

УДК 681.518

АДАПТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ

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

Введение

Основное оборудование систем электроснабжения – это генераторы, трансформаторы, провода, кабели, электродвигатели и др. При работе под нагрузкой все эти объекты имеют потери активной мощности, рассеивающиеся, как правило, в виде тепла. В случае перегрузки или внешних аварийных режимов температура их отдельных частей может превысить допустимое значение, т. е. возникнет перегрев. Если же ухудшатся условия охлаждения из-за засорения теплоотводящих путей или вырастут диэлектрические потери в изоляции объекта, то появится его дополнительный, т. е. аномальный нагрев.

С 2010 по 2015 г. автором данной статьи выполнялись госбюджетные НИР [1], [2], посвященные вопросам раннего диагностирования силовых трансформаторов, кабелей и электродвигателей по тепловым параметрам. В этих НИР была выработана общая концепция, в соответствии с которой требуется математическая модель тепловых процессов объекта, позволяющая в реальном времени рассчитывать температуры наиболее нагретых точек его основных частей, и алгоритм выявления аномального нагрева, обусловленного развитием неисправностей в этом объекте. Предложенные методики позволяют обнаружить аномальный нагрев объекта до того, как температуры его частей достигнут критических значений.

При разработке математических моделей тепловых процессов электрооборудования выяснилось, что для их реализации в рамках микропроцессорного прибора необходимы алгоритмы, достаточно простые и в то же время учитывающие реальные параметры объектов. Было предложено сделать математические модели самонастраиваемыми, т. е. адаптивными за счет непрерывного измерения температуры поверхности объекта, температуры окружающей среды, его напряжений и токов и постоянной корректировки параметров модели для расчета его внутренних температур.

Цель данной статьи – обобщение материала по адаптивным математическим моделям тепловых процессов электроэнергетического оборудования для иллюстрации их общих закономерностей.

Обобщенная математическая модель тепловых процессов устройства электроэнергетики

Моделирование тепловых процессов электрооборудования на основе малого количества тепловых однородных тел – достаточно распространенная практика во всем мире. Например, в [3] силовой масляный трансформатор рассматривается как система трех однородных тел: обмотки, масла и магнитопровода. На основе такой модели был создан стандарт МЭК [4] по расчету нагрузочной способности силовых трансформаторов и аналогичный отечественный стандарт ГОСТ 14209–97.

В ГОСТ [5] силовые кабели рассматриваются как система из четырех однородных тел: изоляции жил, поясной изоляции, брони и защитной оболочки. Подобные модели используют и для электродвигателей. Так, в [6] электродвигатель представлен как система из двух однородных тел: статора и ротора.

Учитывая имеющийся в литературе материал, а также модели, созданные ранее автором, разработаем обобщенную математическую модель тепловых процессов, которая может быть использована практически для любого устройства системы электроснабжения.

Как показано в [1], [2], порядок характеристического уравнения модели не должен быть выше четырех, так как в противном случае вывод аналитических расчетных соотношений, необходимых для построения алгоритмов диагностирования, практически невозможен из-за их громоздкости. Соответственно, количество тепловых однородных тел, в которых учитываются теплоемкости, должно быть не выше четырех.

В каждой модели требуется наличие однородного тела, характеризующего теплообмен моделируемого объекта с окружающей средой. В [1], [2] такое однородное тело предложено называть «внутренняя окружающая среда» в том смысле, что оно моделирует часть окружающей среды, температура которой зависит от температуры поверхности объекта. Так, например, для силовых трансформаторов это будет часть окружающего их поверхность воздуха, а для силовых кабелей, проложенных в траншеях, – часть грунта.

Итак, из возможных четырех однородных тел одно будет характеризовать внутреннюю окружающую среду, а оставшиеся три – основные элементы конструкции моделируемого объекта. Назовем условно эти тела «Элемент 1», «Элемент 2» и «Элемент 3». На рис. 1. показана структурная схема тепловых процессов в такой системе.



Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов

Пусть каждый i -й элемент моделируемого объекта имеет температуру наиболее нагретой точки θ_i , теплоемкость C_i и потери активной мощности P_i . Пусть также тепловые сопротивления между i -м и j -м однородными телами будут равны $R_{i,j}$.

Потери P_4 в однородном теле «внутренняя окружающая среда» являются условными и необходимы для работы адаптивного алгоритма, что будет показано ниже. Иногда в состав этого тела требуется ввести металлический корпус объекта, как,

например, это сделано в [7] для электродвигателя. В таком случае потери P_4 можно принять равными потерям в корпусе.

Очевидно, что в работающей электроустановке наиболее нагретая точка для внутренней охлаждающей среды будет находиться максимально близко к объекту и как можно выше от его основания из-за стремления конвективных составляющих теплового потока вверх.

Таким образом, примем температуру θ_4 равной температуре некоторой точки в верхней части поверхности объекта, где возможна установка датчика. Например, для силового трансформатора это будет верх боковой поверхности его бака, а для двигателя – верх его станины. В предлагаемой методике некритично, если данная точка не окажется максимально нагретой.

Температура внешней охлаждающей среды θ_5 не зависит от температуры моделируемого объекта и должна измеряться на минимальном удалении от объекта на уровне прямой, проведенной между его центром и точкой измерения температуры θ_4 .

Направления условных тепловых потоков между однородными телами на рис. 1 показаны стрелками. Очевидно, что при изменении соотношения между температурами будут изменяться и эти направления. Подчеркнем, что речь идет об обобщенной модели, в которой рассматривается максимум путей теплообмена. В реальных объектах часть этих путей будет отсутствовать.

В большинстве случаев однородные тела для элементов моделируемого объекта могут быть представлены либо в виде цилиндров, либо в виде параллелепипедов [1], [2]. Чаще встречается первый случай, так как многие устройства электроэнергетики имеют форму, близкую к цилиндрической. На рис. 2 показана система вложенных цилиндров, которая может быть использована для одножильного силового кабеля, электродвигателя или конденсатора.

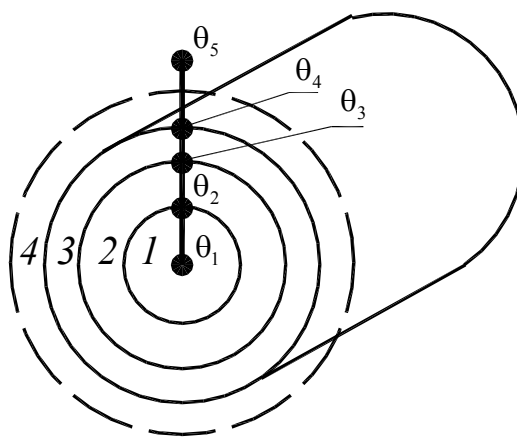


Рис. 2. Пример объекта с системой цилиндрических однородных тел

Для расчета нестационарных тепловых процессов будем рассматривать одномерную модель с линейными параметрами. Температуры для каждого однородного тела будем определять только в одной точке, где предполагается наибольший нагрев (рис. 2). Учитывая это, а также в соответствии с первым началом термодинамики схема тепловых процессов, приведенная на рис. 1, будет описываться следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{1,2}} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{1,3}} + \frac{\theta_1 - \theta_4}{R_{1,4}} &= P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{1,2}} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{2,3}} + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{2,4}} &= P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{1,3}} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{2,3}} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_{3,4}} &= P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_4}{R_{1,4}} + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{2,4}} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_{3,4}} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_{4,5}} &= P_4. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Для объекта со структурой, аналогичной указанной на рис. 2, части слагаемых в системе (1) не будет из-за отсутствия соответствующих тепловых потоков.

Система (1), записанная в форме Коши, может быть решена стандартными численными методами, такими как метод Рунге–Кутты. Однако при построении адаптивной модели требуются аналитические выражения для расчетных температур.

