

УДК 621.314.221.212

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАСЛЯНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРАХ 10/0,4 КВ**

Д.И. ЗАЛИЗНЫЙ

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

1. Введение

Силовые трансформаторы – наиболее дорогостоящие элементы в системе электроснабжения, поэтому при нынешней существенной недогрузке трансформаторов государство несет значительные финансовые издержки. Максимальная загрузка трансформаторов на предприятиях, определяемая как отношение получасового максимума нагрузки к номинальной мощности трансформатора, редко превышает 60 %. Это значит, что на каждый кВА передаваемой мощности при получасовом максимуме нагрузки устанавливают 1,5-3 кВА трансформаторной мощности. Данная ситуация, в частности, обусловлена тем, что за длительную историю эксплуатации масляных трансформаторов тепловые процессы в них так до конца и не изучены. И, прежде всего, потому, что технически сложно измерить температуру обмотки, провод которой находится под высоким напряжением. На сегодняшний день имеется информация о наличии таких устройств, описанных в [1], но она противоречива и неопределенна.

Официальными документами по расчету нагрузочной способности трансформаторов являются рекомендации МЭК 354 [2] и ГОСТ 14209-85 [3] по нагрузочной способности. И, тем не менее, данная нормативно-техническая документация практически не используется при инженерных расчетах, а используются указания старых ПУЭ, которые, зачастую, противоречат ГОСТу, а также применяются различные инструкции, где заложен совершенно неоправданный запас по загрузке трансформаторов. Неиспользование указанного ГОСТа объясняется двумя факторами:

1. Плохой приспособленностью ГОСТа для инженерных расчетов по выбору требуемой номинальной мощности трансформаторов.
2. Недоверием к самой методике, принятой в ГОСТе, так как в ней содержатся неточности и противоречия.

Недостатки и противоречия, имеющиеся в нормативно-технической документации, рассмотрены в [4].

Отсутствие пригодных в эксплуатации приборов и устройств для контроля и измерения температур отдельных частей трансформаторов привело к тому, что их номинальная мощность выбирается с неоправданным запасом. Но даже принятый запас по мощности не может гарантировать надежную работу трансформаторов, так как они используются фактически «вслепую».

Таким образом, требуется разработка усовершенствованной методики по расчету нагрузочной способности трансформаторов, удобной для инженерных расчетов и базирующейся на основных положениях МЭК и ГОСТ. Первым шагом к созданию такой методики является данная статья. В ней рассматривается тепловая модель

масляных трансформаторов, на основе которой были рассчитаны тепловые параметры трансформаторов 10/0,4 кВ.

2. Тепловые модели масляных трансформаторов

Главными факторами, ограничивающими нагрузку трансформаторов, являются максимально допустимые температуры их основных частей, а также тепловой износ их изоляции. К основным тепловым параметрам силовых трансформаторов относят температуры наиболее нагретых точек (ННТ) обмотки, масла и магнитопровода. Каждый из этих параметров не должен превышать определенного критического значения. С увеличением температуры ННТ обмотки растет тепловой износ изоляции трансформатора и по достижении некоторой температуры (в ГОСТ – это 160 °С для трансформаторов классов напряжения 110 кВ и ниже) изоляция претерпевает существенное разрушение, вызванное увеличением скорости окислительных процессов и сопровождаемое выделением пузырьков газа в масле. В качестве защитной меры в такой ситуации в трансформаторах предусмотрена выхлопная труба. В руководстве МЭК имеются сведения, что процесс выделения пузырьков газа начинается уже при 140 °С. Максимальная температура масла определяет пробивную способность масла и в соответствии с ГОСТом равна 115 °С. Магнитопровод имеет критическую температуру нагрева, равную по рекомендациям МЭК 180 °С.

