

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ТРАНСФОРМАТОРА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ, МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

Валуйских А.О., Дулькин И.Н., канд. техн. наук,

Филиппов А.А., канд. техн. наук,

Цфасман Г.М., канд. техн. наук, ФГУП ВЭИ, г. Москва

В состав программного обеспечения современных систем мониторинга и диагностики состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов¹⁾ включаются модели для расчета их теплового режима. Модель осуществляет непрерывный расчет температуры верхних слоев масла (ВСМ) и температуры наиболее нагретой точки обмотки (ННТ). Эти параметры используются затем для расчетов содержания влаги в целлюлозной изоляции, температуры образования пузырьков газа в изоляции, старения изоляции, допустимых перегрузок оборудования. Сравнение расчетных и измеренных значений температуры ВСМ, а также температуры на входе и выходе масла в охладителях используется также для диагностики состояния системы охлаждения.

В настоящее время для построения подобных моделей общепринятой является методика, изложенная в публикации МЭК 60076-7 (редакция 2005 г.) [1]. Однако ряд параметров, используемых в тепловой модели в соответствии с этой методикой, обычно известен с малой точностью и, как правило, только для nominalного режима работы системы охлаждения (СО) трансформатора. В то же время для трансформаторов большой мощности характерно разнообразие режимов охлаждения, различающихся по числу включенных маслонасосов и вентиляторов обдува, что требует изменения параметров модели при смене режимов.

Цель настоящей работы — уточнение алгоритмов тепловой модели трансформаторов для повышения точности моделирования и учета конкретных особенностей СО и ее режимов. Рассматриваются упрощенные соотношения для понимания физики основных процессов и получения качественно правильной тепловой модели с учетом изменения ее параметров при изменении температур масла и воздуха и при смене режимов СО. Построение модели в данной работе основано на

¹⁾ далее для всех видов трансформаторного оборудования используется термин «трансформатор».

использовании обобщенных данных по трансформатору и его системе охлаждения, предоставляемых заводом-изготовителем.

Особенностью предлагаемой модели является совмещение процедуры пошагового интегрирования системы разностных уравнений, описывающих динамику тепловых процессов, с итерационным уточнением параметров этих уравнений, зависящих (но не очень сильно) от выходных переменных через значения этих переменных, полученных на предыдущем шаге расчета.

Потоки масла в системе охлаждения

Рассмотрим обобщенную структуру системы охлаждения трансформатора, включающую в себя бак с маслом, в котором размещена активная часть — магнитопровод и обмотки, а также набор охлаждающих устройств («охладители»), каждый из которых в общем случае содержит маслонасос и вентиляторы обдува. Гидравлическая схема замещения такой системы [5] показана на рис. 1.

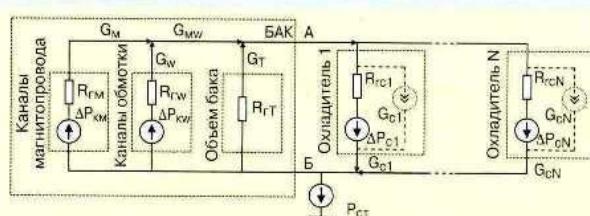


Рис. 1

На этой схеме выделены потоки масла через охлаждающие каналы магнитопровода (поток G_M), через охлаждающие каналы обмотки (поток G_W), через свободный объем бака мимо активных частей (поток G_T). Эти потоки сходятся в общий поток, расходящийся далее на N охладителей. Поток масла в каждом из них обозначен как G_{ci} , $i = 1 \dots N$.

Распределение потоков по каналам определяется имеющимися перепадами давления (ΔP) и гидравлическими сопротивлениями отдельных каналов (R_f). Одноковое для всех каналов гидростатическое давление P_{ct} , определяемое высотой объема масла в трансформаторе, вынесено за пределы гидравлических контуров.