Вывод расчетных соотношений удобно выполнять на основе метода электрических аналогий, синтезировав из системы (1) тепловую схему замещения моделируемого объекта [1], [2]. Эта схема изображена на рис. 3.

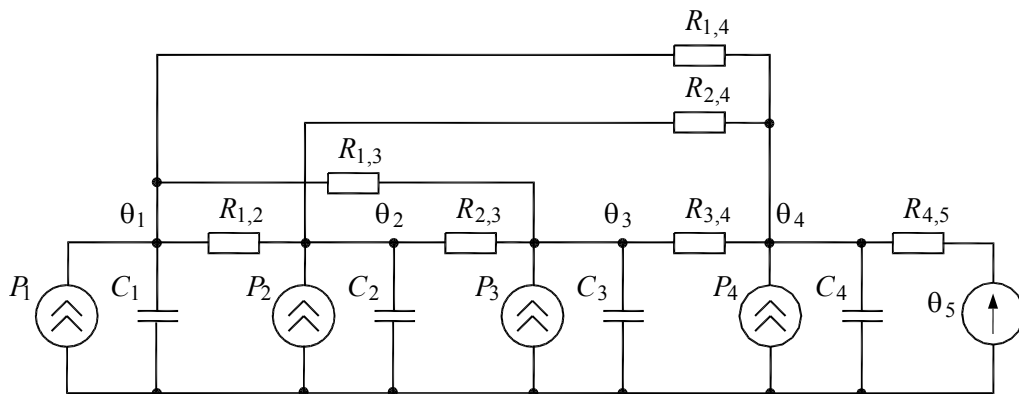


Рис. 3. Тепловая схема замещения

В тепловой схеме замещения токам соответствуют тепловые потоки, напряжениям – температуры, сопротивлениям – тепловые сопротивления, емкостям – теплоемкости.

В случае использования такой схемы удобство вывода аналитических выражений заключается в возможности применения метода наложения, применяемого в электротехнике. То есть вывод формул можно выполнить для каждого источника тока или напряжения в отдельности, сложив затем результаты. Это особенно актуально для систем четвертого порядка, выражения в которых получаются очень громоздкими.

Выполнив необходимые преобразования, для i -й температуры в операторной форме можно записать:

$$\theta_i(p) = \frac{\sum_{m=1}^4 \sum_{k=0}^3 b_{j,k} \cdot p^k \cdot P_m(p) + \sum_{k=0}^3 c_k \cdot p^k \cdot \theta_5(p)}{\sum_{k=0}^4 a_k \cdot p^k}, \quad i \in [1; 4], \quad (2)$$

где p – оператор преобразования Лапласа; a_k – коэффициенты характеристического уравнения; $b_{j,k}$ – коэффициенты влияния потерь активной мощности; c_k – коэффициенты влияния температуры внешней охлаждающей среды.

Найдя оригинал выражения (2) и переходя к дискретным отсчетам времени, получим алгоритм расчета i -й температуры:

$$\begin{cases} \theta_{i,j} = \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 \vartheta_{i,k,m,j} + \sum_{k=1}^4 \vartheta_{i,k,5,j}; \\ \vartheta_{i,k,m,j} = h_{i,k,m} \cdot P_{m,j} + (\vartheta_{i,k,m,j-1} - h_{i,k,m} \cdot P_{m,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}; \\ \vartheta_{i,k,5,j} = h_{i,k,5} \cdot \theta_{5,j} + (\vartheta_{i,k,5,j-1} - h_{i,k,5} \cdot \theta_{5,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}; \\ i \in [1; 4], \end{cases} \quad (3)$$

где j – номер расчетного интервала; k – номер экспоненциальной составляющей теплового процесса; m – номер потерь активной мощности; τ_k – постоянные времени экспоненциальных составляющих; $\vartheta_{i,k,m,j}$ – составляющие расчетной температуры от потерь активной мощности; $\vartheta_{i,k,5,j}$ – составляющие расчетной температуры от температуры внешней охлаждающей среды; $h_{i,k,m}$, $h_{i,k,5}$ – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа на основе соотношения (2); Δt – интервал времени между j -м и $j + 1$ -м расчетными интервалами (период дискретизации).

