

УДК 621.314.221/.212

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д.И. ЗАЛИЗНЫЙ, Д.М. ЛОСЬ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

1. Введение

Силовые трансформаторы – это один из основных элементов системы электро-снабжения. В процессе эксплуатации они должны быть надежно защищены от недопустимых аварийных перегрузок.

Как известно, аварийный режим силового трансформатора определяется максимально допустимыми значениями его основных тепловых параметров. Согласно ГОСТ 14209 – 85 [1] и МЭК 354 [2], к основным тепловым параметрам силовых масляных трансформаторов относят температуру наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки, температуру ННТ масла и тепловой износ витковой изоляции. Но на сегодняшний день контролируется только один из этих параметров – температура верхних слоев масла в баке трансформатора. Контроль осуществляется с помощью специальных термометров, например манометрических типа ТКП-160, входящих в комплект к трансформатору. На основе данных термометров построена тепловая защита трансформаторов. Остальные тепловые параметры – температура ННТ обмотки, и тепловой износ изоляции фактически не контролируются. Это связано с тем, что технически очень сложно непосредственно измерять температуру обмотки, так как она находится под высоким напряжением и покрыта изоляцией. Имеющиеся отечественные и зарубежные разработки устройств, осуществляющих непосредственный контроль температуры обмотки [3], не нашли широкого применения из-за их высокой стоимости и специальных требований, предъявляемых к датчикам.

Альтернативой непосредственному измерению температуры обмотки является косвенный метод. Это так называемый метод тепловых моделей [4]. Суть метода состоит в том, что измерение температуры ННТ обмотки производится косвенно с использованием в вычислительном блоке устройства алгоритма, в основе которого лежит математическая тепловая модель силового трансформатора. Имеющиеся отечественные разработки подобных устройств [5] также не нашли широкого применения из-за их низкой надежности.

В данной статье рассмотрено разработанное авторами усовершенствованное устройство для тепловой защиты силовых масляных трансформаторов.

2. Функциональная схема устройства

Для разработки функциональной схемы предлагаемого устройства авторам данной статьи потребовалось провести ряд физико-математических исследований тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах [6]. В частности, была рассмотрена математическая модель масляных трансформаторов, принятая в ГОСТ 14209-85 и МЭК 354. Оказалось, что разработчики этих нормативных документов для вывода расчетных соотношений существенно упростили более общую математическую модель, где масляный трансформатор рассматривается как система из трех однородных тел: обмотки, масла и магнитопровода [4]. Такая модель описывается сис-

темой из трех дифференциальных уравнений, решением которой являются временные зависимости температур обмотки, масла и магнитопровода. Каждая из полученных зависимостей представляет собой сумму из трех экспоненциальных составляющих.

Расчетные соотношения для температуры ННТ обмотки и масла выглядят следующим образом [6]:

$$\begin{cases} \theta_{ннт}(t) = \sum_{k=1}^3 \left[K_n^2 \cdot \vartheta_{ннт.к} + (\vartheta_{ннт.н.к} - K_n^2 \cdot \vartheta_{ннт.к}) \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_k}\right) \right] + \vartheta_{xx.ннт} + \theta_{охл}(t); \\ \theta_M(t) = \sum_{k=1}^3 \left[K_n^2 \cdot \vartheta_{M.к} + (\vartheta_{M.н.к} - K_n^2 \cdot \vartheta_{M.к}) \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_k}\right) \right] + \vartheta_{xx.M} + \theta_{охл}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_{ннт}(t)$, $\theta_M(t)$ – временные зависимости, соответственно, температуры ННТ обмотки и температуры масла; k – номер экспоненциальной составляющей;

$K_n = \frac{S}{S_{ном}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора; S – текущая мощность нагрузки

трансформатора; $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора; $\vartheta_{xx.ннт}$, $\vartheta_{xx.M}$ – соответственно, превышения температур ННТ обмотки и масла над температурой охлаждающей среды трансформатора на холостом ходу; $\vartheta_{ннт.н.к}$, $\vartheta_{M.н.к}$ – соответственно, начальные значения экспоненциальных составляющих температур ННТ обмотки и масла; $\vartheta_{ннт.к}$, $\vartheta_{M.к}$ – соответственно, установившиеся значения экспоненциальных составляющих температур ННТ обмотки и масла трансформатора при номинальной нагрузке; τ_k – тепловые постоянные времени; $\theta_{охл}(t)$ – временная зависимость температуры охлаждающей среды.

Величины $\vartheta_{xx.ннт}$, $\vartheta_{xx.M}$, $\vartheta_{ннт.к}$, $\vartheta_{M.к}$, τ_k – рассчитаны, исходя из паспортных данных трансформатора [6].

Функциональная схема предлагаемого устройства разработана на основе соотношений (1) и изображена на рис. 1.

