

УДК 621.314.221

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА

О. Г. ШИРОКОВ, Д. М. ЛОСЬ

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

Введение

Тепловые модели трансформаторов широко рассматриваются в литературе [1]–[3]. Представленные модели тепловых процессов упрощены и используют теорию нагревания и охлаждения однородных тел. Объектом рассмотрения в данных моделях выступает силовой масляный трансформатор. Однако в связи с растущим производством силовых сухих трансформаторов появляется интерес к их тепловым моделям. Следует отметить, что описание тепловых моделей силовых сухих трансформаторов редко встречается в литературе, а сами модели достаточно упрощены [4].

В [5] предложено рассматривать силовой сухой трансформатор как совокупность четырех однородных в тепловом отношении тел (магнитопровод, обмотка, изоляция, и внешняя охлаждающая среда). Следует отметить, что в [5] рассматривается незащищенный силовой трансформатор, т. е. трансформатор без защитного кожуха тоже имеет место в [4].

Измерение температуры наиболее нагретой точки обмотки (далее «температура обмотки») и магнитопровода в силовом сухом трансформаторе в настоящее время не представляет особой сложности. Это вызвано тем, что силовые сухие трансформаторы не выполняются на сверхвысокие напряжения, а все элементы конструкции легкодоступны. Однако и в этом случае сопоставление данных, полученных в результате моделирования тепловых процессов, с результатами непосредственных измерений температур может оказаться полезным для целей диагностирования трансформатора.

Целью данной статьи является разработка тепловой модели незащищенного силового сухого трансформатора и силового сухого трансформатора, помещенного в защитный кожух.

Решение задачи

Тепловые процессы в силовом сухом трансформаторе можно представить в виде структурной схемы (рис. 1).

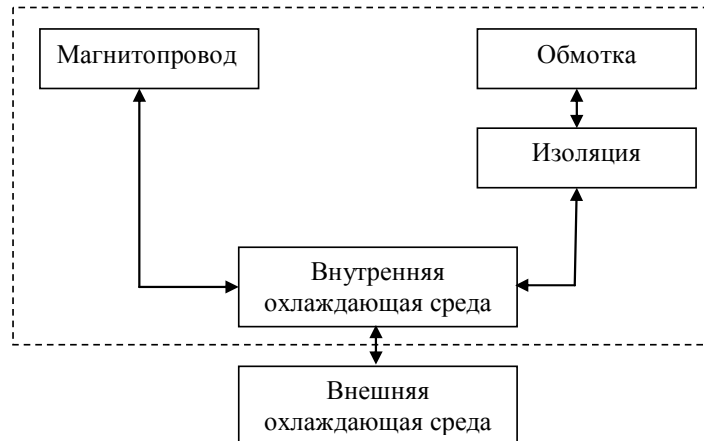


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов в силовом сухом трансформаторе

При этом для сухого незащищенного трансформатора под внутренней охлаждающей средой понимается прослойка воздуха в непосредственной близости от трансформатора, через слой которого происходит теплообмен между обмоткой с изоляцией и магнитопроводом. Внешняя охлаждающая среда соответствует воздуху на достаточном расстоянии от трансформатора.

Что касается защищенного исполнения трансформатора, когда он помещается в защитный кожух, внутренняя охлаждающая среда характеризует газовую среду внутри защитного кожуха.

Представим элементы структурной схемы (магнитопровод, обмотка, изоляция, внутренняя охлаждающая среда и внешняя охлаждающая среда) в виде однородных тел с определенными значениями тепловых сопротивлений и емкостей. Тогда на основании рис. 1 можно составить систему дифференциальных уравнений и тепловую схему замещения.