Процесс теплопередачи в трансформаторе имеет самый сложный характер, где проявляются все три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекция, излучение, что подробно описано в [5], [6]. Коэффициенты теплоотдачи в различных частях трансформатора сами зависят от температуры по сложному закону, а реальное распределение температур по сечению трансформатора носит нелинейный характер и зависит от множества факторов. Поэтому для описания тепловых процессов вводят ряд упрощений. В частности, в [5], [6] рассматривают упрощенную тепловую модель реального трансформатора, состоящую из трех однородных тел: обмотки, масла и магнитопровода, коэффициенты теплоотдачи которых не зависят от температуры. Напомним, что под однородным телом подразумевается тело с бесконечно большой внутренней теплопроводностью, имеющее по всему своему объему одинаковую температуру и удельную теплоемкость.

Источниками тепла в трансформаторе являются потери холостого хода ΔP_{xx} и потери короткого замыкания $\Delta P_{кз}$. При этом, $\Delta P_{кз}$ вычисляют по формуле, приведенной в [5]:

$$\Delta P_{кз} = \Delta P_{к.ном} \cdot K_з^2, \quad (1)$$

где $K_з = \frac{S}{S_{ном}}$ – коэффициент загрузки трансформатора; S – мощность нагрузки;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора; $\Delta P_{к.ном}$ – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке.

Теплообмен в силовом трансформаторе происходит следующим образом. В процессе охлаждения магнитопровод и обмотка отдают путем конвекции свое тепло маслу, масло же, в свою очередь, путем конвекции и теплопроводности, отдает тепло стенкам бака, который охлаждается путем теплопроводности и излучения, отдавая тепло охлаждающей среде. Непосредственного теплообмена между обмоткой и магнитопроводом нет, так как между ними расположены изоляционные цилиндры и масляные каналы. Нестационарные тепловые процессы в такой модели описываются системой дифференциальных уравнений, которая приведена в [5] для

процесса нагревания при нулевой температуре охлаждающей среды и нулевых начальных условий:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + A_{1,0} \cdot \vartheta_1 + A_{1,2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + A_{1,3} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) = P_1; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + A_{2,0} \cdot \vartheta_2 + A_{2,1} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_{2,3} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) = P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + A_{3,0} \cdot \vartheta_3 + A_{3,1} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_1) + A_{3,2} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2) = P_3. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь индексы 1, 2, 3 обозначают номера тепловых тел: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – масло. Индекс 0 обозначает охлаждающую среду; $A_{i,k}$ – тепловые проводимости между соответствующими тепловыми телами, то есть это потери, передаваемые от одного тела к другому, приходящиеся на 1°C перепада температур между телами ($\text{Вт}/^\circ\text{C}$); C_1, C_2, C_3 – теплоемкости соответствующих тел ($\text{Вт}\cdot\text{ч}/^\circ\text{C}$); $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ – превышения температур соответствующих тел над температурой охлаждающей среды ($^\circ\text{C}$); P_1, P_2, P_3 – электрические потери в соответствующих телах (Вт).

Учитывая, что теплообмена между обмоткой и магнитопроводом, обмоткой и охлаждающей средой и между магнитопроводом и охлаждающей средой нет, то есть соответствующие тепловые проводимости равны нулю, можно записать [5]:

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

Введем обозначения для тепловых сопротивлений, которые являются величинами, обратными тепловым проводимостям:

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

Учтем также в соответствии с [5], что потери в магнитопроводе P_1 равны потерям холостого хода ΔP_{xx} в трансформаторе, потери в обмотке P_2 равны потерям короткого замыкания $\Delta P_{кз}$ в трансформаторе, а потери в масле отсутствуют, то есть:

$$\begin{cases} P_1 = \Delta P_{xx}; \\ P_2 = \Delta P_{кз}; \\ P_3 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Вместо обозначений величин $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$, принятых в [5], мы будем использовать обозначения, принятые в ГОСТ, то есть вместо $\vartheta_1 - \vartheta_c$, вместо $\vartheta_2 - \vartheta_{ннт}$, вместо $\vartheta_3 - \vartheta_m$. Тогда с учетом (3), (4), (5) и принятых обозначений систему уравнений (2) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_c(t)}{dt} + \frac{\vartheta_c(t) - \vartheta_m(t)}{R_1} = \Delta P_{xx}; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_{ннт}(t)}{dt} + \frac{\vartheta_{ннт}(t) - \vartheta_m(t)}{R_2} = \Delta P_{кз}; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_m(t)}{dt} + \frac{\vartheta_m(t)}{R_3} - \frac{\vartheta_c(t) - \vartheta_m(t)}{R_1} - \frac{\vartheta_{ннт}(t) - \vartheta_m(t)}{R_2} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решением системы (6) для каждой из температур являются кривые, представляющие собой сумму трех экспоненциальных составляющих. Но получение расчетных соотношений непосредственно из данной системы является достаточно сложной процедурой, поскольку приходится решать систему из девяти уравнений, как это показано в [5]. Поэтому удобно вести расчет по электрической тепловой схеме замещения, синтезированной на основе системы (6). Сделать это достаточно просто. Величины ΔP_{xx} и $\Delta P_{кз}$ представляем в виде источников тока, а каждое уравнение системы (6) рассматриваем как уравнения, составленные по первому закону Кирхгофа в узлах искомой схемы. Полученная схема изображена на рис. 1.

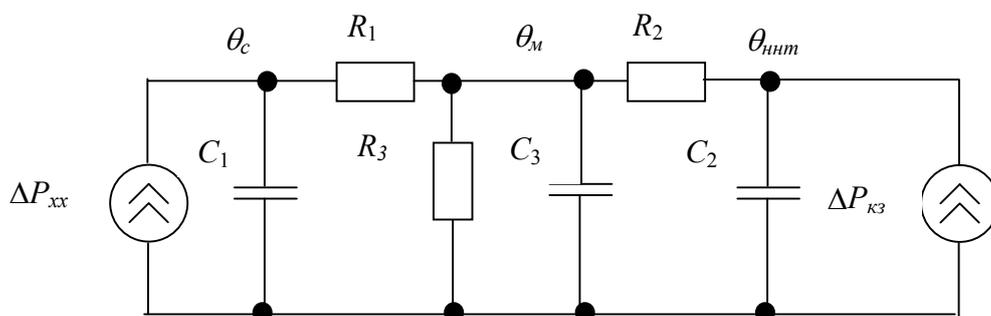


Рис. 1. Тепловая схема замещения масляного трансформатора для переходного теплового процесса

Здесь тепловые сопротивления представлены резисторами, а теплоемкости – конденсаторами. θ_c , $\theta_{ннт}$, θ_m – соответственно, температуры магнитопровода, обмотки и масла. Подобная схема приводится в [6], но без источников тока, так как предназначена для рассмотрения режима охлаждения. Предлагаемая же схема универсальна и позволяет получить кривые и охлаждения, и нагревания для любого промежутка времени, при любом коэффициенте загрузки трансформатора.

Рассмотрим частный случай, когда имеет место установившийся тепловой режим. Для такого случая можно составить упрощенную тепловую схему замещения, полученную из схемы (рис. 1) при постоянной температуре. Такая схема изображена на рис. 2.

Из схемы (рис. 2) можно составить систему:

$$\begin{cases} \theta_c = \Delta P_{xx} \cdot (R_1 + R_3) + \Delta P_{кз} \cdot R_3; \\ \theta_{ннт} = \Delta P_{кз} \cdot (R_1 + R_3) + \Delta P_{xx} \cdot R_3; \\ \theta_m = (\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}) \cdot R_3. \end{cases} \quad (7)$$

Введем обозначения для превышений температур магнитопровода над температурой масла: $\vartheta_{c.m} = \theta_c - \theta_m$; обмотки над температурой масла: $\vartheta_{ннт.m} = \theta_{ннт} - \theta_m$ и пре-

вышение температуры масла над температурой охлаждающей среды $\theta_{охл}$:
 $\mathcal{G}_M = \theta_M - \theta_{охл}$.