В качестве движущих сил на схеме показаны перепады давления в охлаждающих каналах магнитопровода ΔP_{km} и обмотки ΔP_{kw} , обусловленные естественной конвекцией в соответствующих циркуляционных контурах (так называемые «подъемные силы»), и перепады давления ΔP_{ci} , создаваемые маслонасосами охладителей. В некоторых случаях для систем типа ДЦ известен не перепад давления, создаваемый насосом, а расход масла через насос. Для учета этих вариантов в ветвях охладителей добавлены источники потока G_{ci} . В каналах магнитопровода и обмотки перепады ΔP_{km} , ΔP_{kw} и сопротивления R_{km} , R_{kw} также могут быть заменены источниками потоков G_m и G_w , которые в рассматриваемой далее модели могут быть вычислены независимо.

Настройка модели для различных режимов системы охлаждения заключается в задании значений сопротивлений и источников, после чего методами теории цепей определяются неизвестные потоки.

Теплопередача охладителей

Для масляно-воздушного охладителя, через который в вертикальном направлении сверху вниз прокачивается масло с массовым расходом G_c , а в горизонтальном направлении охладитель обдувается воздухом с помощью вентиляторов, соотношение между превышениями температуры масла на входе ($\Delta\theta_o = \theta_o - \theta_a$) и выходе охладителя ($\Delta\theta_h = \theta_h - \theta_a$) над температурой воздуха определяется выражением [5]

$$\Delta\theta_h = \xi \cdot \Delta\theta_o, \quad (1)$$

где

$$\xi = e^{-kF/(G_c c_m)}, \quad (2)$$

а тепловой поток W_c , отдаваемый охладителем в воздух, соотношением

$$W_c = kF \frac{1 - \xi}{-\ln \xi} \Delta\theta_o = G_c c_m (1 - \xi) \Delta\theta_o. \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3) θ_o , θ_h — температуры масла на входе и выходе охладителя, θ_a — температура окружающего воздуха, c_m — удельная теплоемкость масла, k — коэффициент теплопередачи между маслом и воздухом, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, F — площадь теплопередающей поверхности охладителя.

Принимая распределение температуры масла по высоте линейным, можем выразить тепловой поток через превышение средней температуры масла над воздухом $\Delta\theta_m = (\Delta\theta_o + \Delta\theta_h)/2$:

$$W_c = g_{Tc} \Delta\theta_m, \quad (4)$$

где тепловая проводимость охладителя относительно среднего перепада температуры

$$g_{Tc} = 2kF \frac{\xi - 1}{(\xi + 1) \cdot \ln \xi} = 2G_c c_m \frac{1 - \xi}{1 + \xi}. \quad (5)$$

С ростом расхода масла ($\xi \rightarrow 1$) разность температур масла на входе и выходе охладителя стремится к нулю, а тепловая проводимость охладителя — к ее очевидному предельному значению $g_{Tc \max} = kF$.

Входящий в приведенные выше соотношения коэффициент теплопередачи охладителя к воздуху k определяется в основном коэффициентом теплоотдачи к воздуху от температуры воздуха, а удельная теплоемкость масла c_m — соответственно от температуры масла.

Зависимость коэффициента теплопередачи радиатора от температуры воздуха в диапазоне $\theta_a = \pm 50^\circ\text{C}$ можно по данным [4] аппроксимировать с точностью не ниже 0,2% функцией (при $k = k_r$ для $\theta_a = \theta_{ar} = 20^\circ\text{C}$)

$$f_{ca}(\theta_a) = k/k_r \approx 1 - 23 \cdot 10^{-4}(\theta_a - \theta_{ar}) + 11 \cdot 10^{-6}(\theta_a - \theta_{ar})^2 - 3 \cdot 10^{-8}(\theta_a - \theta_{ar})^3. \quad (6)$$

Зависимость удельной теплоемкости масла от температуры в разных источниках описывается различными линейными зависимостями. Для расчетов можно принять аппроксимацию, среднюю между данными Форча и Уитмена и данными Экарта ([2], с. 69) в виде

$$f_{cm}(\theta_m) = c_m/c_{mr} = 1 + 5,45 \cdot (\theta_m - \theta_{mr})/c_{mr}, \quad (7)$$

где c_{mr} — значение c_m при номинальной температуре масла θ_{mr} .