В [2] приведена система дифференциальных уравнений для описания тепловых процессов модели, состоящей из n -го количества однородных тел. Для пяти однородных тел получим систему следующего вида:

$$\begin{cases} C_0 \frac{d\theta_0}{dt} + A_{0,1}(\theta_0 - \theta_1) + A_{0,2}(\theta_0 - \theta_2) + A_{0,3}(\theta_0 - \theta_3) + A_{0,4}(\theta_0 - \theta_4) = P_0; \\ C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + A_{1,0}(\theta_1 - \theta_0) + A_{1,2}(\theta_1 - \theta_2) + A_{1,3}(\theta_1 - \theta_3) + A_{1,4}(\theta_1 - \theta_4) = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + A_{2,0}(\theta_2 - \theta_0) + A_{2,1}(\theta_2 - \theta_1) + A_{2,3}(\theta_2 - \theta_3) + A_{2,4}(\theta_2 - \theta_4) = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + A_{3,0}(\theta_3 - \theta_0) + A_{3,1}(\theta_3 - \theta_1) + A_{3,2}(\theta_3 - \theta_2) + A_{3,4}(\theta_3 - \theta_4) = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + A_{4,0}(\theta_4 - \theta_0) + A_{4,1}(\theta_4 - \theta_1) + A_{4,2}(\theta_4 - \theta_2) + A_{4,3}(\theta_4 - \theta_3) = P_4, \end{cases} \quad (1)$$

где 0, 1, 2, 3, 4, 5 – номера однородных тел (0 – внешняя охлаждающая среда, 1 – внутренняя охлаждающая среда, 2 – изоляция, 3 – обмотка, 4 – магнитопровод); $A_{i,k}$ – тепловые проводимости между соответствующими однородными телами (Вт/°С); C_i – теплоемкости соответствующих тел (Вт/°С); θ_i – температуры соответствующих тел (°С); P_i – тепловые потоки (или потери энергии) в соответствующих телах (Вт).

Пренебрежем теплообменом между обмоткой и внешней охлаждающей средой, обмоткой и внутренней охлаждающей средой, обмоткой и магнитопроводом, магнитопроводом и внешней охлаждающей средой, тогда соответствующие теплопроводности примем равными нулю, получим:

$$A_{0,2} = A_{0,3} = A_{0,4} = A_{1,3} = A_{2,0} = A_{2,4} = A_{3,0} = A_{3,1} = A_{3,4} = A_{4,0} = A_{4,2} = A_{4,3} = 0. \quad (2)$$

Введем обозначения для тепловых сопротивлений:

$$R_1 = \frac{1}{A_{1,4}} = \frac{1}{A_{4,1}}; R_2 = \frac{1}{A_{2,3}} = \frac{1}{A_{3,2}}; R_3 = \frac{1}{A_{1,2}} = \frac{1}{A_{2,1}}; R_4 = \frac{1}{A_{1,0}} = \frac{1}{A_{0,1}}, \quad (3)$$

где R_1 – тепловое сопротивление «магнитопровод–внутренняя охлаждающая среда»; R_2 – тепловое сопротивление «обмотка–изоляция»; R_3 – тепловое сопротивление «изоляция–внутренняя охлаждающая среда»; R_4 – тепловое сопротивление «внутренняя охлаждающая среда–внешняя охлаждающая среда».

Обозначим потери энергии:

$$P_0 = \Delta P_{\text{охл}}; P_1 = 0; P_2 = 0; P_3 = \Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{кз}} (K_{\text{н}})^2; P_4 = \Delta P_{\text{хх}}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{охл}}$ – эквивалентные потери во внешней охлаждающей среде; P_1 – эквивалентные потери во внутренней охлаждающей среде; P_2 – эквивалентные потери в изоляции; $\Delta P_{\text{кн}}$ – нагрузочные потери трансформатора; $K_{\text{н}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора; $\Delta P_{\text{кз}}$ – номинальные потери короткого замыкания трансформатора; $\Delta P_{\text{хх}}$ – потери холостого хода трансформатора.

