

УДК 621.313.333.2

АДАПТИВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, О. Г. ШИРОКОВ, В. В. ПОПИЧЕВ

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

Введение

В отличие от силовых трансформаторов и кабелей, нормативные документы по расчету тепловых процессов в электродвигателях практически отсутствуют. Имеются лишь простейшие рекомендации для определения температур их различных элементов. Более подробно рассматриваются методы измерения температур.

В [1] приведены три метода контроля тепловых процессов электродвигателя:

- метод сопротивления;
- метод встроенных датчиков температуры;
- метод термометра.

В методе сопротивления используется зависимость электрического сопротивления обмоток двигателя от температуры. Выполняется косвенное измерение средней температуры обмотки как при снятом, так и при поданном напряжении. Основным недостатком данного метода – значительные аппаратные затраты в случае двигателей, работающих под напряжением.

Второй метод предполагает наличие встроенных датчиков температуры в обмотках статора. Это возможно только на этапе изготовления двигателя. Лишь немногие из имеющихся в эксплуатации двигателей имеют такие датчики.

В методе термометра осуществляется контроль температуры поверхности двигателя. При этом информация о его внутренних температурах отсутствует.

По теме математического моделирования тепловых процессов в электродвигателях имеется достаточно много научных публикаций. Приведенные в них методики можно разделить на два класса: использующие сеточные методы и использующие малое количество тепловых однородных тел.

Первый класс методик предполагает наличие подробных сведений о внутренних конструктивных элементах электродвигателя и большой объем вычислений с помощью специальных компьютерных программ, таких как ANSYS, реализующих расчет тепловых полей на основе сеточных методов. В [2] рассматриваются особенности конвективных воздушных потоков в охлаждающих каналах двигателя. Приводятся соответствующие критериальные уравнения и расчетные соотношения для числа Нуссельта при естественной и принудительной конвекции. Расчеты даны только для стационарных тепловых процессов. В [3] методом конечных элементов решается задача моделирования нестационарных тепловых процессов в статоре двигателя. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие, что математическая модель имеет низкую погрешность в статике, но в динамике дает ошибку до 10 °С.

Второй класс методик расчета тепловых процессов и в двигателе базируется на ряде существенных допущений, но при этом не имеет значительных требований к вычислительным мощностям и может применяться в программном обеспечении про-

мышленных приборов. Так в [4] рассматривается четырехмассовая модель двигателя для нестационарного теплового режима, учитывающая влияние высших гармонических составляющих токов статора. Расчетные соотношения для учета температуры внешней охлаждающей среды не приводятся. В [5] предложена математическая модель нестационарных тепловых процессов двигателя АИР160S4 как системы из 16 однородных тел. Система дифференциальных уравнений решена по методу Адамса. Построены временные зависимости для различных узлов двигателя. Результаты экспериментальных исследований в статье отсутствуют. В [6] рассмотрена тепловая модель двигателя как системы из 17 однородных тел, учитывающая механические потери в подшипниках. Дано сравнение расчетных и измеренных значений температур статора и подшипникового щита двигателя. В [7] разработана методика экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели двигателя. Методика требует значительного количества испытаний.

В целом, можно отметить, что при повышении порядка математической модели возрастает точность расчетов, но растут и требования к вычислительным мощностям устройства, особенно для нестационарных тепловых процессов. Это затрудняет реализацию систем контроля тепловых процессов в двигателе в реальном времени. Математические модели с малым количеством тепловых однородных тел достаточно просто реализуемы в аппаратной части, но дают высокие погрешности по отношению к реальным тепловым процессам в двигателе. Следовательно, задача разработки математической модели двигателя, позволяющей рассчитывать температуры его узлов в реальном времени и реализуемой на основе микропроцессорной техники, является актуальной.

Разрабатывать математическую модель будем для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором как имеющих относительно простую конструкцию и широкое распространение в электротехнике.

Таким образом, целью работы является создание математической модели тепловых процессов асинхронного электродвигателя, позволяющей в режиме реального времени выполнять расчет температур его внутренних элементов.

Исходная математическая модель четвертого порядка для тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Рассмотрим асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (далее просто двигатель) как систему из следующих тепловых однородных тел: ротор, воздушный зазор, статор, корпус и внутренняя охлаждающая среда, внешняя охлаждающая среда (рис. 1).

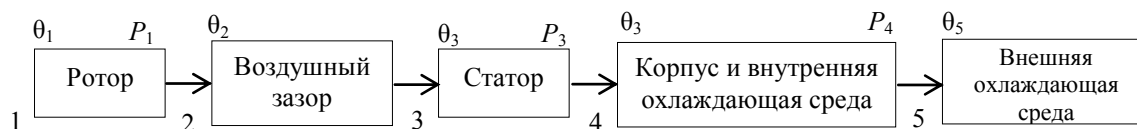


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов двигателя

Соответствующим однородным телам присвоим номера, как показано на рис. 1, и далее будем их использовать в качестве индексов в уравнениях.