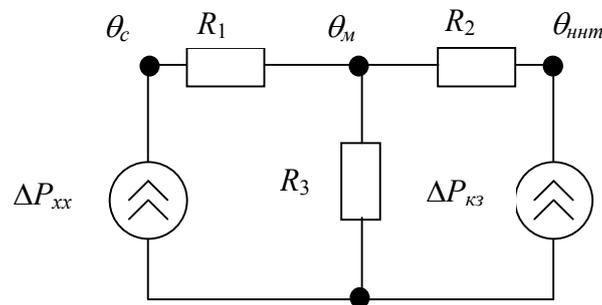


Рис. 2. Тепловая схема замещения масляного трансформатора в установившемся тепловом режиме

Учитывая введенные обозначения и принимая $K_3=1$, найдем R_1 , R_2 , R_3 из системы (7):

$$\begin{cases} R_1 = \frac{\mathcal{G}_{с.м.}}{\Delta P_{xx}}; \\ R_2 = \frac{\mathcal{G}_{ннт.м.}}{\Delta P_{к.ном}}; \\ R_3 = \frac{\mathcal{G}_M}{\Delta P_{xx} + \Delta P_{к.ном}}. \end{cases} \quad (8)$$

Данные соотношения можно получить и непосредственно из системы (6), приняв величины \mathcal{G}_c , $\mathcal{G}_{ннт}$, \mathcal{G}_M постоянными.

В полученных соотношениях величины ΔP_{xx} и $\Delta P_{к.ном}$ являются справочными данными для каждого трансформатора, а величины $\mathcal{G}_{ннт.м.}$ и \mathcal{G}_M установлены цифровой диаграммой распределения температур в трансформаторе по высоте бака, приведенной в [2], [3], [5], [6], которая изображена на рис. 3.

Данная диаграмма основана на исследованиях большого числа трансформаторов по методу кривых охлаждения, когда после установления температуры трансформатор выключают и измеряют среднее значение сопротивления обмотки, а результаты измерений экстраполируют в область рабочих температур. Таким образом, в сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 косвенно учтены как процесс теплопередачи, так и процесс конвекции.

Величину $\mathcal{G}_{с.м.}$ считают равной 25 °С, что указано в [5], [6].

В эксплуатации нагрузка силовых трансформаторов имеет постоянно изменяющийся характер, поэтому установившиеся тепловые режимы редко имеют место. Характерными же в эксплуатации трансформаторов являются переходные тепловые процессы, которые в схеме (рис. 1) обусловлены теплоемкостями.

Теплоемкости рассчитывают по формуле, приведенной в [5]:

$$C = C_{уд} \cdot G, \quad (9)$$

где $C_{уд}$ – удельная теплоемкость тела; G – масса тела; $C_{уд}$ и G – величины справочные.