Приняв температуру внешней охлаждающей среды, независимой от изменения температуры других однородных тел [3], получим:

$$C_0 \frac{d\theta_0}{dt} = 0. \quad (5)$$

На основании обозначений [2], [3] заменим θ_0 на $\theta_{\text{охл}}$, θ_1 – на $\theta_{\text{вн}}$, θ_2 – на $\theta_{\text{из}}$, θ_3 – на $\theta_{\text{ннт}}$, θ_4 – на $\theta_{\text{с}}$. Далее, с учетом выражений (1)–(5) получим систему уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{\theta_{\text{охл}}(t) - \theta_{\text{вн}}(t)}{R_4} = \Delta P_{\text{охл}}(t); \\ C_1 \frac{d\theta_{\text{вн}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{вн}}(t) - \theta_{\text{охл}}(t)}{R_4} + \frac{\theta_{\text{вн}}(t) - \theta_{\text{из}}(t)}{R_3} + \frac{\theta_{\text{вн}}(t) - \theta_{\text{с}}(t)}{R_1} = 0; \\ C_2 \frac{d\theta_{\text{из}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{из}}(t) - \theta_{\text{вн}}(t)}{R_3} + \frac{\theta_{\text{из}}(t) - \theta_{\text{ннт}}(t)}{R_2} = 0; \\ C_3 \frac{d\theta_{\text{ннт}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{ннт}} - \theta_{\text{из}}}{R_2} = \Delta P_{\text{кз}} (K_{\text{н}}(t))^2; \\ C_4 \frac{d\theta_{\text{с}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{с}}(t) - \theta_{\text{вн}}(t)}{R_1} = \Delta P_{\text{хх}}(t). \end{cases} \quad (6)$$

С учетом системы уравнений (6) синтезируем тепловую схему замещения, считая каждое уравнение суммой «тепловых токов» по закону Кирхгофа в узлах схемы (рис. 2).

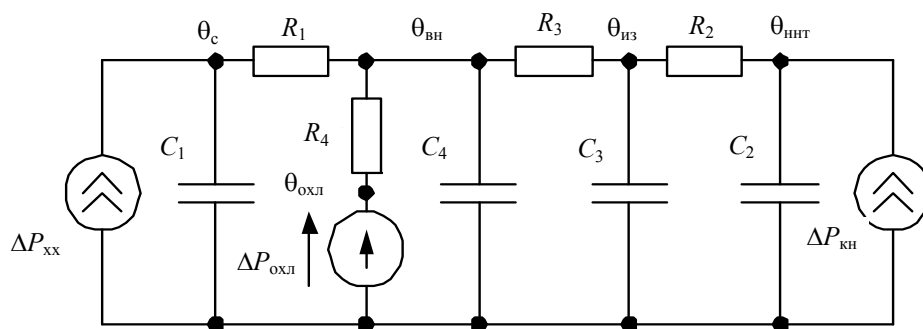


Рис. 2. Тепловая схема замещения силового сухого трансформатора

В соответствии с тепловой схемой замещения (рис. 2) можно рассчитать температуры внутренней охлаждающей среды, изоляции, обмотки и магнитопровода основываясь на методах, применимых для расчета электрических цепей.

На основании тепловой схемы замещения (рис. 2) получим выражения в операторной форме записи для температуры магнитопровода $\theta_c(p)$, температуры обмотки $\theta_{\text{ннт}}(p)$, температура изоляции $\theta_{\text{из}}(p)$ и температуры внутренней охлаждающей среды $\theta_{\text{вн}}(p)$.

$$\theta_c(p) = \frac{\Delta P_{\text{кх}} R_4 + \Delta P_{\text{хх}} ((1 + pT_{33})(1 + pT_{22})(R_1(1 + pT_{44}) + R_4)) + R_3 p T_{12} (1 + pT_{44})}{H(p)} + \frac{\Delta P_{\text{хх}} p R_4 (T_{13}(1 + pT_{22}) + (T_{12} + T_{32})) + \theta_{\text{охл}} ((1 + pT_{22})(1 + pT_{33}) + pT_{32})}{H(p)}, \quad (7)$$