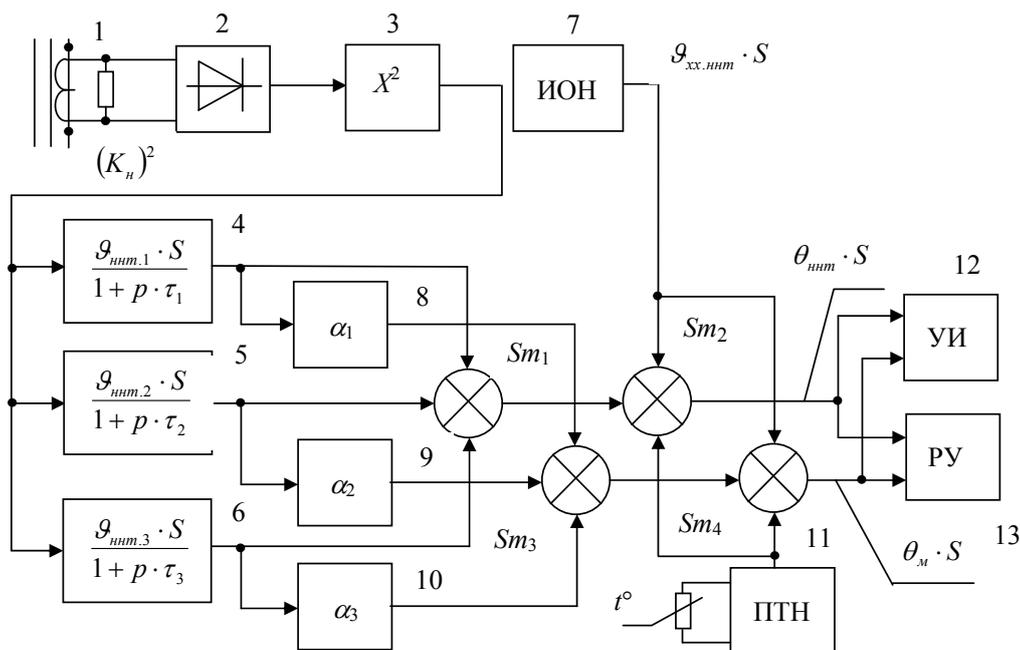


Рис. 1. Функциональная схема устройства тепловой защиты силовых масляных трансформаторов

Данная функциональная схема представляет собой измерительный модуль с функциональными преобразователями, работающими в соответствии с соотношениями (1). Рассмотрим принцип работы схемы.

Напряжение с выхода датчика тока нагрузки 1, пропорциональное току нагрузки силового трансформатора, через выпрямитель 2 подается на квадрататор 3. Напряжение на выходе квадрататора пропорционально квадрату коэффициента нагрузки силового трансформатора K_n^2 . Полученный сигнал подается на входы инерционных реально-интегрирующих звеньев 4-6, каждое из которых имеет следующую передаточную функцию:

$$W_k(p) = \frac{g_{инт.к} \cdot S}{1 + p \cdot \tau_k},$$

где S – эквивалентная крутизна системы (В/°С).

Как известно, реакцией реально-интегрирующего звена на скачкообразное изменение входного сигнала является экспонента. Так как реальная нагрузка трансформатора меняется скачкообразно, то звенья 4-6 реализуют экспоненциальные составляющие в соотношениях (1).

Далее, в соответствии с соотношениями (1), сигналы с выходов инерционных звеньев 4-6 складываются на сумматоре Sm_1 . Затем на сумматоре Sm_2 к полученному результату прибавляется напряжение, пропорциональное величине $g_{хх.ннт}$, сформированное с помощью источника опорного напряжения (ИОН) 7; а также прибавляется напряжение, пропорциональное температуре охлаждающей среды $\theta_{охл}(t)$. Температура охлаждающей среды измеряется с помощью датчика, выполненного на основе терморезистора и преобразователя температура – напряжение (ПТН) 11.

После этого сигнал с выхода сумматора Sm_2 , пропорциональный температуре $\theta_{ннт}(t)$, поступает на устройство индикации (УИ) 12, отображающее текущие значения температур, и на релейное устройство 13, включающее компаратор и реле, и срабатывающее при достижении температур ННТ обмотки и масла критических значений. Таким образом устройство определяет температуру ННТ обмотки трансформатора.

Температура ННТ масла $\theta_m(t)$ определяется аналогично на сумматорах Sm_3 и Sm_4 , только сигналы с выходов инерционных звеньев 4-6 снимаются через масштабные усилители 8-10 с коэффициентами передачи, соответственно, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, которые равны:

$$\alpha_1 = \frac{g_{м.1}}{g_{инт.1}}; \alpha_2 = \frac{g_{м.2}}{g_{инт.2}}; \alpha_3 = \frac{g_{м.3}}{g_{инт.3}}.$$

Кроме того, при определении $\theta_m(t)$, учитывается, что [6]:

$$g_{хх.ннт} = g_{хх.м}.$$

3. Принцип работы реально-интегрирующих звеньев с большими постоянными времени

Главными элементами рассмотренной функциональной схемы рис. 1 являются реально-интегрирующие звенья 4-6. Их работа включает в себе ряд особенностей, так как тепловые постоянные времени трансформаторов τ_k – величины достаточно большие [6]. Для трансформаторов ТМ250 – ТМ2500 минимальные их значения (τ_1) находятся в пределах восьми минут, а максимальные (τ_3) – могут достигать четырех часов и более.