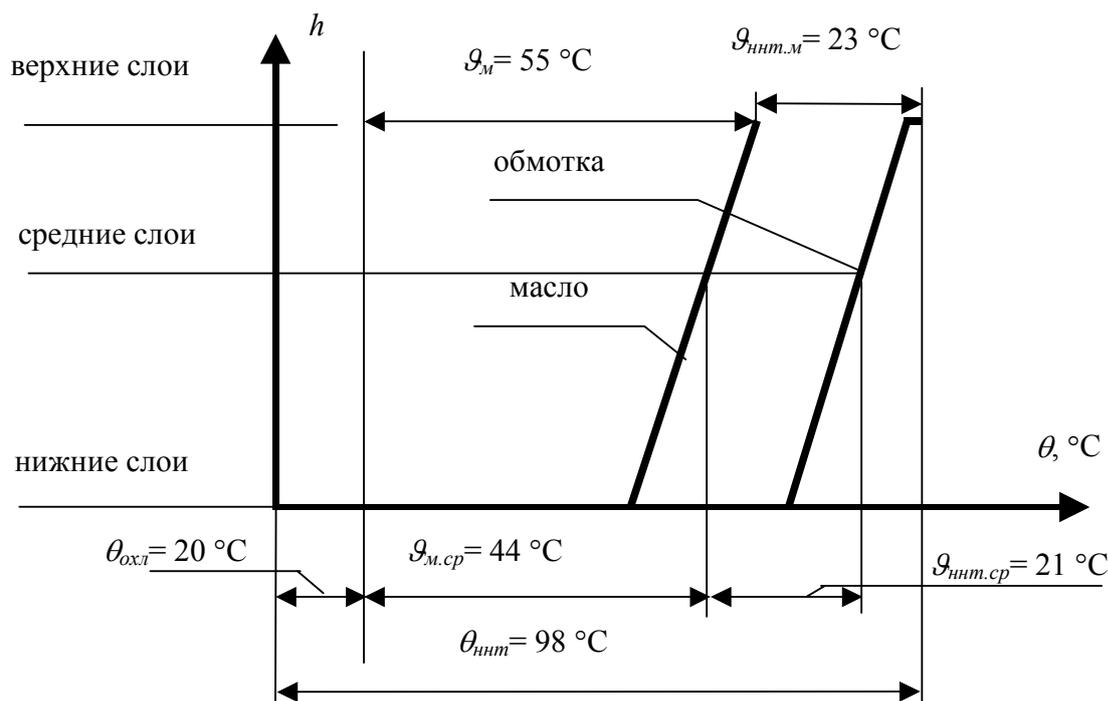


Рис. 3. Диаграмма распределения температур по высоте бака для трансформаторов систем охлаждения М и Д

Из схемы (рис. 1) найдем выражения в операторной форме для температур $\theta_{ннт(p)}$, $\theta_{м(p)}$, $\theta_{с(p)}$ при подаче на вход единичного скачка потерь ΔP_{xx} и $\Delta P_{кз}$ и нулевых начальных условиях. В результате характеристическое уравнение запишется в виде

$$H(p) = p^3 T_1 T_2 T_3 + p^2 (T_1 T_2 + T_3 (T_1 + T_2) + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + p (T_1 + T_2 + T_3 + T_{3,1} + T_{3,2}) + 1, \quad (10)$$

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

Тогда для $\theta_{ннт(p)}$ можно записать:

$$\theta_{ннт}(p) = \frac{\Delta P_{кз} \cdot (p^2 T_1 T_2 T_3 + p (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + T_2 + T_{3,2}) + \Delta P_{xx} \cdot T_{3,2}}{p \cdot C_2 \cdot H(p)}. \quad (11)$$

Далее учтем, что в силовом трансформаторе потери холостого хода – величина практически постоянная ($\Delta P_{xx} = const$) и, следовательно, составляющая температуры от потерь холостого хода не зависит от нагрузки. То есть часть соотношения (11), умноженную на ΔP_{xx} , необходимо рассматривать для установившегося режима. По теореме о конечном значении имеем:

$$p \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \frac{\Delta P_{xx} \cdot T_{3,2}}{p \cdot C_2 \cdot H(p)} \right) = \frac{\Delta P_{xx} \cdot T_{3,2}}{C_2} = \Delta P_{xx} \cdot R_3. \quad (12)$$

С учетом (12) выражение (11) запишется в виде

$$\theta_{ннт}(p) = \frac{\Delta P_{кз} \cdot (p^2 T_1 T_2 T_3 + p (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + T_2 + T_{3,2})}{p \cdot C_2 \cdot H(p)} + \Delta P_{xx} \cdot R_3. \quad (13)$$