$$\theta_{\text{ннт}}(p) = \frac{\Delta P_{\text{кх}} ((1 + pT_{11})(1 + pT_{44})(1 + pT_{33})R_2 + R_3) + R_4(1 + pT_{23})}{H(p)} + \frac{\Delta P_{\text{кх}} (R_4 p (T_{31} + T_{21}(1 + pT_{33}))) + \Delta P_{\text{хх}} R_4 + \theta_{\text{охл}} (1 + pT_{11})}{H(p)}, \quad (8)$$

$$\theta_{\text{из}}(p) = \frac{\Delta P_{\text{кх}} (R_3(1 + pT_{11})(1 + pT_{44}) + R_4(1 + p(T_{11} + T_{31})))}{H(p)} + \frac{\Delta P_{\text{хх}} R_4(1 + pT_{22}) + \theta_{\text{охл}}(p)(1 + pT_{11})(1 + pT_{22})}{H(p)}, \quad (9)$$

$$\theta_{\text{вн}}(p) = \frac{\Delta P_{\text{кх}} R_4(1 + pT_{11}) + \Delta P_{\text{хх}} R_4(pT_{32} + (1 + pT_{22})(1 + pT_{33}))}{H(p)} + \frac{\theta_{\text{охл}}(p)((1 + pT_{11})(1 + pT_{22})(1 + pT_{33}) + pT_{32}(1 + pT_{11}))}{H(p)}, \quad (10)$$

где

$$H(p) = p^4 T T_1 + p^3 T T_2 + p^2 T T_3 + p T T_4 + 1, \quad (11)$$

где

$$T T_1 = T_{11} \cdot T_{22} \cdot T_{33} \cdot T_{44},$$

$$T T_2 = ((T_{22} + T_{11}) \cdot T_{33} + T_{11} \cdot T_{22} + T_{11} \cdot T_{32}) \cdot T_{44} + (T_{11} + T_{41}) \cdot T_{22} \cdot T_{33} + T_{11} \cdot T_{22} \cdot T_{43},$$

$$TT_3 = (T_{33} + T_{11} + T_{22} + T_{32}) \cdot T_{44} + (T_{22} + T_{11}) \cdot T_{33} + (T_{42} + T_{43} + T_{32}) \cdot T_{11} + (T_{11} + T_{41} + T_{43}) \cdot T_{22} + T_{31} \cdot T_{43} + T_{32} \cdot T_{41}, \quad (12)$$

$$TT_4 = T_{43} + T_{33} + T_{22} + T_{11} + T_{42} + T_{32} + T_{44} + T_{41},$$

где

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= R_1 \cdot C_1, T_{12} = R_1 \cdot C_2, T_{13} = R_1 \cdot C_3, T_{14} = R_1 \cdot C_4, \\ T_{21} &= R_2 \cdot C_1, T_{22} = R_2 \cdot C_2, T_{23} = R_2 \cdot C_3, T_{24} = R_2 \cdot C_4, \\ T_{31} &= R_3 \cdot C_1, T_{32} = R_3 \cdot C_2, T_{33} = R_3 \cdot C_3, T_{34} = R_3 \cdot C_4, \\ T_{41} &= R_4 \cdot C_1, T_{42} = R_4 \cdot C_2, T_{43} = R_4 \cdot C_3, T_{44} = R_4 \cdot C_4. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Зная изображения из выражений (7)–(10), можно найти оригиналы. При нахождении оригиналов примем, что трансформатор включается из холодного состояния, т. е. потери холостого хода и короткого замыкания возникают скачком:

$$\Delta P_{\text{кн}}(p) = \frac{\Delta P_{\text{кн}}}{p}; \quad \Delta P_{\text{xx}}(p) = \frac{\Delta P_{\text{xx}}}{p}. \quad (14)$$