Алгоритм (3) позволяет вести расчет температур в реальном времени вне зависимости от характера изменения потерь и температуры внешней охлаждающей среды.

Алгоритм для адаптации математической модели к реальным параметрам устройства электроэнергетики

Предложенная обобщенная математическая модель не учитывает многие существенные факторы, влияющие на реальные тепловые процессы в моделируемом объекте. Во-первых, это отсутствие однородности тепловых параметров его элементов, а также зависимость тепловых сопротивлений от температуры; во-вторых – влияние конвективных и электромагнитных процессов, теплового излучения и других факторов. А в таких объектах, как электрические машины, тепловые процессы имеют настолько сложный характер, что сделать их теоретический расчет с высокой точностью практически невозможно.

В [1], [2], [7] разработаны адаптивные модели для силовых трансформаторов, кабелей и электродвигателей, способные автоматически подстраиваться к реальным тепловым параметрам этих объектов. В таких моделях имеются единые требования: измерение температуры поверхности объекта, температуры внешней охлаждающей среды и, при необходимости, значений токов и напряжений. Затем осуществляется расчет адаптирующего параметра и требуемых температур.

В качестве адаптирующего параметра будем использовать варьируемый коэффициент K_j , умножаемый на потери активной мощности во втором уравнении системы (3) следующим образом:

$$\vartheta_{i,k,m,j} = h_{i,k,m} \cdot K_j \cdot P_{m,j} + (\vartheta_{i,k,m,j-1} - h_{i,k,m} \cdot K_j \cdot P_{m,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}. \quad (4)$$

Сформулируем гипотезу: в результате косвенного расчета коэффициента K_j на основе непосредственно измеряемой температуры поверхности объекта θ_4 и использовании этого коэффициента при расчете температур $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ отклонение параметров исходной модели от реальных тепловых параметров объекта будет частично компенсировано за счет оптимального изменения коэффициентов при экспоненциальных составляющих.

Приведем аналитическое обоснование этой гипотезы.

Подставим (4) в первое уравнение алгоритма (3) и выразим коэффициент K_j по отношению к температуре $\theta_{4,j}$. Учитывая, что эта температура должна измеряться на поверхности моделируемого объекта, в результате получим:

$$K_j = \frac{\theta_{\text{рл},4,j} - \sum_{k=1}^4 \left(\vartheta_{4,k,5,j} + \sum_{m=1}^4 \vartheta_{4,k,m,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta}{\tau_k}} \right)}{\sum_{k=1}^4 \left[\left(\sum_{m=1}^4 P_{m,j} \cdot h_{4,k,m} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta}{\tau_k}} \right) \right]}, \quad (5)$$

где $\theta_{\text{рл},4,j}$ – реально измеренные значения температуры поверхности объекта.

Полученные на каждом j -м шаге значения K_j необходимо подставлять в (4) и (3) для расчета температур $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

Предположим, что реальные тепловые процессы в моделируемом объекте с некоторой точностью могут быть представлены в виде суммы четырех экспоненциальных составляющих с параметрами, отличающимися от соответствующих параметров математической модели четвертого порядка. Тогда из (5) следует, что коэффициент K_j представляет собой сумму коэффициентов по экспоненциальным составляющим:

$$K_j = \sum_{k=1}^4 K_{k,j}. \quad (6)$$

Обоснование проведем для первой экспоненциальной составляющей температур θ_3 и θ_4 в соответствии с алгоритмами (3)–(5) и соотношением (6), предполагая, что аналогичная ситуация будет наблюдаться и для остальных экспонент. При этом для упрощения будем считать, что температура внешней окружающей среды θ_5 постоянна и равна 0°C , и, следовательно, все ее слагаемые также равны: $\vartheta_{4,k,5,j} = 0^\circ\text{C}$. Потери P_2, P_3 и P_4 примем равными 0 Вт, т. е. составляющие температур равны: $\vartheta_{4,k,2,j} = \vartheta_{4,k,3,j} = \vartheta_{4,k,4,j} = 0^\circ\text{C}$.

