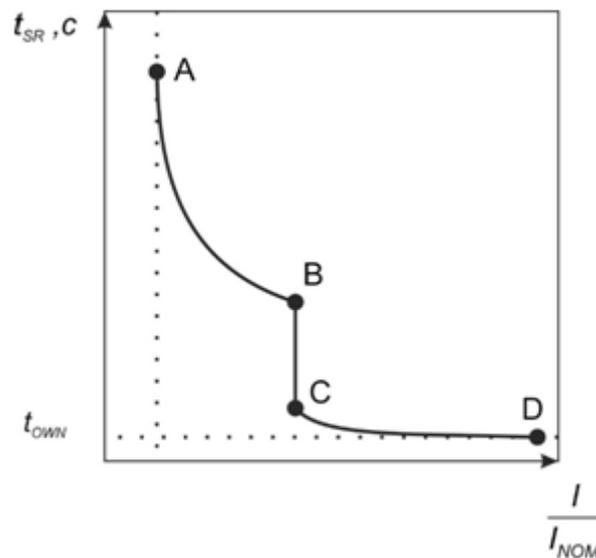


Рисунок 1 – Стандартная времятоковая характеристика автоматического выключателя: участок A-B – зона защиты от перегрузки; участок C-D – зона защиты от токов короткого замыкания

В данном случае возникает проблема получения стандартных времятоковых характеристик из математических моделей защищаемых объектов. Чтобы решить данную проблему, необходимо изменить стандартную модель и выполнить ряд преобразований. Рассмотрим этот процесс на примере следующей математической модели [2]:

$$G \cdot c \cdot d\tau + S \cdot \lambda \cdot \tau \cdot dt = P \cdot dt, \quad (1)$$

где P – мощность, рассеиваемая в объекте; G – масса объекта; c – удельная теплоемкость объекта; τ – перегрев объекта; S – площадь поверхности объекта; λ – коэффициент рассеяния объекта.

Чтобы была возможность на основе уравнения (1) построить времятоковые характеристики, в него необходимо ввести отношение тока текущего к тому номинальному. Энергия, подводимая к объекту, равна:

$$Q = \int i^2(t) \cdot R \cdot dt, \quad (2)$$

где $i(t)$ – ток, протекающий через объект; R – электрическое сопротивление объекта.

Мощность, рассеиваемая в объекте, связана с подводимой энергией следующим образом:

$$P = (Q)' = \left(\int i^2(t) \cdot R \cdot dt \right)' = i^2(t) \cdot R. \quad (3)$$

Если считать поступающую мощность постоянной $P = const$, то через бесконечный промежуток времени $t = \infty$ вся энергия будет рассеиваться в окружающую среду, и перегрев примет свое конечное значение $\tau = \tau_{end}$ для данной P . При этом уравнение (1) примет вид:

$$S \cdot \lambda \cdot \tau_{end} \cdot dt = P \cdot dt. \quad (4)$$

Положим, что в объекте рассеивается номинальная мощность:

$$P_{nom} = i_{nom}^2(t) \cdot R. \quad (5)$$

Тогда, через бесконечный промежуток времени объект нагреется до номинального перегрева $\tau = \tau_{nom}$ и уравнение (1) примет вид:

$$S \cdot \lambda \cdot \tau_{nom} \cdot dt = P_{nom} \cdot dt. \quad (6)$$

Разделим уравнение (1) на уравнение (6), введя тем самым отношение токов в модель:

$$\frac{G \cdot c \cdot d\tau}{S \cdot \lambda \cdot \tau_{nom} \cdot dt} + \frac{\tau}{\tau_{nom}} = \frac{P}{P_{nom}}. \quad (7)$$

Так как мощности относятся так же, как и квадраты токов, уравнение (7) примет вид:

$$\frac{G \cdot c \cdot d\tau}{S \cdot \lambda \cdot \tau_{nom} \cdot dt} + \frac{\tau}{\tau_{nom}} = \frac{i^2(t)}{i_{nom}^2(t)}. \quad (8)$$

Для того, чтобы привести уравнение (8) к виду, удобному для решения, умножим его сначала на номинальный перегрев τ_{nom} , а затем на отношение $S \cdot \lambda / G \cdot c$:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} \cdot \tau = \frac{i^2(t)}{i_{nom}^2(t)} \cdot \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} \cdot \tau_{nom}. \quad (9)$$

Получившееся уравнение (9) позволяет находить перегрев объекта, как функцию от отношения токов, а также номинального и начального перегрева.

