

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО ТЕПЛОВЫМ ПАРАМЕТРАМ

Кандидаты техн. наук, доценты ЗАЛИЗНЫЙ Д. И., ШИРОКОВ О. Г.

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого*

Из-за продолжающегося старения трансформаторного парка актуальность применения современных систем диагностики силовых трансформаторов в Республике Беларусь возрастает. К сожалению, отечественная промышленность практически не выпускает подобные системы, и предприятия вынуждены закупать их за рубежом, затрачивая значительные средства.

Системы диагностики силовых трансформаторов без отключения от сети, предлагаемые зарубежными производителями, такими как АВВ [1], характеризуются значительным количеством цепей для измерения токов, напряжений, температур, влажности, химического состава масла, параметров устройств охлаждения, параметров РПН и др. В результате аппаратная часть этих систем имеет высокую стоимость, не говоря о стоимости программного обеспечения.

В данной статье рассматривается разработанный авторами аппаратно-программный комплекс, позволяющий при минимальных аппаратных затратах на ранней стадии выявлять неисправности, медленно развивающиеся в трансформаторе и приводящие к его дополнительному, аномальному нагреву [2].

Функциональная схема аппаратной части предлагаемой системы диагностирования [3] приведена на рис. 1.

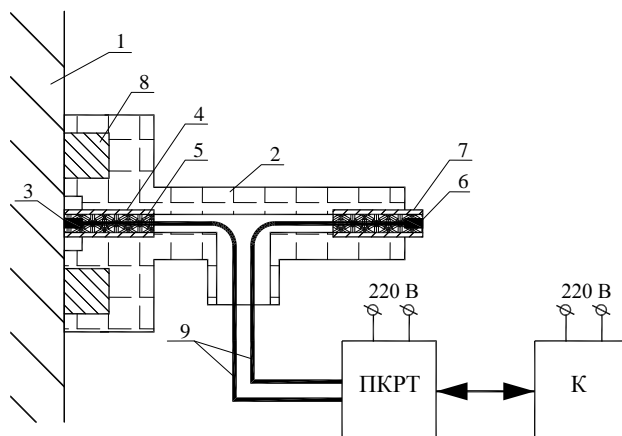


Рис. 1. Функциональная схема системы диагностирования силового масляного трансформатора по тепловым параметрам

Система состоит из прибора контроля и расчета температур силового трансформатора (ПКРТ), компьютера (К) и двух датчиков температуры, расположенных в одном корпусе.

Прибор ПКРТ имеет два канала измерения температуры: поверхность бака и воздух. Датчики температуры расположены в специальной кон-

струкции, монтируемой на поверхности бака трансформатора 1. Эта конструкция состоит из пластмассового корпуса 2, в котором сделаны отверстия для размещения датчиков. Датчик температуры поверхности бака 3 расположен в полой металлическом цилиндре 4, заполненном теплоизоляционным материалом 5. Металлический цилиндр закреплен в пластмассовом корпусе 2. Датчик температуры воздуха 6 расположен в аналогичном металлическом цилиндре 7. Для крепления конструкции к поверхности бака предусмотрен постоянный магнит 8. Датчики температуры подключаются к прибору ПКРТ посредством экранированных кабелей 9. Основная задача всей конструкции – обеспечить хороший тепловой контакт датчика 3 с поверхностью бака трансформатора и поместить датчик 6 в те же условия, в которых находится поверхность бака по отношению к окружающей среде.

Внешний вид всех предлагаемых устройств приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид аппаратной части системы диагностирования силового масляного трансформатора по тепловым параметрам

Действующие макеты прибора ПКРТ и датчиков температуры собраны на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого, а в качестве компьютера можно, например, использовать промышленный компьютер фирмы Advantech.

Прибор ПКРТ реализован на основе восьмиразрядного микроконтроллера фирмы Atmel AT90S8535 и оснащен жидкокристаллическим дисплеем, двумя кнопками, сигнальными светодиодами и разъемами для подключения датчиков температуры и компьютера. Связь с компьютером осуществляется по интерфейсу RS232.

В целом работа системы реализуется следующим образом. Прибор ПКРТ с помощью соответствующих датчиков температуры каждые 10 минут (значение периода дискретизации обосновано в [4]) измеряет температуры поверхности бака трансформатора и воздуха, передавая их значения в компьютер и отображая на своем дисплее. Программное обеспечение компьютера с помощью алгоритмов, о которых будет сказано ниже, рассчиты-

вает значения коэффициента нагрузки трансформатора, температуры его масла, обмоток и магнитопровода по отношению к высоте, на которой расположен датчик температуры поверхности его бака, а также диагностирует трансформатор на аномальный нагрев. Результаты расчетов компьютер передает обратно в прибор ПКРТ, который отображает необходимые значения и сообщения на дисплее. На лицевой панели прибора ПКРТ имеются сигнальные светодиоды «Перегрев масла», «Перегрев обмоток», «Связь с компьютером» и др.

