

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Кандидаты техн. наук, доценты РУНОВ Ю. А., ШИРОКОВ О. Г.,
ассист. ЗАЛИЗНЫЙ Д. И., асп. ЛОСЬ Д. М.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Система охлаждения масляных трансформаторов структурно состоит из двух частей: трансформаторного масла и внешней охлаждающей среды. В процессе теплообмена в трансформаторе обмотка и магнитопровод отдают свою теплоту маслу, а масло – охлаждающей среде.

Температура охлаждающей среды существенным образом влияет на охлаждение силового трансформатора. Например, при коэффициенте загрузки 0,2 и ниже характер переходных тепловых процессов в трансформаторе практически полностью зависит от изменения данной температуры, а влияние тока нагрузки пренебрежимо мало [1].

Вопрос об учете температуры охлаждающей среды при математическом моделировании тепловых процессов в силовых трансформаторах в литературе фактически не рассмотрен, так как в большинстве случаев для данного параметра используют понятие условно постоянной температуры охлаждающей среды [1...4]. Математическая тепловая модель силового масляного трансформатора как системы из трех однородных тел (обмотки, масла и магнитопровода) рассмотрена в [2, 3, 5]. Поставим задачу разработать уточненную модель, учитывающую и охлаждающую среду.

Предположим, что охлаждающая среда – это четвертое однородное тело со своей теплоемкостью и тепловой проводимостью, и рассмотрим тепловую модель масляного трансформатора как системы из четырех однородных тел: обмотки, масла, магнитопровода и охлаждающей среды.

В [2] приведена система дифференциальных уравнений, описывающая тепловую модель, состоящую из n -го числа однородных тел. Для четырех тел эта система выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 \frac{d\theta_0}{dt} + A_{0,1}(\theta_0 - \theta_1) + A_{0,2}(\theta_0 - \theta_2) + A_{0,3}(\theta_0 - \theta_3) = P_0; \\ C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + A_{1,0}(\theta_1 - \theta_0) + A_{1,2}(\theta_1 - \theta_2) + A_{1,3}(\theta_1 - \theta_3) = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + A_{2,0}(\theta_2 - \theta_0) + A_{2,1}(\theta_2 - \theta_1) + A_{2,3}(\theta_2 - \theta_3) = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + A_{3,0}(\theta_3 - \theta_0) + A_{3,1}(\theta_3 - \theta_1) + A_{3,2}(\theta_3 - \theta_2) = P_3, \end{array} \right. \quad (1)$$

где индексы 0, 1, 2, 3 обозначают номера однородных тел: 0 – охлаждающая среда, 1 – магнитопровод, 2 – обмотка, 3 – масло; $A_{i,k}$ – тепловые проводимости между соответствующими однородными телами (Вт/°С); C_0, C_1, C_2, C_3 – теплоемкости соответствующих тел (Вт·ч/°С); $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ – тем-

пературы соответствующих тел ($^{\circ}\text{C}$); P_0, P_1, P_2, P_3 – тепловые потоки (или потери энергии) в соответствующих телах (Вт).

Слагаемое $C_0 \frac{d\theta_0}{dt}$ в первом уравнении системы (1) представляет собой скорость изменения температуры охлаждающей среды под действием других однородных тел модели. На некотором расстоянии от трансформатора температура воздуха не зависит от температуры стенок бака. Поэтому будем считать, что температура охлаждающей среды – параметр заданный, не зависящий от тепловых режимов трансформатора. То есть остальные однородные тела не оказывают влияния на охлаждающую среду, или:

$$C_0 \frac{d\theta_0}{dt} = 0. \quad (2)$$

Учитывая, что теплообмена между обмоткой и магнитопроводом, обмоткой и охлаждающей средой и между магнитопроводом и охлаждающей средой нет, т. е. соответствующие тепловые проводимости равны нулю, можно записать [1]

$$A_{2,1} = A_{1,2} = A_{0,2} = A_{2,0} = A_{1,0} = A_{0,1} = 0. \quad (3)$$

Введем обозначения для тепловых сопротивлений:

$$R_1 = \frac{1}{A_{1,3}} = \frac{1}{A_{3,1}}; \quad R_2 = \frac{1}{A_{2,3}} = \frac{1}{A_{3,2}}; \quad R_3 = \frac{1}{A_{3,0}} = \frac{1}{A_{0,3}}, \quad (4)$$

где R_1 – тепловое сопротивление «магнитопровод – масло»; R_2 – тепловое сопротивление «обмотка – масло»; R_3 – тепловое сопротивление «масло – охлаждающая среда».