Для реализации инерционного звена с большой постоянной времени была разработана функциональная схема, изображенная на рис. 2.

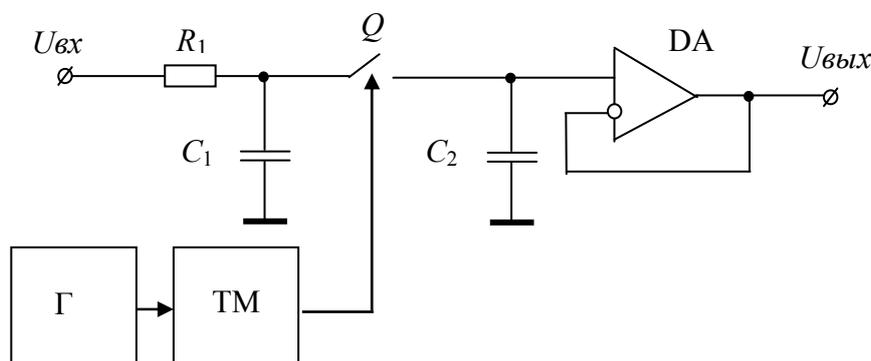


Рис. 2. Функциональная схема инерционного звена с большой постоянной времени

Инерционное звено с большой постоянной времени работает подобно устройству выборки – хранения. В момент выборки электронный ключ Q замкнут, и, поскольку в данной схеме емкость конденсатора C_1 намного меньше емкости C_2 , то конденсатор C_2 заряжается по экспоненте с постоянной времени τ , равной:

$$\tau = R_1 \cdot C_2.$$

Процесс выборки протекает в течение времени T . Затем ключ Q размыкается и схема переходит в режим хранения. Напряжение хранится на конденсаторе C_2 в течение времени хранения t_x , которое в N раз больше времени выборки:

$$t_x = N \cdot T.$$

При очередном замыкании ключа Q процесс заряда или разряда конденсатора C_2 должен начаться с того же значения, что и закончился в предыдущий момент выборки и протекать также по экспоненте. Для достижения данного условия в схему введен конденсатор C_1 , емкость которого намного меньше емкости C_2 . Конденсатор C_1 – это своеобразный демпфер переходного процесса в момент выборки. При коммутации напряжений, имеющих на C_1 и C_2 , выполняется принцип емкостного делителя, и результирующее напряжение фактически мгновенно становится равным напряжению, хранившемуся на C_2 , поскольку его емкость намного больше.

Ключом Q управляют генератор импульсов ГИ, частота которого равна:

$$f_2 = \frac{1}{T}.$$

С генератора частота поступает на таймер ТМ, представляющий собой двоичный счетчик с импульсным выходом переполнения, с которого снимается управляющий сигнал для ключа Кл. Причем N – это число импульсов, подсчитанное счетчиком.

Таким образом реализуется «растяжка» экспоненты во времени. Полученный ступенчатый сигнал можно заменить экспонентой, соединив точки в моменты начала выборки. Погрешность от такой замены мала, так как t_x намного больше T . Постоянная времени полученной «растянутой» экспоненты будет равна:

$$\tau_p = N \cdot \tau = N \cdot R_1 \cdot C_2.$$

При $N = 512$ легко получить $\tau_p = 4$ часа.

Выходной сигнал снимается с повторителя ДА, который имеет высокое входное сопротивление. Погрешность работы схемы не превышает 5 %.

4. Выводы

6. Разработанное устройство по сравнению с приборами-аналогами имеет такие преимущества, как низкая стоимость (не более 100 у.е.), максимальная безопасность эксплуатации, расширенные функциональные возможности.
7. Функциональная схема рис. 1 универсальна, и на ее основе может быть создано программное обеспечение при реализации рассмотренного устройства на микроЭВМ.
8. Внедрение данного устройства в эксплуатацию позволит максимально эффективно использовать по мощности силовые масляные трансформаторы и защищать их от недопустимых аварийных перегрузок.
9. Разработанное устройство может быть использовано при контроле теплового износа изоляции трансформаторов.

Литература

1. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
2. IEC loading guide for oil immersed power transformers. IEC Revision of Publication 354, draft 2, 1991.
3. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции: Переводы докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) /Под ред. С.Д. Лизунова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. А. с. 1785583 СССР, МКИ H02H7/04. Устройство для защиты силового трансформатора от перегрузки /Я. К. Розенкрон. – Опубл. в Б. И., № 48, 1992.
6. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 КВ //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3-4.

Получено 11.10.2002 г.