Очевидно, что основной функциональной частью предлагаемой системы диагностирования являются расчетные алгоритмы и соответственно математический аппарат, на котором они базируются. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В [4] предложены математическая модель и алгоритмы, полностью соответствующие требованиям для предлагаемой системы диагностирования, но не прошедшие экспериментальной апробации. Для проверки их адекватности и возможной корректировки авторами данной статьи с помощью разработанных датчиков и прибора ПКРТ проведены экспериментальные исследования на автотрансформаторе АДЦТН 63000/220/110/6. В процессе исследований измеряемые температуры записывали во встроенную flash-память прибора ПКРТ. Также дежурными по подстанции несколько раз в сутки производилась запись значений температуры верхних слоев масла автотрансформатора со штатного термометра. После этого работу алгоритмов анализировали на компьютере.

Было проведено несколько экспериментов. В первом случае датчики устанавливали в верхней части бака на солнечной стороне вблизи от охладителей автотрансформатора.

Исследования показали плохую работоспособность алгоритмов, приведенных в [4]. Расчетный коэффициент нагрузки трансформатора претерпевал значительные колебания как в положительную, так и в отрицательную сторону, делая все дальнейшие вычисления некорректными.

Было предложено фильтровать расчетный коэффициент нагрузки через программное аperiodическое звено первого порядка с постоянной времени, в семь раз превышающей период дискретизации. Алгоритм фильтрации записывается следующим образом:

$$K_{н.фл.j}^2 = \frac{K_{н.j}^2 + \frac{7}{T_d} K_{н.фл.j-1}^2}{1 + \frac{7}{T_d}}, \quad (1)$$

где  $K_{н.фл.j}$  – расчетный коэффициент нагрузки после фильтрации;  $j$  – номер интервала расчета;  $K_{н.j}$  – расчетный коэффициент нагрузки до фильтрации;  $T_d$  – период дискретизации.

После применения алгоритма (1) величины  $K_{н.фл.j}^2$  не превысили 0,5, но наблюдались их отрицательные значения, что некорректно для расчета температур. Поэтому первый эксперимент был признан неудачным. Очевидно, здесь значительное влияние на датчик температуры оказало прямое солнечное излучение, а также сказалась близость охладителей.

Во втором эксперименте датчики температуры были установлены в верхней части бака на теневой стороне автотрансформатора на максимальном расстоянии от охладителей.

Значения температур воздуха, поверхности бака, масла исследуемого автотрансформатора во втором эксперименте и результаты расчетов температуры масла по алгоритмам, приведенным в [4] с учетом (1), показаны на рис. 3.

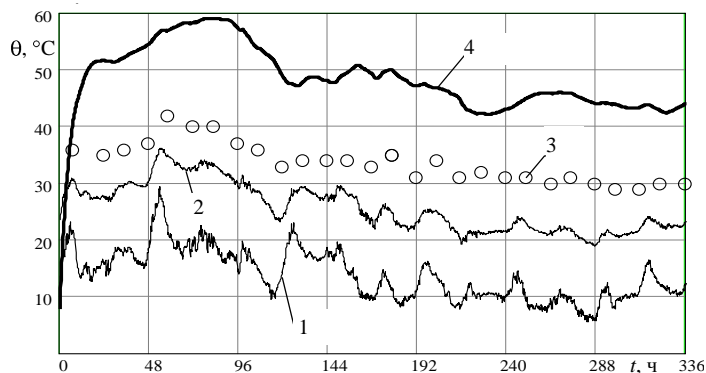


Рис. 3. Экспериментальные и расчетная диаграммы для автотрансформатора АДЦТН 63000/220/110/6: 1, 2, 3 – измеренные температуры воздуха, поверхности бака и масла; 4 – расчетная температура масла

В процессе расчетов отрицательных значений  $K_{н.ф.л.ж}^2$  не наблюдалось. Как видно из рис. 3, отклонения расчетных температур масла от экспериментальных велики. Максимальная абсолютная погрешность расчета температуры масла по отношению к эксперименту составила  $13,2\text{ }^\circ\text{C}$ , что недопустимо. Коэффициент корреляции равен  $0,83$ , что свидетельствует об определенной близости расчетных и экспериментальных значений в динамике.