Под внутренней охлаждающей средой будем подразумевать слой наружного воздуха, температура которого зависит от температуры поверхности двигателя.

Будем учитывать потери активной мощности в роторе P_1 , статоре P_3 и в корпусе P_4 .

Дифференциальные уравнения теплового равновесия, описывающие тепловые процессы в рассматриваемой системе, имеют следующий вид [8]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = P_4, \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_1 - \theta_5$ – температуры соответствующих однородных тел (рис. 1), °C; $R_1 - R_4$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел, $\frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$; $C_1 - C_4$ – теплоемкости соответствующих однородных тел, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C}}$.

На основе системы (1) можно синтезировать тепловую схему замещения двигателя [8] (рис. 2).

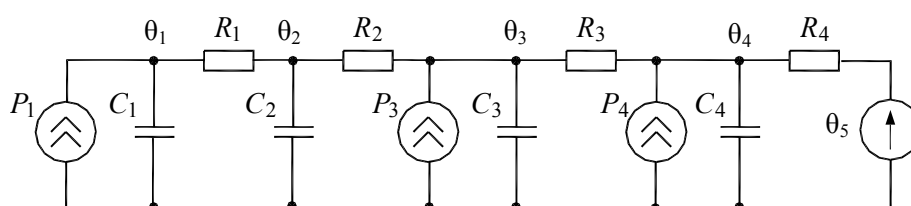


Рис. 2. Тепловая схема замещения асинхронного двигателя

Воспользовавшись методами электротехники и тепловой схемой замещения, запишем в операторной форме выражения для расчетных температур, представляющих наибольший практический интерес, т. е. для температуры статора $\theta_1(p)$, ротора $\theta_3(p)$ и температуры внутренней окружающей среды $\theta_4(p)$, которую примем равной температуре поверхности корпуса двигателя.

$$\begin{aligned} \theta_1(p) = & \frac{(b_{1,3}p^3 + b_{1,2}p^2 + b_{1,1}p + b_{1,0})P_1(p) + (c_{1,1}p + c_{1,0})P_3(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} + \\ & + \frac{f_{1,0} \cdot P_4(p) + d_{1,0} \cdot \theta_5(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \theta_3(p) = & \frac{(b_{3,1}p + b_{3,0})P_1(p) + (c_{3,3}p^3 + c_{3,2}p^2 + c_{3,1}p + c_{3,0})P_3(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} + \\ & + \frac{(f_{3,2}p^2 + f_{3,1}p + f_{3,0})P_4(p) + (d_{3,2}p^2 + d_{3,1}p + d_{3,0})\theta_5(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_4(p) = \frac{b_{4,0} \cdot P_1(p) + (c_{4,2}p^2 + c_{4,1}p + c_{4,0})P_3(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} + \frac{(f_{4,3}p^3 + f_{4,2}p^2 + f_{4,1}p + f_{4,0})P_4(p) + (b_{4,3}p^3 + b_{4,2}p^2 + b_{4,1}p + b_{4,0})\theta_5(p)}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1}, \quad (4)$$

где a , b , c , d , f – коэффициенты, рассчитываемые на основе значений тепловых сопротивлений и теплоемкостей тепловой схемы замещения (рис. 2).

Расчет тепловых параметров математической модели на примере двигателя 4АМ112М4У3

Представим все однородные тела в виде цилиндров (рис. 3).

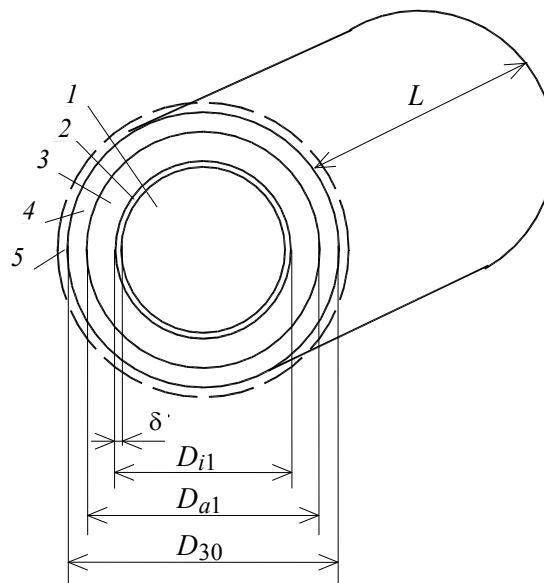


Рис. 3. Представление двигателя как системы цилиндрических тел:
1 – ротор; 2 – воздушный зазор; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – внутренняя окружающая среда

На рис. 3 обозначено: δ – ширина воздушного зазора; D_{i1} – внутренний диаметр сердечника статора; D_{a1} – внешний диаметр сердечника статора; D_{30} – диаметр корпуса.

