

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕНОРМАЛЬНОГО НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

О.Г. ШИРОКОВ, Д.И. ЗАЛИЗНЫЙ, Д.М. ЛОСЬ

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

1. Причины возникновения и способы обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора

В процессе эксплуатации силового масляного трансформатора (СМТ) возможна ситуация возникновения режима ненормального нагрева.

Под *ненормальным нагревом* трансформатора будем подразумевать более высокие значения температур его частей по сравнению с температурами, которые имели бы место в полностью исправном трансформаторе с полностью исправной системой охлаждения.

Наиболее распространенными причинами появления ненормального нагрева трансформатора являются неисправности в его устройствах охлаждения. Для трансформаторов систем охлаждения Д и ДЦ такие неисправности, как правило, обусловлены загрязнением трубок охлаждающего калорифера из-за втягивания воздуха работающими вентиляторами или засорением масляных фильтров. Это приводит к снижению эффективности охлаждения трансформатора и его дополнительному нагреву.

Помимо неисправностей в устройствах охлаждения, ненормальный нагрев трансформатора может быть вызван его внутренними повреждениями, а именно [1, с. 14]: образованием короткозамкнутого контура, увеличением переходного сопротивления в контактных соединениях, уменьшением сечения масляных каналов из-за разбухания изоляции, попадания в канал постороннего предмета и т. п. Во всех случаях длительная работа трансформатора с повышенной температурой масла недопустима.

Режим ненормального нагрева является потенциально опасным для работы трансформатора. Как указано в ПТЭ и ПТБ [2, с. 47]: «Вывод трансформатора из работы необходим при обнаружении ненормального и постоянно возрастающего нагрева трансформатора при нормальных нагрузке и охлаждении». Поэтому в литературе по эксплуатации силовых трансформаторов дается ряд рекомендаций обслуживающему персоналу для выявления ненормального повышения температуры масла. Например, в [3, с. 248] сказано, что: «При повышении температуры масла трансформатора вне связи с его перегрузкой оперативный персонал должен попытаться выяснить причину перегрева, в частности, связь ее с возможным повышением температуры охлаждающей среды или с неисправностью устройства охлаждения. Целесообразно также уточнить достоверность показаний термосигнализатора. При неисправности какого-либо элемента устройства охлаждения следует принять срочные меры по подключению резервных охлаждающих устройств (при их наличии) и ускорить ликвидацию дефекта, а при необходимости – разгрузить тем или иным путем перегревшийся трансформатор». Аналогичные рекомендации имеются в [4, с. 70].

Таким образом, методика выявления ненормального нагрева силового трансформатора на сегодняшний день существует только в виде рекомендаций для оперативного персонала, где решение нужно принимать субъективно в условиях многофакторной задачи. Это может привести к неверным действиям со стороны персонала и вызвать аварийную ситуацию. Кроме того, имеется большое количество трансформаторов,

находящихся в эксплуатации без постоянного контроля со стороны оперативного персонала. Следовательно, необходима разработка *автоматической* системы, позволяющей выявлять ненормальные нагревы трансформатора.

2. Обоснование необходимости применения защиты силового трансформатора от ненормального нагрева в совокупности с другими видами защит

В качестве защиты СМТ от повреждений применяют токовую отсечку, дифференциальную и газовую защиты [5, с. 544]. Первые два вида защит реагируют на недопустимые изменения токов трансформатора, вызванные внутренними короткими замыканиями в нем. Газовая защита контролирует концентрацию летучих газов в трансформаторе, обусловленных разложением масла и других изоляционных материалов, а также скорость циркуляции масла [5, с. 607].

Рассмотрим ситуацию медленно развивающегося внутреннего повреждения, приводящего к ненормальному нагреву трансформатора с возрастанием температуры масла и токов в обмотках порядка 1 % в сутки. В данном случае токовая отсечка среагирует только при достижении недопустимого значения тока на питающей стороне трансформатора, составляющего приблизительно 130 % от максимального тока короткого замыкания на стороне нагрузки [5, с. 569]. Поэтому при медленно развивающемся повреждении действие отсечки возможно через достаточно длительный промежуток времени (более суток).

Дифференциальная защита имеет отстройку от токов небаланса, обусловленных допустимым изменением коэффициента трансформации СМТ (а также другими факторами). Причем у трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) величина такого изменения коэффициента трансформации может достигать 16 % [5, с. 578]. Поэтому в случае рассматриваемой ситуации медленного развития внутренних повреждений СМТ, величина нарастающего тока в какой-либо из обмоток более суток может находиться в зоне отстройки дифференциальной защиты.