С учетом приведенных зависимостей при моделировании коэффициент ξ можно на каждом шаге пересчитывать по выражению

$$\xi = e^{-kF \cdot f_{ca}(\theta_a)/(G_c c_m f_{cm}(\theta_m))}. \quad (8)$$

Для режима охлаждения М (естественная конвекция воздуха) плотность теплового потока радиатора $q_c = k \cdot \Delta\theta_m$ задается обычно в виде (см. [8], табл. 13)

$$q_c = A \cdot \Delta\theta_m^{z+1}, \quad (9)$$

где значение показателя z лежит в пределах от 0,2 до 0,224 для различных типов радиаторов. В этом случае можно пользоваться соотношениями (4), (5), если принять

$$k = k_r \Delta\theta_m^z / \theta_{mr}^z, \quad (10)$$

где значения с индексом r относятся к номинальному режиму.

Соотношения (9) и (10) учитывают только перепад температуры между поверхностью радиатора и окружающим воздухом, но не учитывают абсолютную температуру воздуха. В [2] (с. 64) дается более точное соотношение (при $z = 0,25$), которое с учетом наших обозначений приводится к виду

$$k = k_r \cdot [\Delta\theta_m \cdot (\theta_{ar} + 273) / (\Delta\theta_{mr}(\theta_a + 273))]^z. \quad (11)$$

Эта зависимость существенно нелинейна. Однако нелинейность проявляется лишь при малых значениях перепада температуры $\Delta\theta_m$. Поскольку далее коэффициент kF умножается на $\Delta\theta_m$, можно с результатирующей

погрешностью не более 2 % аппроксимировать зависимость (11) линейной функцией

$$\zeta = kF/kF_r = 0,86 + 0,0048 \cdot \Delta\theta_m - 0,00124 \cdot \theta_a . \quad (12)$$

Расчет установившегося теплового режима трансформатора

В работах [6], [7] показано, что наиболее правильной базой для расчета температур в различных точках трансформатора является средняя температура масла в баке.

При разных режимах отдельных охладителей входящая в выражения для определения их теплопередачи средняя температура и температуры на выходе будут, вообще говоря, различными для разных охладителей. Общей для них будет температура на входе, равная температуре верхних слоев масла θ_o . Связь теплового потока, передаваемого n-м охладителем, с этой температурой

$$W_{cn} = g_{Tcn}(1 + \zeta)\Delta\theta_o/2 . \quad (13)$$

Уравнение баланса тепловых потоков, приносимых во все охладители с горячим маслом, уносимых из них охлажденным маслом и отдаваемых ими в воздух, имеет вид

$$G(c_{mo}\Delta\theta_o - c_{mb}\Delta\theta_b) = \sum_{n=1}^N W_{cn} = \Delta\theta_o \sum_{n=1}^N g_{Tcn} \frac{1 + \zeta_n}{2} , \quad (14)$$

где G — суммарный массовый расход масла всех охладителей. Это уравнение позволяет связать превышение средней температуры и температуры нижнего масла в баке с превышением температуры верхних слоев масла

$$\Delta\theta_m = k_m \cdot \Delta\theta_o , \quad (15)$$

$$\Delta\theta_b = (2k_m - 1) \cdot \Delta\theta_o , \quad (16)$$

$$k_m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c_{mo}}{c_{mb}} - \frac{1}{Gc_{mb}} \sum_{n=1}^N g_{Tcn} \frac{1 + \zeta_n}{2} \right) . \quad (17)$$