Тогда без учета температуры внешней охлаждающей среды ($\Delta P_{\text{охл}} = 0$) выражения для температур магнитопровода $\theta_c(t)$ и обмотки $\theta_{\text{ннт}}(t)$ будут иметь вид:

$$\theta_c = \Delta P_{\text{xx}}(R_1 + R_4) + \Delta P_{\text{кн}} \cdot R_4 + \sum_{i=0}^3 \theta_{11}(p_i) \exp(p_i t) + \sum_{i=0}^3 \theta_{12}(p_i) \exp(p_i t), \quad (15)$$

$$\theta_{\text{ннт}} = \Delta P_{\text{кн}}(R_2 + R_3 + R_4) + \Delta P_{\text{xx}} \cdot R_4 + \sum_{i=0}^3 \theta_{21}(p_i) \exp(p_i t) + \sum_{i=0}^3 \theta_{22}(p_i) \exp(p_i t), \quad (16)$$

$$\theta_{\text{из}} = \Delta P_{\text{кн}}(R_3 + R_4) + \Delta P_{\text{xx}} \cdot R_4 + \sum_{i=0}^3 \theta_{31}(p_i) \exp(p_i t) + \sum_{i=0}^3 \theta_{32}(p_i) \exp(p_i t), \quad (17)$$

$$\theta_{\text{вн}} = \Delta P_{\text{кн}} R_4 + \Delta P_{\text{xx}} \cdot R_4 + \sum_{i=0}^3 \theta_{41}(p_i) \exp(p_i t) + \sum_{i=0}^3 \theta_{42}(p_i) \exp(p_i t), \quad (18)$$

где

$$\theta_{11}(p_i) = \frac{R_4 \Delta P_{\text{кн}}}{p_i (4p_i^2 TT_1 + 3p_i^2 TT_2 + 2p_i TT_3 + TT_4)}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \theta_{12}(p_i) &= \frac{\Delta P_{\text{xx}} (p_i^3 T_{22} R_1 T_{33} T_{44} + ((T_{13} + T_{33}) T_{22} R_4 + ((T_{33} + T_{22}) T_{44} + T_{22} T_{33}) R_1 + T_{12} R_3 T_{44}) p_i^2)}{p_i (4p_i^2 TT_1 + 3p_i^2 TT_2 + 2p_i TT_3 + TT_4)} + \\ &+ \frac{\Delta P_{\text{xx}} (((T_{32} + T_{12} + T_{13} + T_{22} + T_{33}) R_4 + (T_{22} + T_{33} + T_{44}) R_1 + T_{12} R_3) p_i + (R_1 + R_4))}{p_i (4p_i^2 TT_1 + 3p_i^2 TT_2 + 2p_i TT_3 + TT_4)}. \end{aligned}$$

$$\theta_{21}(p_i) = \frac{R_4 \Delta P_{\text{xx}}}{p_i (4p_i^2 TT_1 + 3p_i^2 TT_2 + 2p_i TT_3 + TT_4)}, \quad (20)$$

$$\theta_{22}(p_i) = \frac{\Delta P_{\text{кн}} (p_i^3 T_{11} R_2 T_{33} T_{44} + ((T_{11} T_{23} + T_{21} T_{33}) R_4 + (T_{11} (T_{44} + T_{33}) + T_{33} T_{44}) R_2 + T_{11} R_3 T_{44}) p_i^2)}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)} +$$

$$+ \frac{\Delta P_{\text{кн}} (((T_{31} + T_{21} + T_{23} + T_{11}) R_4 + (T_{11} + T_{44}) R_3 + (T_{33} + T_{11} + T_{44}) R_2) p_i + (R_2 + R_3 + R_4))}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)},$$

$$\theta_{31}(p_i) = \frac{(1 + T_{22} p_i) R_4 \Delta P_{\text{xx}}}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)}, \quad (21)$$

$$\theta_{32}(p_i) = \frac{T_{11} R_3 T_{44} p_i^2 + (((T_{11} + T_{31}) R_4 + (T_{11} + T_{44}) R_3) p_i + (R_3 + R_4)) R_4 \Delta P_{\text{кн}}}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)}.$$

$$\theta_{41}(p_i) = \frac{((T_{33} + T_{32} + T_{22}) p_i + T_{22} T_{33} p_i^2 + 1) R_4 P_{\text{xx}}}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)}, \quad (22)$$

$$\theta_{42}(p_i) = \frac{(1 + T_{11} p_i) R_4 P_{\text{кн}}}{p_i (4 p_i^2 T T_1 + 3 p_i^2 T T_2 + 2 p_i T T_3 + T T_4)},$$

где p_i – корни характеристического уравнения.