Газовая защита реагирует на интенсивное газовыделение в трансформаторе, вызванное высокой скоростью развития повреждения (например, горением дуги между витками обмотки). При небольших повреждениях образование газа в СМТ происходит медленно, и газовое реле включит сигнальные контакты, когда давление газа в нем достигнет критической отметки [5, с. 609].

Таким образом, рассмотренные виды защит СМТ имеют низкую чувствительность к медленно развивающимся внутренним повреждениям СМТ.

В случае развития неисправности в системе охлаждения СМТ токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты вообще не среагируют, так как подобный вид неисправностей не входит в их зону действия.

Следовательно, *ни одна из существующих защит (тепловых защит и традиционных защит от повреждений) не позволяет выявлять режим ненормального нагрева СМТ и осуществлять защиту СМТ от этого режима.*

3. Выявление ненормального нагрева трансформатора с помощью математической тепловой модели

Температура верхних слоев масла трансформатора с точностью до 2 °С может быть определена косвенным путем на основе адаптивной математической модели тепловых процессов СМТ, рассмотренной в [6]. Соотношение для расчета температуры масла в операторном виде можно записать следующим образом:

$$\theta_M(p) = \mathcal{G}_{XX} + W_1(p)(K_H(p))^2 + W_2(p)\theta_{OХЛ}(p), \quad (1)$$

где \mathcal{G}_{XX} – составляющая температуры масла от потерь холостого хода трансформатора; $K_H(p)$ – операторное изображение коэффициента нагрузки трансформатора; $\theta_{OХЛ}(p)$ –

операторное изображение температуры охлаждающей среды; $W_1(p)$ и $W_2(p)$ – передаточные функции, равные:

$$W_1(p) = \frac{k_1 p + k_0}{H(p)}, \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{k_3 p^2 + k_2 p + 1}{H(p)}, \quad (3)$$

$$H(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1, \quad (4)$$

где $k_0 - k_3$ – коэффициенты передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$; $a_1 - a_3$ – коэффициенты характеристического уравнения $H(p)$.

Мгновенное значение коэффициента нагрузки во временной области рассчитывается по формуле:

$$K_H(t) = \frac{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (5)$$

где $P(t)$ и $Q(t)$ – соответственно мгновенные значения активной и реактивной мощности нагрузки трансформатора; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора.

Величина \mathcal{G}_{XX} , а также коэффициенты передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$ изначально рассчитываются по паспортным данным трансформатора [7]. Затем, в течение периода адаптации, составляющего от 48 до 216 часов (в зависимости от типа охлаждения трансформатора), параметры математической модели корректируются с помощью алгоритма параметрической идентификации [6]. При этом адаптация модели должна проводиться на работающем трансформаторе с заведомо исправной системой охлаждения. По окончании периода адаптации математическая модель может быть использована для контроля температуры масла.

Пусть $\mathcal{G}_M(t)$ – превышение измеренной температуры масла трансформатора над расчетной. Тогда:

$$\mathcal{G}_M(t) = \theta_{\text{МТ}}(t) - \theta_M(t) - |\Delta\theta_M|, \quad (6)$$

где $\theta_{\text{МТ}}(t)$ – температура масла, измеренная непосредственно на трансформаторе;

$\theta_M(t)$ – расчетная температура масла, полученная по соотношению (1);

$\Delta\theta_M$ – максимальная абсолютная погрешность расчета температуры масла по тепловой модели, составляющая ± 2 °С [6].

Режим ненормального нагрева трансформатора будет иметь место в течение промежутка времени, на котором выполняется условие:

$$\mathcal{G}_M(t) > 0 \text{ °С}. \quad (7)$$

Таким образом, для выявления ненормального нагрева силового трансформатора необходимо осуществлять двойной контроль температуры масла – непосредственный и косвенный.

4 Структурная схема и принцип работы автоматической системы для обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора

Для реализации методики автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора необходим аппаратный комплекс, структурная схема которого приведена на рисунке.