Пусть на объект воздействует переменный ток, тогда его форма и мощность, которую он рассеивает, описываются выражениями:

$$i(t) = I_b \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (10)$$

$$P = I_b^2 \cdot R \cdot \sin^2(\omega \cdot t). \quad (11)$$

Введем понятие номинальной мощности, которую рассеивает номинальный ток:

$$P_{nom} = I_{b\text{nom}}^2 \cdot R \cdot \sin(\omega \cdot t)^2. \quad (12)$$

Если подставить (11) и (12) в уравнение (9) и выполнить над ним ряд преобразований, оно приобретет вид:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} \cdot \tau = \frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} \cdot \tau_{nom}. \quad (13)$$

Общее решение уравнения (13) имеет вид:

$$\tau = C \cdot e^{-\frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} t} + e^{-\frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} t} \frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} \cdot \tau_{nom} \cdot \int e^{\frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} t} \cdot dt. \quad (14)$$

Раскрывая интеграл в уравнении (14), получим выражение:

$$\tau = C \cdot e^{-\frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} t} + \frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \tau_{nom}. \quad (15)$$

Постоянная составляющая находится из условия отсутствия перегрева в начальный момент времени:

$$C = -\frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \tau_{nom}. \quad (16)$$

С учетом постоянной составляющей, уравнение (15) примет вид:

$$\tau = \frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \tau_{nom} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c} t} \right). \quad (17)$$

Для того, чтобы воспользоваться уравнением (17) и построить с его помощью времятоковые характеристики, необходимо величину перегрева τ принять за допустимую τ_{dop} , затем выразить из (17) время t_{sr} , которое и потребуется защищаемому объекту, чтобы нагреться до допустимого перегрева. Уравнение (17) после данных преобразований примет следующий вид:

$$t_{sr} = \frac{G \cdot c}{S \cdot \lambda} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{\frac{I_b^2}{I_{b\text{nom}}^2} \cdot \tau_{nom}} \cdot \tau_{dop}} \right). \quad (18)$$

Таким образом, на основе математической модели защищаемого объекта (13), была получена зависимость времени срабатывания защиты от отношения тока текущего к току номинальному. При этом из уравнения модели ушел физический параметр R . Однако, данный параметр необходим при вычислении номинального перегрева τ_{nom} . Выражение (18) позволяет строить целые семейства времятоковых характеристик, для этого необходимо лишь задать физические параметры объекта защиты, а также номинальный ток и номинальный пе-

регрев. На рисунке 2 показаны три времятоковые характеристики, которые позволяют построить полученная зависимость [3].

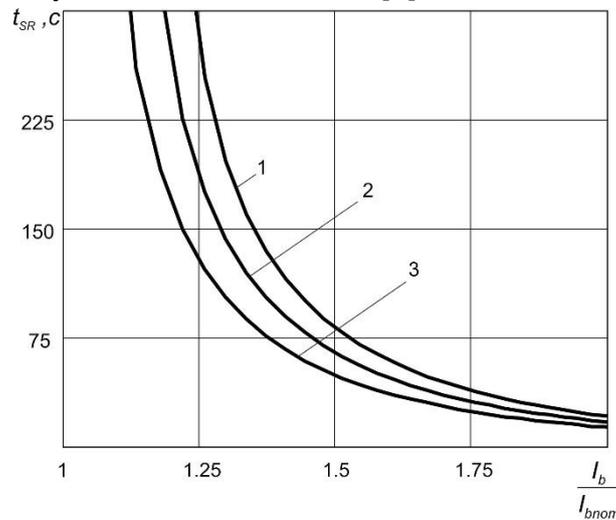


Рисунок 2 – Семейство времятоковых характеристик, построенных при различных значениях допустимого перегрева: 1 – при $\tau_{доп} = 60^\circ\text{C}$; 2 – при $\tau_{доп} = 50^\circ\text{C}$; 3 – при $\tau_{доп} = 40^\circ\text{C}$

Из характеристик на рисунке 2 видно, что чем больше задан допустимый перегрев, тем менее круто убывает график зависимости.

Выражение (18), полученное в данной работе, позволяет оценить форму времятоковой характеристики при уже заданных физических параметрах модели объекта защиты, либо, при необходимости, подобрать параметры модели под нужную форму кривой отключения. Приемы получения времятоковых характеристик из математических моделей защищаемых объектов, рассмотренные выше, применимы к любым моделям объектов, построенным на принципе теплового баланса.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50571.5–94. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтоков. – Введ. 1995–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 5с.

2. Кузнецов Б.Ф., Пильцов М.В. Тепловая модель потребителя распределительной сети / Б.Ф. Кузнецов, М.В. Пильцов // Винеровские чтения: Труды IV Всероссийской конференции. Часть I. – Иркутск : ИрГТУ, 2011.– С.156 – 162.

3. Пильцов М.В. Модели и алгоритмы тепловой защиты в цифровых расцепителях автоматических выключателей: Дисс. ...кандидата технических наук. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск. 2014. 175 с.