Для экспоненциальных составляющих реальных значений температур θ_3 и θ_4 будем использовать дополнительный индекс «рл», т. е. «реальный». Тогда алгоритм (5) переписывается в виде:

$$K_{1,j} = \frac{\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j} - \vartheta_{4,1,1,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta}{\tau_1}}}{P_{1,j} \cdot h_{4,1,1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta}{\tau_1}} \right)}, \quad (7)$$

где $\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j}$ – первая экспоненциальная составляющая первого слагаемого температуры $\theta_{\text{рл},4,j}$.

Выражения для соответствующих слагаемых реальных температур $\theta_{\text{рл},3,j}$ и $\theta_{\text{рл},4,j}$ запишутся следующим образом:

$$\vartheta_{\text{рл},3,1,1,j} = h_{\text{рл},3,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\vartheta_{\text{рл},3,1,1,j-1} - h_{\text{рл},3,1,1} \cdot P_{1,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}}; \quad (8)$$

$$\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j} = h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1} - h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}}. \quad (9)$$

Подставим (9) в (7) и перепишем полученное выражение:

$$\begin{aligned} K_{1,j} &= \frac{h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1} - h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} - \vartheta_{4,1,1,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)} = \\ &= \frac{h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} \right) + \vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} - \vartheta_{4,1,1,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

При правильной работе алгоритма значения расчетной температуры поверхности объекта должны совпадать с реальными значениями этой температуры, т. е. $\vartheta_{4,1,1,j} = \vartheta_{\text{рл},4,1,1,j}$ и, соответственно, $\vartheta_{4,1,1,j-1} = \vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1}$. Тогда выражение (10) переписывается в виде:

$$K_{1,j} = \frac{h_{\text{рл},4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} \right) + \vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1} \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}. \quad (11)$$

При достаточно малом периоде дискретизации, т. е. когда $\Delta t < \tau_k$, экспоненты можно представить первыми двумя членами разложения в ряд Маклорена:

$$e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \approx 1 - \frac{\Delta t}{\tau_k}. \quad (12)$$

Тогда, с учетом (12), соотношение (11) преобразуется к виду:

$$K_{1,j} = \frac{h_{\text{рл},4,1,1} \cdot \tau_1}{h_{4,1,1} \cdot \tau_{\text{рл},1}} + \frac{\vartheta_{\text{рл},4,1,1,j-1} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{\text{рл},1}} \right)}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j}}. \quad (13)$$

Рассмотрим наихудшую ситуацию отклонения реальных значений температур от расчетных значений. Такая ситуация будет наблюдаться на первом шаге расчета ($j=1$), когда скорость экспоненты максимальна. Будем исходить из нулевых начальных условий: $\vartheta_{\text{рл},4,1,1,0} = 0$ °С. Тогда выражение (13) переписется следующим образом:

$$K_{1,1} = \frac{h_{\text{рл},4,1,1} \cdot \tau_1}{h_{4,1,1} \cdot \tau_{\text{рл},1}}. \quad (14)$$

Введем коэффициенты соответствия между реальными и расчетными параметрами соответствующих составляющих температур θ_3 и θ_4 :

$$\begin{cases} h_{\text{рл},3,1,1} = \alpha h_{\text{рл},4,1,1}; \\ h_{3,1,1} = \beta h_{4,1,1}; \\ h_{\text{рл},3,1,1} = \gamma h_{3,1,1}; \\ h_{\text{рл},4,1,1} = \frac{\beta\gamma}{\alpha} h_{4,1,1} = \omega h_{4,1,1}; \\ \tau_1 = \varphi \tau_{\text{рл},1}. \end{cases} \quad (15)$$