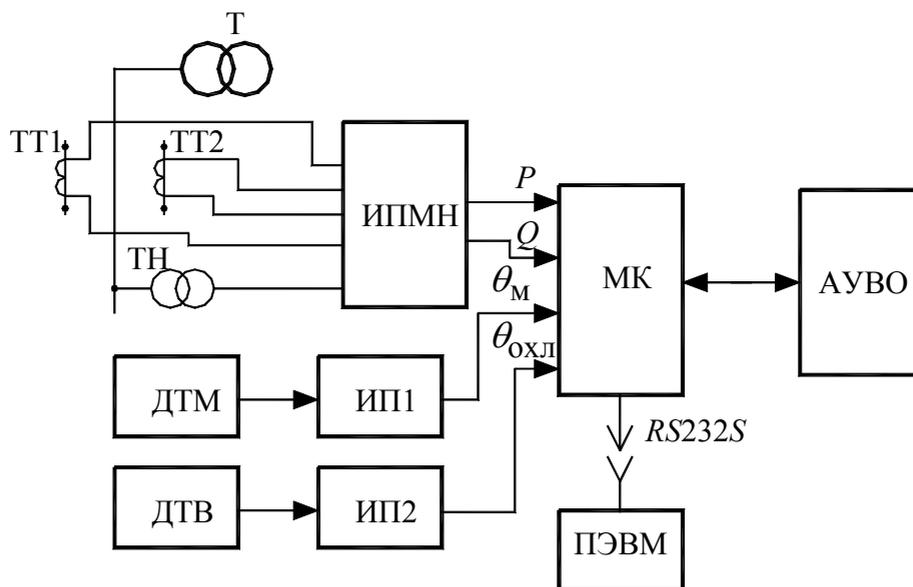


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора: ИПМН – измерительный преобразователь мощности нагрузки; ДТМ – датчик температуры масла; ДТВ – датчик температуры воздуха; ИП1, ИП2 – измерительные преобразователи; МК – микроконтроллер; АУВО – автоматика управления вентиляторами охлаждения

Основным узлом системы является микроконтроллер МК, который представляет собой устройство сбора данных, а также может выполнять функции управления системой охлаждения трансформатора. Микроконтроллер должен иметь встроенный АЦП (минимум четыре аналоговых канала) и дуплексную связь с ПЭВМ по интерфейсу RS232S.

В процессе работы мощность нагрузки силового трансформатора Т измеряется с помощью измерительных трансформаторов тока ТТ1 и ТТ2, трехфазного измерительного трансформатора напряжения ТН и измерительного преобразователя мощности нагрузки ИПМН (типа Е849/9-М1). На аналоговые входы микроконтроллера поступают два сигнала, пропорциональные активной мощности нагрузки $P(t)$ и реактивной $Q(t)$.

Температура верхних слоев масла трансформатора $\theta_{MT}(t)$, а также температура воздуха $\theta_{OxL}(t)$ измеряются с помощью датчиков температуры масла ДТМ и температуры воздуха ДТВ, выполненных на основе термометров сопротивления (типа ТСМ или ТСР). Сигналы, пропорциональные величинам $\theta_{MT}(t)$ и $\theta_{OxL}(t)$, с измерительных преобразователей ИП1 и ИП2 поступают на аналоговые входы микроконтроллера.

Измеренные величины передаются микроконтроллером в ПЭВМ, где реализуется алгоритм адаптации математической модели и происходит расчет температуры масла в соответствии с соотношениями (1)–(6). ПЭВМ анализирует условие выполнения соотношения (7). Если условие выполняется, то ПЭВМ выдает сигнал о наличии режима ненормального нагрева трансформатора.

Для трансформаторов с системами охлаждения типа «Д» и «ДЦ» микроконтроллер необходимо связать с автоматикой управления вентиляторами охлаждения АУВО. При этом, в ПЭВМ должна поступать информация о номерах работающих вентиляторов. В случае обнаружения режима ненормального нагрева трансформатора ПЭВМ анализирует возможную неисправность на основе данных о времени работы вентиляторов.

Выводы

Предложенная методика обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора и необходимый для нее аппаратный комплекс могут быть использованы как автономно, так и в качестве элемента системы комплексной диагностики трансформатора. Применение данной методики позволит повысить эксплуатационную надежность силовых трансформаторов.

Литература

1. Голоднов, Ю.М. Контроль за состоянием трансформаторов /Ю.М. Голоднов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 141 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 424 с.
3. Цирель, Я.А. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях /Я.А. Цирель, В.С. Поляков. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1985. – 264 с.
4. Могузов, В.Ф. Обслуживание силовых трансформаторов /В.Ф. Могузов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 218 с.
5. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов /Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
6. Широков, О.Г. Методика выявления повреждений в силовых трансформаторах с использованием косвенного контроля температуры масла /О.Г. Широков, Д.И. Зализный //Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: сб. материалов МНТК, 15-16 мая 2003 г. – Могилев: МГТУ, 2003. – С. 556-557.
7. Зализный, Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ /Д.И. Зализный. – //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3–4. – С. 51-60.

Получено 09.07.2004 г.