Тогда суммарный передаваемый всеми охладителями к воздуху тепловой поток составит

$$\sum_{n=1}^N W_{cn} = g_{Tce} \Delta\theta_m , \quad (18)$$

где эквивалентная суммарная тепловая проводимость всех охладителей относительно средней температуры масла

$$g_{Tce} = \frac{1}{2k_m} \sum_{n=1}^N g_{Tcn} (1 + \zeta_n) . \quad (19)$$

Среднюю температуру масла в установившемся режиме найдем из уравнения полного баланса тепловых потоков в системе трансформатор — система охлаждения

$$W_\Pi = W_T + \sum_{n=1}^N W_{cn} = \Delta\theta_m \cdot g_{Te} , \quad (20)$$

где W_Π — полные потери в трансформаторе, W_T — теплоотдача бака, $g_{Te} = (g_{Tce} + g_{TT})$ — эквивалентная суммарная тепловая проводимость между трансформатором с его системой охлаждения и окружающей средой, приведенная к средней температуре масла,

g_{TT} — тепловая проводимость между баком и окружающей средой. Из (20) получаем

$$\Delta\theta_m = W_\Pi/g_{Te} + \theta_a . \quad (21)$$

Суммарные потери в трансформаторе W_Π включают потери холостого хода W_{xx} , слабо зависящие от нагрузки трансформатора, и нагружочные потери (потери короткого замыкания) W_{kz} , пропорциональные квадрату тока нагрузки. Обычно для расчета суммарных потерь используется соотношение

$$W_\Pi = W_{\Pi r}(1 + RK^2)/(1 + R) , \quad (22)$$

где $K = I/I_r$ (I_r — номинальный ток трансформатора), $R = W_{kzr}/W_{xx}$.

В действительности нагружочные потери зависят еще и от активного сопротивления обмоток, которое изменяется с температурой обмоток по закону $r_w = r_{wr} K_R$, где

$$K_R = \frac{1 + \alpha\theta_{wm}}{1 + \alpha\theta_{wmr}} = \frac{235 + \theta_{wm}}{235 + \theta_{wmr}} , \quad (23)$$

где $\alpha \approx 0,00425 1/^\circ C$ — температурный коэффициент сопротивления меди ($1/\alpha \approx 235 ^\circ C$), θ_{wm} , θ_{wmr} — средняя температура обмотки и ее значение в номинальном режиме.

Среднюю температуру обмоток для определения K_R можно взять по результатам, полученным на предшествующем такте расчета, используя соотношение

$$\theta_{wm} = (\theta_i - \theta_b)/2 + \Delta\theta_h , \quad (24)$$

где θ_i — температура масла на выходе из охлаждающих каналов обмоток, $\Delta\theta_h$ — превышение температуры обмотки над температурой масла, которое обычно принимается постоянным по высоте обмотки.

Потери холостого хода разделим на потери в магнитопроводе W_M и добавочные потери в обмотках на вихревые токи W_{BT} . Последние обратно пропорциональны сопротивлению обмоток и могут быть выражены через коэффициент K_R : $W_{BT} = W_{BTr}/K_R$. Обозначая их долю в потерях холостого хода коэффициентом K_f , получим уточненное выражение для определения полных потерь в виде

$$W_\Pi/W_{\Pi r} = K_\Pi = [1 - K_f(1 - 1/K_R) + RK^2 K_R]/(1 + R) . \quad (25)$$

В работе [7] показано, что для всех типов систем охлаждения величину превышения $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_m$ для установившегося режима можно рассчитывать, исходя из его значения $\Delta\theta_{ir}$ в номинальном режиме, используя соотношение

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_{ir} K^y K_R^{0.75} K_v^{0.9} , \quad (26)$$

где K_v — коэффициент, учитывающий изменение кинематической вязкости масла с температурой

$$K_v = (v/v_r)^{0.25} , \quad (27)$$

где v и v_r — кинематическая вязкость масла при температурах θ_i и θ_{ir} , y — «показатель степени для обмотки», указываемый заводом-изготовителем трансформатора или выбираемый по рекомендации МЭК [1] для данного типа трансформатора.