Учитывая (15), для (14) можно записать:

$$K_{1,1} = \omega\varphi. \quad (16)$$

Подставим (16) в выражение для первой экспоненциальной составляющей первого слагаемого расчетной температуры θ_3 на первом шаге расчета, умножив значение потерь на коэффициент $K_{1,1}$ и учитывая (12), (15) и нулевые начальные условия. В результате получим:

$$\begin{aligned} \vartheta_{3,1,1,1} &= h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} + (0 - h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} = \\ &= h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right) \approx h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Перепишем выражение (8) для этих же условий, не подставляя $K_{1,1}$, так как в данном случае рассматривается слагаемое реальной температуры:

$$\vartheta_{\text{рл},3,1,1,1} = h_{\text{рл},3,1,1} \cdot P_{1,1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}} \right) \approx h_{\text{рл},3,1,1} \cdot P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}. \quad (18)$$

Разделим (18) на (17). Учитывая (15), получим:

$$\frac{\vartheta_{\text{рл},3,1,1,1}}{\vartheta_{3,1,1,1}} = \frac{h_{\text{рл},3,1,1} \cdot P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_{\text{рл},1}}}{h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_1}} = \frac{\gamma\varphi}{\omega\varphi} = \frac{\gamma}{\beta\gamma} = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что отношение реальной температуры $\theta_{рл,з}$ к расчетной θ_3 в рамках принятых условий не зависит от параметра γ , связывающего между собой коэффициенты при экспоненциальных составляющих для этих температур, а также от параметра φ , связывающего значения тепловых постоянных времени. Таким образом, расчетная температура, полученная на основе умножения коэффициента K на расчетные потери, будет приближена к реальной температуре за счет компенсации отклонения расчетных коэффициентов при экспоненциальных составляющих от их эквивалентов в реальных тепловых процессах. Естественно, компенсация не будет полной, так как реальные тепловые процессы описываются практически бесконечным набором экспонент, а при выводе данного доказательства был принят ряд допущений.

Экспериментальные исследования, проведенные на автотрансформаторе АДЦТН-63000/220 [2], на кабелях N2XSY-120 [1], АПвП 1х300/35-10 [1], АПвПу 1х240/50-10 [1], ААШв 3х240-10 [2] и на двигателе 4АМ112М4У3 [7], подтвердили работоспособность предлагаемой адаптивной модели и справедливость приведенного доказательства.

Заключение

Тепловые процессы в электроэнергетическом оборудовании имеют много общих закономерностей и могут быть описаны в реальном времени достаточно простой математической моделью, не требующей значительных вычислительных мощностей и позволяющей рассчитывать температуры внутренних элементов этого оборудования, которые непосредственно измерить сложно или невозможно. Применение такой модели в программном обеспечении микропроцессорных приборов позволит решать задачи раннего диагностирования неисправностей в объектах энергетики.

Литература

1. Разработка методов и средств для автоматического диагностирования силовых кабелей по тепловым параметрам : отчет по НИР (закл.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. Д. И. Зализный. – Гомель, 2012. – 127 с. – № ГР 20101653.
2. Методы и средства для раннего диагностирования электрооборудования по тепловым параметрам : отчет по НИР (закл.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. Д. И. Зализный. – Гомель, 2013. – 235 с. – № ГР 20111017.
3. Susa, D. Dynamic thermal modeling of power transformers : doctoral dissertation / D. Susa ; Espoo. – 2005. – 130 p.
4. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil immersed power transformers : IEC. – Revision of Publication 60076. – Draft 7. – 2005. – 122 p.
5. ГОСТ Р МЭК 60287-2-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 2-1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления.
6. Wallmark, O. Analysis of Electrical Machines / O. Wallmark ; Royal Institute of Technology Stockholm. – Sweden, 2012.
7. Зализный, Д. И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, В. В. Попичев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 1. – С. 31–43.

Получено 16.04.2015 г.