Обозначим также:

$$P_0 = \Delta P_{\text{охл}}; \quad P_1 = \Delta P_{\text{хх}}; \quad P_2 = \Delta P_{\text{кз}} = \Delta P_{\text{кп}} (K_{\text{н}}^2), \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{охл}}$ – эквивалентные потери в охлаждающей среде; $\Delta P_{\text{хх}}$ – потери холостого хода трансформатора; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания трансформатора; $\Delta P_{\text{кп}}$ – номинальные потери короткого замыкания трансформатора; $K_{\text{н}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

Величина $\Delta P_{\text{охл}}$ характеризует охлаждающую среду как однородное тело с внутренним источником теплоты. Величины $\Delta P_{\text{хх}}$ и $\Delta P_{\text{кз}}$ аналогичным образом характеризуют магнитопровод и обмотку. Но масло – это однородное тело без внутреннего источника теплоты. Поэтому

$$P_3 = 0. \quad (6)$$

Введем обозначения, принятые в ГОСТ 14209–85 [1], заменив в соотношениях (1) θ_0 на $\theta_{\text{охл}}$, θ_1 – на $\theta_{\text{с}}$, θ_2 – на $\theta_{\text{ннт}}$ и θ_3 – на $\theta_{\text{м}}$. Учитывая данные обозначения, а также соотношения (2)...(6), систему уравнений (1) можно переписать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\theta_{\text{охл}}(t) - \theta_{\text{м}}(t)}{R_3} = \Delta P_{\text{охл}}(t); \\ C_1 \frac{d\theta_{\text{с}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{с}}(t) - \theta_{\text{м}}(t)}{R_1} = \Delta P_{\text{хх}}; \\ C_2 \frac{d\theta_{\text{ннт}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{ннт}}(t) - \theta_{\text{м}}(t)}{R_2} = \Delta P_{\text{кн}} (K_{\text{н}}(t))^2; \\ C_3 \frac{d\theta_{\text{м}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{м}}(t) - \theta_{\text{охл}}(t)}{R_3} - \frac{\theta_{\text{с}}(t) - \theta_{\text{м}}(t)}{R_1} - \frac{\theta_{\text{ннт}}(t) - \theta_{\text{м}}(t)}{R_2} = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

Далее из (7) можно синтезировать тепловую схему замещения, считая каждое уравнение суммой токов по первому закону Кирхгофа в узлах искомой схемы так, как это сделано в [5]. Полученная тепловая схема замещения изображена на рис. 1.

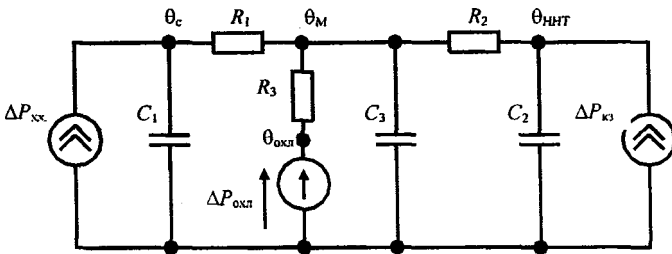


Рис. 1. Тепловая схема замещения силового масляного трансформатора

Эта схема отличается от тепловой схемы замещения [5] только источником ЭДС $\theta_{\text{охл}}$, учитывающим температуру охлаждающей среды. Направление теплового потока в охлаждающей среде $\Delta P_{\text{охл}}$ в соответствии с первым уравнением системы (7) показано на рисунке стрелкой.

С помощью тепловой схемы замещения (рис. 1) можно рассчитывать температуры обмотки, масла и магнитопровода трансформатора, используя методы, применяющиеся в электротехнике (например, операторный метод). Это значительно удобнее, чем решать (7).

В эксплуатации обычно наиболее доступна для измерения температура масла. Поэтому выведем расчетные соотношения именно для данного параметра.