Показатель у приближенно учитывает процессы, связанные с изменением температуры масла в каналах обмотки и скорости его конвективного движения при изменении потерь мощности в обмотке. Использование коэффициента K^y означает зависимость перепада температуры от мощности потерь, пропорциональных K^2 , в степени $y/2$. При учете потерь на вихревые токи вместо K^2 следует использовать коэффициент относительных потерь в обмотке

$$K_w = W_{\Pi w}/W_{\Pi wr} = (K_R K^2 R + K_f/K_R)/(R + K_f) . \quad (28)$$

Тогда вместо (26) получим

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_{ir} K_w^{y/2} K_R^{0.75} K_v^{0.9} . \quad (29)$$

Коэффициент K_v рассчитывается по соотношению

$$v = 1/(A\theta^2 + B\theta + C) . \quad (30)$$

Постоянные коэффициенты в этом соотношении приведены в [7].

Аналогичным образом рассчитывается установившееся превышение $\Delta\theta_h$ температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой горячего масла на выходе из каналов обмотки

$$\Delta\theta_h = \theta_h - \theta_i = \Delta\theta_{hr} K_w^{y/2} K_R^{0.75} K_v^{0.9} . \quad (31)$$

Уравнения динамики системы охлаждения

В переходных режимах баланс тепловых потоков (20) нарушается, и разность между выделенной в трансформаторе и данной в окружающую среду теплотой идет на изменение температуры различных частей трансформатора.

Постоянная времени всего трансформатора (обычно ее называют постоянной времени масла и обозначают τ_o) составляет от нескольких десятков до сотен минут, и значительно превышает постоянную времени обмотки τ_w (обычно от 7 до 15 минут). Поэтому динамику изменения средней температуры масла можно считать не зависящей от динамики изменения температуры обмотки, полагая, что на временах, сопоставимых с τ_o , весь небаланс тепловых потоков идет на изменение средней температуры. Процесс описывается линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка

$$C_T \cdot d\theta_m/dt = W_\Pi - W_{\Pi o} = W_\Pi - g_{Te} \theta_m + g_{Te} \theta_a , \quad (32)$$

где C_T — суммарная теплоемкость трансформатора. С учетом (21) и (25) получим

$$(C_T/g_{Te}) \cdot d\theta_m/dt = (K_\Pi g_{Ter}/g_{Te}) \Delta\theta_{mr} - \theta_m + \theta_a , \quad (33)$$

где $g_{Ter} = W_{\Pi r}/\Delta\theta_{Tmr}$ — эквивалентная тепловая проводимость в номинальном режиме. С учетом (15) получим уравнение для превышения температуры ВСМ

$$(C_T/g_{Te}) \cdot d\theta_o/dt = (K_\Pi g_{Ter} K_{mr}/g_{Te} K_m) \Delta\theta_{or} - \theta_o + \theta_a . \quad (34)$$

При неизменных характеристиках СО и коэффициентах K_f и K_R , равных 1, уравнение (33) преобразуется к виду, рекомендованному публикацией МЭК [1]

$$[(1+K^2 R)/(1+R)]^x \Delta\theta_{or} = k_{11} \tau_o \cdot d\theta_o/dt + (\theta_o - \theta_a) , \quad (35)$$

если принять $\tau_o = C_T/g_{Ter}$, $x = k_{11} = 1$, что и рекомендуется для систем охлаждения вида ДЦ (OFAF). Однако при использовании уравнения в таком виде не учитываются изменения параметров СО для разных режимов охлаждения.

При расчете изменений превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки (ТННТ) должны учитываться две составляющих процесса:

1) нагрев обмотки с учетом фактического коэффициента теплоотдачи, то есть тепловой проводимости между обмоткой и маслом в каждый момент времени,

2) разогрев масла в каналах обмотки, сопровождающийся изменением скорости потока масла в каналах и тепловой проводимости между обмоткой и маслом.

В [1] рекомендуется разделить превышение ТННТ над верхним маслом $\Delta\theta_h$ на две составляющих $\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2}$ и использовать два дифференциальных уравнения

$$(\tau_w K_{22}) \cdot d\Delta\theta_{h1}/dt = k_{21} K^y \cdot \Delta\theta_{hr} - \Delta\theta_{h1} , \quad (36)$$

$$(\tau_o K_{22}) \cdot d\Delta\theta_{h2}/dt = (k_{21} - 1) \cdot K^y \cdot \Delta\theta_{hr} - \Delta\theta_{h2} , \quad (37)$$

где τ_w — постоянная времени обмотки. Коэффициенты k_{21} и K_{22} выбираются из приведенной в [1] таблицы в зависимости от типа системы охлаждения.