Тепловые сопротивления схемы замещения (рис. 2) могут быть найдены на основе опытных данных в установившемся режиме. В установившемся тепловом режиме тепловая схема замещения (рис. 2) упростится к виду (рис. 3).

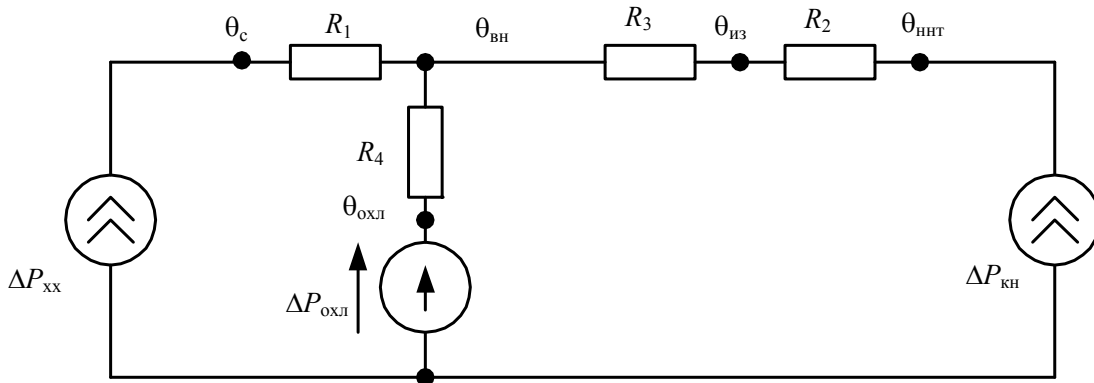


Рис. 3. Тепловая схема замещения силового сухого трансформатора в установившемся тепловом режиме

Предположим, что температуры θ_c , $\theta_{\text{ннт}}$, $\theta_{\text{из}}$, $\theta_{\text{вн}}$ и $\theta_{\text{охл}}$ известны из опыта, тогда тепловые сопротивления могут быть найдены по выражениям:

$$R_1 = \frac{\theta_c - \theta_{\text{вн}}}{\Delta P_{\text{xx}}}, \quad R_2 = \frac{\theta_{\text{ннт}} - \theta_{\text{из}}}{\Delta P_{\text{кн}}}, \quad R_3 = \frac{\theta_{\text{из}} - \theta_{\text{вн}}}{\Delta P_{\text{кн}}}, \quad R_4 = \frac{\theta_{\text{вн}} - \theta_{\text{охл}}}{\Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{xx}}}. \quad (23)$$

Потери холостого хода ΔP_{xx} и нагрузочные потери $\Delta P_{\text{кн}}$ находятся на основании каталожных данных трансформатора и значения текущей нагрузки. Теплоемкости находят на основании известных масс элементов трансформатора по выражениям:

$$C_1 = C_{\text{удвн}} \cdot G_{\text{вн}}, \quad C_2 = C_{\text{удиз}} \cdot G_{\text{из}}, \quad C_3 = C_{\text{удобм}} \cdot G_{\text{обм}}, \quad C_4 = C_{\text{удс}} \cdot G_{\text{с}}, \quad (24)$$

где $C_{удвн}$, $C_{удиз}$, $C_{удобм}$, $C_{удс}$ – удельные теплоемкости внутренней охлаждающей среды, изоляции, обмотки и магнитопровода соответственно; $G_{удвн}$, $G_{удиз}$, $G_{удобм}$, $G_{удс}$ – массы внутренней охлаждающей среды, изоляции, обмотки и магнитопровода соответственно.

Оценим адекватность тепловой модели на основе экспериментальных данных, полученных авторами статьи в результате исследования тепловых процессов в сухом незащищенном трансформаторе ТС-0,4/0,38. Для этой цели построим теоретические и экспериментальные кривые нагрева основных элементов трансформатора (рис. 4).