Аналогично можно найти $\theta_m(p)$ и $\theta_c(p)$:

$$\theta_m(p) = \frac{\Delta P_{кз} \cdot (p \cdot T_1 + 1) \cdot R_3}{p \cdot H(p)} + \Delta P_{xx} \cdot R_3. \quad (14)$$

$$\theta_c(p) = \frac{\Delta P_{кз} \cdot R_3}{p \cdot H(p)} + \Delta P_{xx} \cdot (R_3 + R_1). \quad (15)$$

Находя оригиналы $\mathcal{G}_{ннт}(t)$, $\mathcal{G}_m(t)$, $\mathcal{G}_c(t)$ из выражений, соответственно, (13), (14), (15) с учетом (1), получим соотношения для кривых нагрева:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_c(t) = \mathcal{G}_{xx.c} + K_3^2 \cdot \sum_{k=1}^3 [\mathcal{G}_{c_k} \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_k}))]; \\ \mathcal{G}_{ннт}(t) = \mathcal{G}_{xx.ннт} + K_3^2 \cdot \sum_{k=1}^3 [\mathcal{G}_{ннт_k} \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_k}))]; \\ \mathcal{G}_m(t) = \mathcal{G}_{xx.m} + K_3^2 \cdot \sum_{k=1}^3 [\mathcal{G}_{m_k} \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_k}))], \end{cases} \quad (16)$$

где τ_k – тепловые постоянные времени, которые определяются по формуле

$$\tau_k = \frac{1}{-p_k}, \quad (17)$$

где p_k – корни характеристического уравнения (10), которые необходимо вычислять с точностью не менее пяти знаков после запятой;

$\mathcal{G}_{xx.c}$, $\mathcal{G}_{xx.ннт}$, $\mathcal{G}_{xx.m}$ – составляющие температур от потерь холостого хода, соответственно, магнитопровода, обмотки и масла. Они определяются из соотношений:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_{xx.ннт} = \mathcal{G}_{xx.m} = \Delta P_{xx} \cdot R_3; \\ \mathcal{G}_{xx.c} = \Delta P_{xx} \cdot (R_1 + R_3). \end{cases} \quad (18)$$

Величины \mathcal{G}_{c_k} , $\mathcal{G}_{ннт_k}$, \mathcal{G}_{m_k} определяются по формулам:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_{c_k} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot R_3}{p_k \cdot W_k}; \\ \mathcal{G}_{ннт_k} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot ((p_k)^2 T_1 T_2 T_3 + p_k (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + T_2 + T_{3,2})}{p_k \cdot C_2 \cdot W_k}; \\ \mathcal{G}_{m_k} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot (1 + p_k T_1) \cdot R_3}{p_k \cdot W_k}, \end{cases} \quad (19)$$

где:

$$\begin{aligned} W_k = & 3(p_k)^2 T_1 T_2 T_3 + 2p_k (T_1 T_2 + T_3 (T_1 + T_2) + T_{3,2} T_1 + T_{3,1} T_2) + \\ & + T_1 + T_2 + T_3 + T_{3,2} + T_{3,1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Полученные нами формулы (16-20) имеют неоспоримое преимущество перед соотношениями, приводимыми в [5], так как позволяют рассчитывать тепловые параметры трансформаторов при любых коэффициентах загрузки. Если же пользоваться

соотношениями, приведенными в [5], то для каждого нового коэффициента загрузки приходится решать систему из девяти уравнений.

Необходимо также отметить, что в [5] приведен пример расчета тепловых параметров трансформатора 800 кВА. Такие трансформаторы отечественной промышленностью не выпускаются и выводы, которые делает автор [5] по полученным результатам, нельзя отнести к отечественным трансформаторам. Поэтому использовать вышерассмотренную тепловую модель необходимо в совокупности со справочными данными отечественных трансформаторов.