Представляется физически более правильным использовать превышение ТННТ над средней температурой масла $\Delta\theta_{hm} = \theta_h - \theta_m = \theta_i + \Delta\theta_{hi}$. Установившиеся значения перепадов и определяются соотношениями (26) и (31).

Дифференциальное уравнение для превышения температуры горячего масла на выходе из каналов обмотки запишем тогда в виде

$$\tau_{ow} \cdot d\Delta\theta_i/dt = \Delta\theta_{ir} K_w^{y/2} K_R^{0.75} K_v^{0.9} - \Delta\theta_i , \quad (38)$$

где $\tau_{ow} = \tau_o/K_{22}$. Заметим, что численное значение K_{22} должно быть больше, чем рекомендуется в [1], поскольку учитывается нагрев не всего масла в верхних слоях, а только масла в каналах охлаждения обмоток.

Будем полагать, что с этой же постоянной изменяется тепловая проводимость между обмоткой и маслом g_{wo} . Ее установившееся значение g_{wou} при данном режиме нагрузки будет определяться соотношением $g_{wou} = W_{\Pi w}/\Delta\theta_{hiu}$, или

$$g_{wou} = g_{wor} \cdot K_w^{1-y/2} / K_R^{0.75} K_v^{0.9} , \quad (39)$$

где $g_{wor} = W_{\Pi wr}/\Delta\theta_{hir}$ — тепловая проводимость от обмотки к прилегающему маслу в номинальном установленном режиме.

В итоге дифференциальное уравнение для проводимости g_{wo} запишем аналогично уравнению (38)

$$\tau_{ow} \cdot dg_{wo}/dt = g_{wou} - g_{wo} = g_{wor} \cdot K_w^{1-y/2} / K_R^{0.75} K_v^{0.9} - g_{wo} . \quad (40)$$

Теперь условие баланса энергии, выделяемой, поглощаемой и отводимой от обмотки, даст дифференциальное уравнение для перегрева $\Delta\theta_{hi}$

$$C_w \cdot d\Delta\theta_{hi}/dt = W_{\Pi w} K_w - g_{wo} \cdot \Delta\theta_{hi} , \quad (41)$$

где $C_w = \tau_{wr} \cdot g_{wor}$ — полная теплоемкость обмотки.

Уравнения (33), (34), (40) и (41) полностью описывают динамику тепловых процессов в трансформаторе. Следует отметить, что в этих уравнениях не используется плохо обусловленный эмпирический коэффициент k_{21} , что является дополнительным достоинством предлагаемой методики.

Проверка алгоритма

Для проверки предлагаемого алгоритма моделирования на рис. 2 показаны результаты моделирования процесса нагрева и охлаждения обмотки при изменении коэффициента нагрузки, полученные по предлагаемой методике и по методике [1].

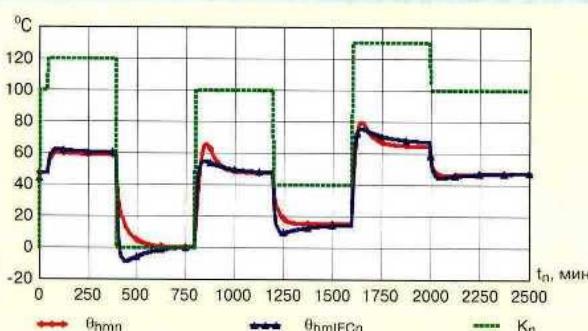


Рис. 2

При моделировании задавались параметры, соответствующие трансформатору ТДЦ-400000/500 для Бурейской ГЭС:

$W_{xx} = 230 \text{ кВт}$, $W_{k3} = 820 \text{ кВт}$; $\theta_{ar} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{mr} = 26^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{or} = 29^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{hr} = 44^\circ\text{C}$; $\tau_w = 15 \text{ мин}$, $\tau_{or} = 120 \text{ мин}$, $K_{21} = 1,3$, $x = 1$, $y = 1,3$.