По мнению авторов данной статьи, основной причиной высокой погрешности расчета является реальная зависимость коэффициентов теплоотдачи с масла в воздух от температуры. То есть тепловое сопротивление  $R_4$  в тепловой схеме замещения трансформатора [4] должно быть нелинейным, как показано на рис. 4.

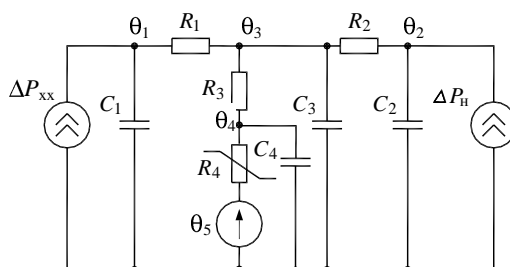


Рис. 4. Электрическая тепловая схема замещения силового масляного трансформатора

На рис. 4 обозначены [4]:  $C_1 - C_4$  – соответственно теплоемкости магнитопровода, обмотки, масла и внутренней окружающей среды;  $R_1 - R_4$  – тепловые сопротивления магнитопровода, обмотки, масла и внутренней

окружающей среды;  $\theta_1 - \theta_5$  – температуры магнитопровода, обмотки, масла, внутренней окружающей среды (слоя воздуха, температура которого зависит от температуры поверхности бака) и внешней окружающей среды (воздуха);  $\Delta P_{xx}$  – активная мощность потерь холостого хода трансформатора;  $\Delta P_n$  – активная мощность нагрузочных потерь трансформатора.

Тепловые сопротивления (кроме  $R_4$ ) можно рассчитать в соответствии с [5] и ГОСТ 14209–85:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{\vartheta_{c.m}}{\Delta P_{xx}}; \\ R_2 = \frac{\vartheta_{ннт.м}}{\Delta P_{к.ном}}; \\ R_3 = \frac{\vartheta_m}{\Delta P_{xx} + \Delta P_{к.ном}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\vartheta_{c.m}$  – номинальное превышение температуры магнитопровода над температурой масла ( $\vartheta_{c.m} = 25$  °С);  $\vartheta_{ннт.м}$  – номинальное превышение температуры наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора над температурой масла ( $\vartheta_{ннт.м} = 23$  °С);  $\vartheta_m$  – номинальное превышение температуры масла над температурой окружающей среды ( $\vartheta_m = 55$  °С для трансформаторов с системами охлаждения М и Д;  $\vartheta_m = 40$  °С для трансформаторов с системами охлаждения ДЦ и Ц).

Теплоемкости можно найти по формуле

$$C_i = c_{уд.i} G_i, \quad i \in [1; 4], \quad (3)$$

где  $c_{уд.i}$  – удельная теплоемкость  $i$ -го однородного тела, Вт·с/(°С·кг);  $G_i$  – масса  $i$ -го однородного тела, кг.

Тепловое сопротивление  $R_4$  определим следующим образом:

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_{м.к} + \alpha_{б.к} + \alpha_{б.и} S}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{м.к}$ ,  $\alpha_{б.к}$ ,  $\alpha_{б.и}$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно с масла конвекцией, с поверхности бака конвекцией, с поверхности бака излучением, Вт/(°С·м<sup>2</sup>);  $S$  – площадь поверхности бака трансформатора, м<sup>2</sup>.

Пренебрегая перепадом температуры по толщине стенки бака трансформатора, величины  $\alpha_{м.к}$ ,  $\alpha_{б.к}$ ,  $\alpha_{б.и}$  определим по эмпирическим формулам в соответствии с [6, с. 383–385]:

$$\alpha_{м.к} = 38 \cdot \theta_4 - \theta_5^{0,25} \left( \frac{\theta_4}{50} \right)^{0,5}; \quad (5)$$

$$\alpha_{б.к} = 2,5 \cdot \theta_4 - \theta_5^{0,25} \left( \frac{293}{273 + \theta_4} \right)^{0,25}; \quad (6)$$

$$\alpha_{6,и} = 2,85 \cdot \theta_4 - \theta_5^{0,19} \cdot 0,95 \left( 1 + \frac{1,1\theta_5}{100} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