3. Расчет температур отдельных узлов трансформаторов 10/0,4кВ

Таким образом, расчет температур отдельных узлов трансформаторов можно выполнить в следующей последовательности: используя справочные данные трансформаторов, по соотношениям (8) рассчитываем тепловые сопротивления; по формуле (9) рассчитываем теплоемкости; находим корни характеристического уравнения (10); рассчитываем тепловые постоянные времени по формуле (17); по формулам (18-20) рассчитываем составляющие температур в соотношениях (16).

Такие расчеты были выполнены с помощью Mathcad и результаты вычислений приведены в таблицах 1 и 2.

В таблице 1 G_c , G_o , G_m – масса, соответственно, магнитопровода, обмотки, масла. Удельные теплоемкости равны:

$$\text{магнитопровод (сталь)} - 462 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{°C} \cdot \text{кг}};$$

$$\text{обмотка (алюминий)} - 925 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{°C} \cdot \text{кг}};$$

$$\text{масло} - 2000 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{°C} \cdot \text{кг}}.$$

Таблица 1

Справочные данные и значения тепловых сопротивлений и теплоемкостей трансформаторов 10/0,4 кВ

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ-250	ТМ-400	ТМ-630	ТМ-1000	ТМ-1600	ТМ-2500
ΔP_{xx} , кВт	0,82	1,05	1,56	2,4	3,0	4,3
$\Delta P_{к.ном}$, кВт	3,7	5,5	7,6	12,0	18,0	24,0
G_c , кг	415	650	900	1350	1950	2650
G_o , кг	124	148	226	290	460	500
G_m , кг	340	500	770	1225	1465	2270
R_1 , °C/кВт	30,49	23,81	16,03	10,42	8,33	5,81
R_2 , °C/кВт	6,21	4,18	3,03	1,92	1,28	0,96
R_3 , °C/кВт	12,17	8,4	6,0	3,82	2,62	1,94
C_1 , кВт·ч/°C	0,0533	0,0833	0,1155	0,1744	0,25	0,34
C_2 , кВт·ч/°C	0,0319	0,0381	0,0581	0,0744	0,118	0,128
C_3 , кВт·ч/°C	0,188	0,277	0,428	0,681	0,814	1,261

Таблица 2

Результаты расчета температур ННТ обмоток, магнитопроводов,
масла и тепловых постоянных времени

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ-250	ТМ-400	ТМ-630	ТМ-1000	ТМ-1600	ТМ-2500
$\vartheta_{\text{хх.ннт}}$, °С	9,98	8,82	9,36	9,17	7,86	8,34
$\vartheta_{\text{нт}_1}$, °С	15,94	17,18	17,25	18,3	16,98	18,65
$\vartheta_{\text{нт}_2}$, °С	11,13	14,42	11,34	10,78	17,48	13,39
$\vartheta_{\text{нт}_3}$, °С	40,99	37,62	40,0	39,78	35,7	37,53
τ_1 , ч	0,166	0,138	0,153	0,128	0,13	0,111
τ_2 , ч	1,156	1,315	1,307	1,29	1,328	1,337
τ_3 , ч	3,823	4,036	4,177	4,094	3,871	4,005
$\vartheta_{\text{хх.с}}$, °С	34,98	32,82	34,37	34,18	32,85	33,33
ϑ_{c_1} , °С	0,35	0,19	0,23	0,16	0,18	0,12
ϑ_{c_2} , °С	-22,79	-24,94	-23,52	-23,41	-27,32	-25,44
ϑ_{c_3} , °С	67,47	70,95	68,89	69,09	74,3	71,88
$\vartheta_{\text{хх.м}}$, °С	9,98	8,82	9,36	9,17	7,86	8,34
ϑ_{m_1} , °С	-3,02	-2,57	-2,55	-2,15	-2,68	-2,01
ϑ_{m_2} , °С	9,24	12,68	9,79	9,56	15,52	12,14
ϑ_{m_3} , °С	38,81	36,09	38,36	38,43	34,32	36,43

На рис. 4 представлено семейство кривых нагрева и охлаждения ННТ обмоток трансформаторов, построенное по табл. 2 и соотношениям (16) при $K_3=1$.