Коэффициент k_{22} для расчетов по предлагаемой методике принят равным 2, для расчетов по методике [1] — равным 1. Коэффициент дополнительных потерь K_f для простоты был принят равным нулю. Шаг расчетов при моделировании — 5 минут.

На осциллограмме показаны график нагрузки K (в процентах) и превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над средней температурой масла, рассчитанной по предлагаемой методике (θ_{hm}) и по методике [1] (θ_{hmlEC}), в градусах Цельсия. Время на рисунке показано в минутах.

Из рис. 2 видно, что расчеты по двум методикам дают близкие результаты в установившихся режимах, однако переходные процессы совпадают только при небольшом изменении коэффициента нагрузки относительно номинального значения (первый скачок нагрузки от 100 до 120 % на рис. 2). При больших изменениях нагрузки результаты существенно отличаются. Особенно характерен полный сброс нагрузки ($t = 400 \text{ мин}$). Модель [1] показывает при этом охлаждение обмотки на 8°C ниже температуры среднего масла, что противоречит законам термодинамики²⁾.

²⁾ Подобный результат был зафиксирован, в частности, при отключении трансформатора АТДЦН-195000 подстанции Фрунзенская, в системе мониторинга которого реализован алгоритм расчета температуры ННТ по [1].

Предлагаемая модель дает в этом процессе вполне ожидаемый результат — плавное снижение температуры обмотки до средней температуры масла в баке. При резком увеличении нагрузки (моменты времени 800 и 1600 мин на рис. 2), наоборот, уровень временного повышения температуры обмотки, показываемый предлагаемой моделью, существенно выше, чем дает модель [1]. Это отражает хорошо известный факт, что наиболее опасным с точки зрения перегрева обмотки являетсяключение на полную нагрузку холодного трансформатора, когда вязкое холодное масло не обеспечивает эффективного отвода тепла от быстро разогревающейся обмотки.

Полученные результаты объясняются тем, что в модели [1] используется фиксированный коэффициент «перерегулирования» k_{21} , подобранный искусственно для режимов, близких к номинальному. В действительности, описываемые процессы существенно нелинейны, что и приводит к грубым искажениям результатов при значительных резких изменениях режима нагрузки. Фактический уровень перерегулирования при скачке нагрузки определяется в первом приближении величиной приращения потерь, умноженной на разность значений тепловой проводимости обмотка-масло при исходной и конечной температурах масла в каналах охлаждения обмотки, а эта разность сама зависит от величины приращения потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Стандарт МЭК «Силовые трансформаторы. Ч. 7 — Руководство по нагрузке маслонаполненных трансформаторов». Первая редакция. CEI/IEC 60076-7:2005.
- Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. — М.-Л.: ГЭИ, 1961.
- Голунов А.М., Сещенко Н.С. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов. — М.: Энергия, 1976.
- Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. — М.: Энергия, 1980.
- Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Мамиконянц Л.Г., Дулькин И.Н., Соколов В.В., Львов М.Ю., Шифрин Л.Н. Физические аспекты локального повышения температуры в охлаждающих каналах силовых трансформаторов с принудительной циркуляцией масла. — Электричество, 2007, № 1.
- Дулькин И.Н., Люблин И.Ш. Метод теплового расчета обмоток силовых масляных трансформаторов. — Электротехника, 1997, № 2.
- Дулькин И.Н., Люблин И.Ш. Метод расчета максимальных температур обмоток и масла силовых трансформаторов при переменной нагрузке. // Сб. научн. тр. ВЭИ «Высоковольтная и преобразовательная техника». — М.: ВЭИ, 2001.
- Трансформаторы силовые масляные. Тепловой расчет систем охлаждения М и Д. Руководящий документ РД 16 476-88. — Запорожье: ВИТ, 1988.