Таким образом, тепловое сопротивление  $R_4$  – это функция температуры поверхности бака  $\theta_4$  и температуры воздуха  $\theta_5$ . Наличие нелинейного сопротивления  $R_4$  несколько усложняет вывод расчетных соотношений. Поэтому будем использовать пошаговый расчет, считая  $R_4$  линейным, не зависящим от температуры на временном интервале каждого шага. Тогда, учитывая, что  $\Delta P_{xx} \approx \text{const}$ , для первого шага расчета на временном интервале от 0 до периода дискретизации  $T_d$  и нулевых начальных условиях операторное изображение температуры поверхности бака  $\theta_{4,1} p$  запишется в следующем виде [4]:

$$\theta_{4,1} p = \Delta P_{xx} R_4 + \frac{b_1 p + b_0 \frac{K_{н,1}^2}{p} + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + 1 \frac{\theta_{5,1}}{p}}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (8)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $d$  – коэффициенты, зависящие от тепловых сопротивлений и теплоемкостей [4];  $K_{н,1}$  – значение коэффициента нагрузки трансформатора для первого шага расчета, которое считаем неизменным;  $\theta_{5,1}$  – значение температуры воздуха для первого шага расчета, которое также считаем неизменным.

Очевидно, что если учесть начальные условия, то соотношение (8) будет справедливо и для каждого  $j$ -го шага расчета при соответствующих значениях  $K_{н,j}$ ,  $\theta_{5,j}$  и перерасчете теплового сопротивления  $R_4$  по формулам (4)–(7).

Найдя оригинал для выражения (8), далее можно воспользоваться всеми алгоритмами, приведенными в [4]. При этом формулы (2), (3) достаточно будет применить только вначале расчета. Остальные расчеты необходимо вести циклически, начиная с (4)–(7) и далее по всем этапам алгоритмов, рассмотренных в [4], с учетом (1).

Экспериментальные диаграммы температур воздуха, поверхности бака и масла, а также расчетные диаграммы температур масла, обмотки и магнитопровода с учетом нелинейности теплового сопротивления  $R_4$  приведены на рис. 5. Диаграмма расчетного эквивалентного квадрата коэффициента нагрузки показана на рис. 6. Эти значения были использованы для расчетных диаграмм на рис. 5.

Максимальная абсолютная погрешность расчета температуры масла по отношению к экспериментальным данным составила  $5,3^\circ\text{C}$ , а коэффициент корреляции между расчетными и измеренными значениями этой температуры равен  $0,94$ , что свидетельствует о хорошей адекватности математической модели. Расчетные значения температур масла, обмоток и магнитопровода можно использовать для защиты трансформатора от перегрева [3]. В случае задач диагностирования необходимы более подробный анализ и дополнительные алгоритмы. Рассмотрим возможные варианты.

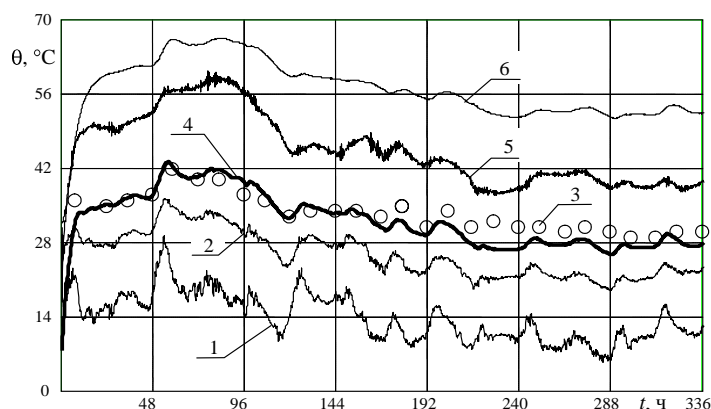


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные диаграммы температур автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110: 1, 2, 3 – экспериментальные диаграммы температуры воздуха, поверхности бака и масла; 4, 5, 6 – расчетные диаграммы температуры масла, обмотки и магнитопровода

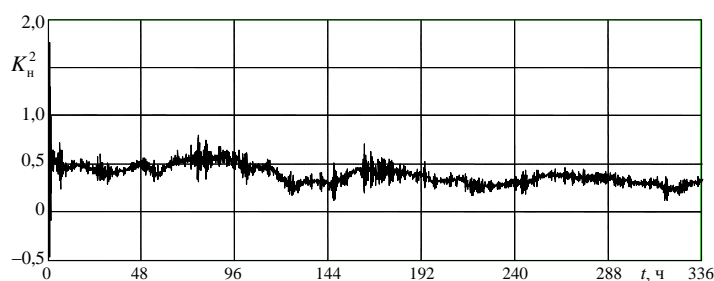


Рис. 6. Диаграмма расчетного квадрата коэффициента нагрузки

При медленном развитии неисправностей в трансформаторе, например разбухании изоляции с перекрытием масляных каналов или увеличении диэлектрических потерь трансформаторного масла, возникает его общий аномальный нагрев [2]. Очевидно, что температура поверхности бака, подвергаемая измерению в предлагаемой системе диагностирования, также возрастет, что, в свою очередь, приведет к возрастанию расчетного коэффициента нагрузки и всех остальных расчетных температур.