Из схемы (рис. 1) найдем выражение в операторной форме для температуры $\theta_{\text{м}}(p)$

$$\theta_{\text{м}}(p) = \Delta P_{\text{хх}} R_3 + \frac{\Delta P_{\text{кн}} (K_{\text{н}}(p))^2 (1 + pT_1) R_3}{H(p)} + \frac{\theta_{\text{охл}}(p) (1 + pT_1) (1 + pT_2)}{H(p)}, \quad (8)$$

где

$$H(p) = p^3 T_1 T_2 T_3 + p^2 (T_1 T_2 + T_3 (T_1 + T_2) + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + p(T_1 + T_2 + T_3 + T_{3,1} + T_{3,2}) + 1; \quad (9)$$

$$T_1 = R_1 C_1; T_2 = R_2 C_2; T_3 = R_3 C_3; T_{3,1} = R_3 C_1; T_{3,2} = R_3 C_2.$$

Рассмотрим более подробно расчет температуры масла для режима холостого хода трансформатора. Найдя оригинал (8) и учитывая, что на холостом ходу $\Delta P_{кз} = 0$, для j -го интервала расчета получим

$$\theta_{mj} = \theta_{xx.m} + \sum_{k=1}^3 \left[d_k \theta_{охл_j} + (\theta_{m_{k,j-1}} - d_k \theta_{охл_j}) e^{-\frac{h}{\tau_k}} \right], \quad (10)$$

где j – номер интервала расчета; k – номер экспоненциальной составляющей; d_k – коэффициенты при температуре охлаждающей среды; $\theta_{xx.m}$ – составляющая температуры масла от потерь холостого хода трансформатора; τ_k – тепловые постоянные времени; h – длительность интервала расчета.

Для коэффициентов d_k должно выполняться соотношение

$$\sum_{k=1}^3 d_k = 1.$$

Данные коэффициенты в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа для выражения (8) рассчитываются по формуле

$$d_k = \frac{(1 + p_k T_1)(1 + p_k T_2)}{p_k W_k}, \quad (11)$$

где

$$W_k = 3(p_k)^2 T_1 T_2 T_3 + 2p_k (T_1 T_2 + T_3 (T_1 + T_2) + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + T_1 + T_2 + T_3 + T_{3,2} + T_{3,1};$$

p_k – корни характеристического уравнения (9).

Тепловые постоянные времени τ_k рассчитываются по формуле

$$\tau_k = \frac{1}{-p_k}. \quad (12)$$

Проанализируем точность расчета температуры масла трансформатора по (10) на основе экспериментальных данных, полученных авторами этой статьи в результате исследований, проведенных в 2003 г. на подстанции «Центролит-220» (автотрансформатор АТДЦТН-63000 220/110/6) (г. Гомель).

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость температуры воздуха от времени, а на рис. 3 – экспериментальная и расчетная (по тепловой модели ГОСТ 14209–85) зависимости температуры верхних слоев масла трансформатора от времени. Для экспериментальных кривых дата начала измерений – 19.08.2003; время начала измерений – 8:48. В течение всего времени измерения на автотрансформаторе были включены две группы вентиляторов системы охлаждения, а коэффициент нагрузки не превышал 0,2.