На рис. 4 кривые, полученные по тепловой модели, показаны сплошными линиями, кривые, полученные на основании экспериментальных данных – пунктирными линиями. При этом для зависимостей, изображенных на рис. 4, приведенная погрешность приближения находится в диапазоне от 1,9 до 2,4 %.

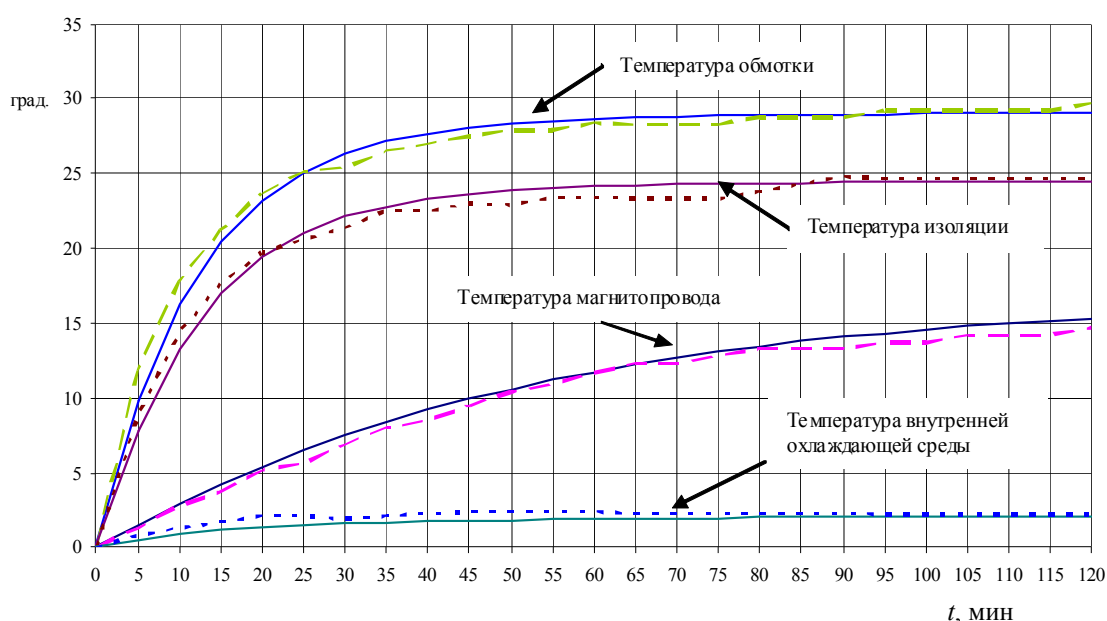


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные температуры внутренней охлаждающей среды, магнитопровода, изоляции и обмотки

Заключение

Предложенная тепловая модель силового сухого трансформатора (6) является полной, т. к. рассматривает силовой сухой трансформатор в тепловом отношении как совокупность ряда однородных тел: магнитопровод, обмотка, изоляция, внутренняя охлаждающая среда и внешняя охлаждающая среда.

Модель универсальна, т. к. описывает тепловые процессы в незащищенном силовом сухом трансформаторе и силовом сухом трансформаторе, помещенном в защитный кожух.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность предложенной тепловой модели (рис. 4) со значением приведенной погрешности приближения $\delta = 2,4$ %.

Литература

1. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки : ГОСТ 14209-85. – Москва : Гос. ком. СССР по стандартизации, 1987.

2. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш. – Москва : Энергоатомиздат, 1980.
3. Рунов, Ю. А. Учет температуры внешней охлаждающей среды при моделировании тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах / Ю. А. Рунов // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – Минск, 2004. – № 5. – С. 42–47.
4. Руководство по нагрузке силовых сухих трансформаторов : ГОСТ 30221-97. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2005.
5. Лось, Д. М. Тепловые процессы в силовом сухом трансформаторе. Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования : Материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Д. М. Лось, О. Г. Широков. – Томск, 2008. – С. 84–85.

Получено 19.11.2008 г.