В качестве диагностических параметров выберем средние значения расчетных температур за некоторые равные интервалы времени. Эти интервалы должны превышать величину максимальной из тепловых постоянных времени трансформатора, чтобы аномальный нагрев успел проявиться на фоне естественных нестационарных тепловых процессов. Примем длительность расчетных интервалов равной 24 ч. Тогда, например для температуры обмоток, диагностический параметр необходимо рассчитывать по формуле

$$\theta_{2, \text{диаг.} i} = \frac{T_d \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{2, i, j}}{T_{\text{диаг}}} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \theta_{2, i, j}}{N_{\text{диаг}}}, \quad (9)$$

где  $\theta_{2, \text{диаг.} i}$  – значение диагностической температуры обмоток;  $j$  – номер расчетного интервала, соответствующий периоду дискретизации [4];  $T_d$  – период дискретизации (10 мин);  $i$  – номер расчетного интервала диаг-

ностирования;  $T_{\text{диаг}}$  – расчетный интервал времени для диагностирования (24 ч);  $N_{\text{диаг}}$  – количество отсчетов температуры за расчетный интервал времени для диагностирования.

Диаграмма расчетных значений  $\theta_{2,\text{диаг},i}$ , полученных на основе диаграммы температуры обмоток, приведенной на рис. 5, за последние 11 суток для исключения ошибки начальных условий, которая наблюдалась в течение первых трех суток расчета, показана на рис. 7.

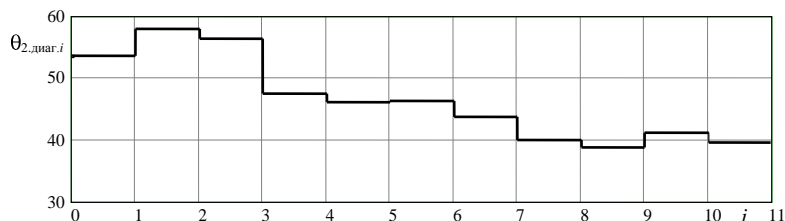


Рис. 7. Диаграмма расчетных значений диагностической температуры обмоток автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110

Очевидно, что за столь короткий интервал времени, который показан на рис. 7, нельзя судить о наличии или отсутствии аномального нагрева трансформатора. Колебания диагностической температуры обусловлены естественными причинами: изменением температуры воздуха, токов нагрузки трансформатора и других параметров. Только монотонное длительное возрастание диагностического параметра будет свидетельствовать об аномальном нагреве трансформатора.

## ВЫВОД

Предложенная система диагностирования силового трансформатора находится на этапе опытных образцов и требует длительных испытаний на силовых трансформаторах. Основное ее отличие от существующих систем – возможность раннего выявления неисправностей трансформатора при минимальных аппаратных затратах. Для установки системы не требуется отключать трансформатор от сети и вмешиваться в штатные схемы измерений. Ее внедрение позволит повысить надежность эксплуатации силовых масляных трансформаторов, а также будет способствовать переходу к их ремонтам по текущему состоянию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stenestam, B. Electronic transformer control with monitoring & diagnostics / B. Stenestam, C. Bengtsson, P. Ydersten // CIGRE 2006, rep. A2-110.
2. Широков, О. Г. Основные теоретические положения по тепловой защите масляного трансформатора / О. Г. Широков, В. В. Курганов, Д. И. Зализный // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 2. – С. 16–23.
3. Устройство защиты силового трансформатора от перегрева: пат. Респ. Беларусь № 8204, МПК (2012) H02N6/00 / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, Г. О. Широков. – Заявл. 31.10.2011; опубл. 30.04.2012 (www.belgospatent.org.by).
4. Зализный, Д. И. Расчет температур основных элементов силового масляного трансформатора на основе анализа температуры поверхности его бака / Д. И. Зализный, О. Г. Широков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 4. – С. 18–28.
5. Боднар, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

Представлена кафедрой электроснабжения

Поступила 13.03.2013