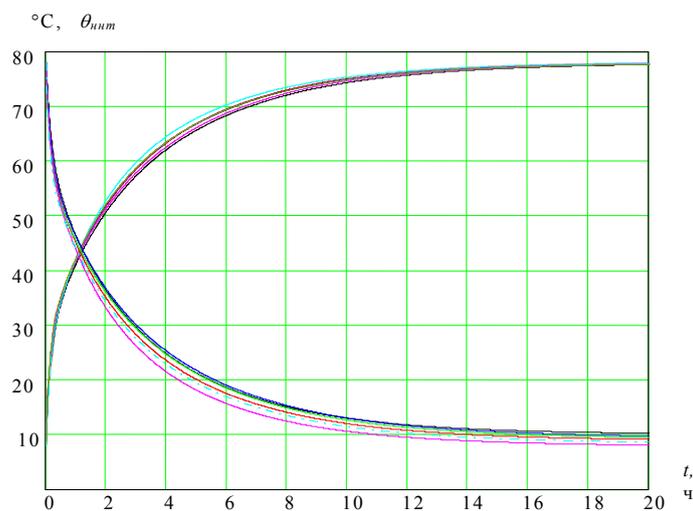


Рис. 4. Семейство кривых нагрева и охлаждения ННТ обмоток трансформаторов 10/0,4 кВ

Примечание. Кривые охлаждения построены с использованием соотношений (16), только в круглых скобках вместо $(1 - \exp(-\frac{t}{\tau_k}))$ стояли величины $(\exp(-\frac{t}{\tau_k}))$.

Как видно из рис. 4, семейство кривых имеет небольшой разброс, не превышающий в максимальных точках отклонения 3 °С. При этом, если построить семейство кривых для масла и магнитопровода, можно также убедиться, что их расхождение невелико. Такой небольшой разброс кривых объясняется геометрическим и электрическим подобием трансформаторов. При увеличении номинальной мощности трансформатора растет его масса, то есть увеличиваются теплоемкости и одновременно снижаются тепловые сопротивления из-за увеличения потерь в трансформаторе, в результате чего собственные постоянные времени, равные произведениям теплоемкостей на тепловые сопротивления, практически остаются теми же. Данное подобие было изначально заложено при конструировании трансформаторов.

Полученный результат позволяет сделать два очень важных вывода.

Для последующего анализа и тепловых расчетов можно принять один «расчетный» трансформатор с усредненными тепловыми параметрами.

Используя «расчетный» трансформатор, можно разработать единую методику расчета тепловых параметров всех трансформаторов данного класса и создать более совершенный ГОСТ по нагрузочной способности, чем ГОСТ 14209-85.

4. Выводы

Для создания усовершенствованной методики расчета нагрузочной способности трансформаторов, основываясь на вышеизложенной тепловой модели, необходимо:

- Выявить все недостатки и противоречия, присущие ГОСТ 14209-85.
- Предложить пути по усовершенствованию ГОСТ 14209-85.
- Разработать методику расчета нагрузочной способности, лишенную недостатков ГОСТ, удобную для инженерных расчетов.

На основе рассмотренных физических зависимостей и схем замещения необходима разработка приборов и устройств контроля тепловых параметров трансформаторов в эксплуатации.

Литература

1. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции: Переводы докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ - 84) /Под ред. А.К. Лизунова. – М., Энергоатомиздат, 1986.
2. Стандарт МЭК 354. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов (англ., фр.). – 2-е издание, 1991.
3. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
4. Рунов Ю.А. Нужно ли преобразование заданного многоступенчатого графика нагрузки в эквивалентный двухступенчатый для определения нагрузочной способности трансформаторов. Замечания к ГОСТ 14209-85 //Электротехника. – 1999. – № 1.
5. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М., Энергоатомиздат, 1983.
6. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – М., Энергоатомиздат, 1980.

Получено 17.10.2001 г.