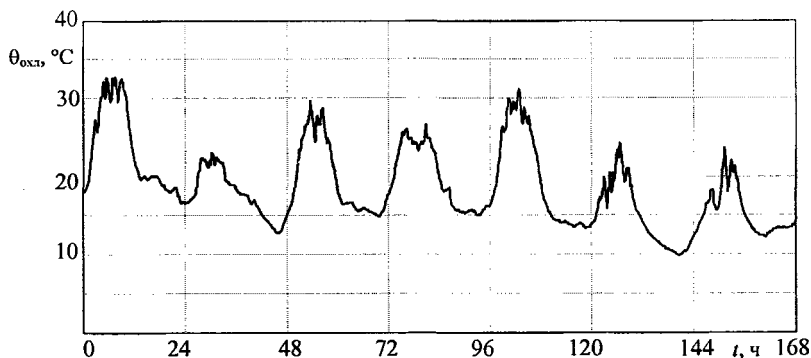


Рис. 2. Экспериментальная временная диаграмма температуры воздуха

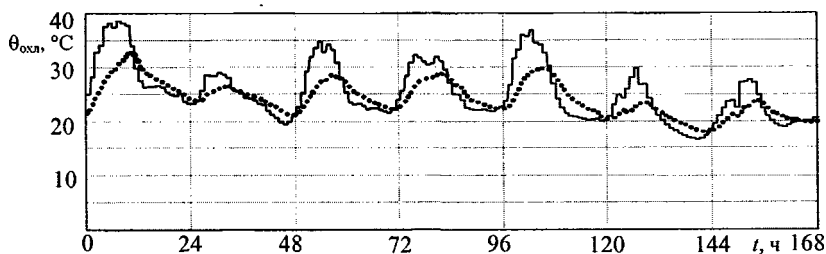


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная (по тепловой модели ГОСТ 14209–85) временные диаграммы температуры масла трансформатора: ———— расчет; — эксперимент

Расчетная кривая (рис. 3) получена для тепловой модели, принятой в соответствии с ГОСТ 14209–85 [1], где используют понятие эквивалентной температуры охлаждающей среды, определяемой по формуле

$$\theta_{\text{охл.э}} = 20 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^m 2^{\frac{\theta_{\text{охл.э}}}{6}}}{m} \right), \quad (13)$$

где m – количество равных временных интервалов, на которые необходимо разбить график температуры охлаждающей среды ($m \geq 12$). При этом график температуры охлаждающей среды (рис. 2) был разбит на часовые интервалы, которые, в свою очередь, разбиты на пятиминутные интервалы. Для каждого часового интервала расчет велся по формуле

$$\theta_{\text{м}} = \frac{v_{\text{м.ном}}}{6} + \theta_{\text{охл.э}}, \quad (14)$$

где $v_{\text{м.ном}}$ – номинальная температура масла, которая для трансформаторов систем охлаждения ДЦ в соответствии с ГОСТ 14209–85 составляет 40 °С.

На рис. 4 приведены экспериментальная и расчетная (по предлагаемой тепловой модели) зависимости температуры верхних слоев масла трансформатора от времени. Расчетная кривая температуры масла (рис. 4) получена в соответствии с выражениями (10)...(12).

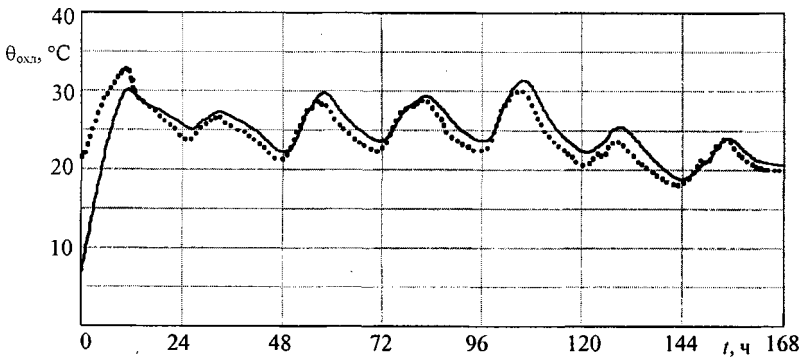


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная (по предлагаемой тепловой модели) временные диаграммы температуры масла трансформатора: ——— расчет; — эксперимент

При расчете температуры масла по тепловой модели ГОСТ 14209–85 (рис. 3) среднеквадратическое отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 9 °С, а при расчете по предлагаемой тепловой модели (рис. 4) – 1,8 °С.

ВЫВОДЫ

1. Учет температуры охлаждающей среды по предлагаемой в данной статье тепловой модели существенно повышает точность расчета в сравнении с тепловой моделью, применяющейся в ГОСТ 14209–85.
2. Среднеквадратическое отклонение в 1,8 °С показывает, что предлагаемая тепловая модель нуждается в дальнейшем совершенствовании.
3. Высокая точность расчета при моделировании температуры масла позволит использовать тепловую модель для выявления ненормального нагрева трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения: Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
2. Боднар В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1980.
4. IEC loading guide for oil immersed power transformers. – IEC Revision of Publication 354, draft 2, 1991.
5. 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. – С. 51–60.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 22.03.2004