При расчете тепловых сопротивлений их зависимостью от температуры будем пренебрегать.

Тепловое сопротивление R_4 будем рассчитывать по известной формуле

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_{\text{кор}} \cdot S_{\text{кор}}}, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{кор}}$ – коэффициент теплоотдачи корпуса двигателя, $\frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2}$; $S_{\text{кор}}$ – площадь поверхности корпуса двигателя, м^2 .

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{кор}}$ можно рассчитать в соответствии с [9, с. 116] и [10, с. 127].

Рассмотрим тепловое сопротивление статора R_3 как два параллельно соединенных тепловых сопротивления

$$R_3 = \frac{R_{3,б} \cdot R_{3,л}}{R_{3,б} + R_{3,л}}, \quad (6)$$

где $R_{3,б}$ – тепловое сопротивление статора через его боковую поверхность; $R_{3,л}$ – тепловое сопротивление статора через лобовые части двигателя.

Для расчета теплового сопротивления $R_{3,б}$ представим статор в виде четырех эквивалентных цилиндров, как показано на рис. 4.

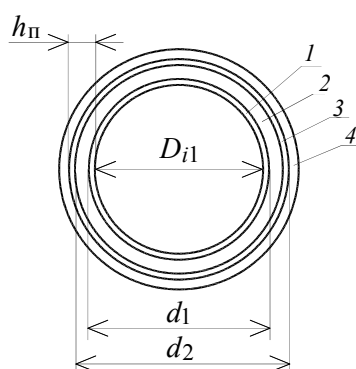


Рис. 4. Представление статора в виде вложенных цилиндров:
1 – внутренний эквивалентный слой изоляции обмоток; 2 – металл обмоток;
3 – внешний эквивалентный слой изоляции обмоток; 4 – металл сердечника

На рис. 4 обозначено: $h_{п}$ – высота паза статора; D_{i1} – внутренний диаметр сердечника статора; d_1 – диаметр цилиндра внутреннего эквивалентного слоя изоляции обмоток; d_2 – диаметр эквивалентного цилиндра металла обмоток.

Будем считать, что при нагреве статора тепловой поток идет через каждый жгут его обмоток, уложенный в соответствующий паз, через металл сердечника и непосредственно корпус в окружающую среду. При этом все пазы и жгуты обмоток будем рассматривать как вложенные цилиндры в соответствии с рис. 4. Обмотки статора представим как три вложенных цилиндра: внутренний эквивалентный слой изоляции, металл и внешний эквивалентный слой изоляции.

Так как теплопроводность металлов на несколько порядков выше, чем теплопроводность диэлектриков, то при расчете теплового сопротивления $R_{3,б}$ влиянием металлических слоев эквивалентных цилиндров будем пренебрегать.

Тогда тепловое сопротивление $R_{3,б}$ будет иметь два слагаемых:

$$R_{3,б} = R_{3,1} + R_{3,2}, \quad (7)$$

где $R_{3,1}$, $R_{3,2}$ – соответственно, тепловые сопротивления внутреннего и внешнего эквивалентных слоев изоляции.

Тепловые сопротивления эквивалентных цилиндров можно рассчитать по аналогии с тепловыми сопротивлениями кабелей [11] и в соответствии с рис. 4.

Диаметры эквивалентных цилиндров d_1 и d_2 определим из условия, что изоляция обмоток занимает около 15 % площади каждого паза [9, с. 33]. Примем, что и внутренний и внешний эквивалентные цилиндры изоляции обмоток занимают по 7,5 % от площади сечения эквивалентного цилиндра пазов (см. рис. 4). Тогда, выполнив соответствующие алгебраические преобразования, для внутреннего слоя изоляции можно записать:

$$d_1 = \sqrt{0,075(D_{i1} + 2 \cdot h_n)^2 + 0,925 \cdot D_{i1}^2}; \quad (8)$$

$$d_2 = \sqrt{0,925(D_{i1} + 2 \cdot h_n)^2 + 0,075 \cdot D_{i1}^2}. \quad (9)$$

При расчете теплового сопротивления $R_{3,л}$ примем, что тепловой поток идет от центральной части статора в обе стороны к его торцам. При этом часть теплового потока идет через обмотки, а часть – через сердечник. Очевидно, что из-за влияния теплового сопротивления изоляции тепловой поток через обмотки будет пренебрежимо мал по сравнению с тепловым потоком через металл сердечника. Поэтому влиянием обмоток на величину $R_{3,л}$ пренебрежем.

Тепловое сопротивление $R_{3,л}$ будем рассчитывать по аналогии с электрическим сопротивлением, учитывая, что тепловой поток идет в обе стороны, т. е. результирующее значение сопротивления снизится в два раза:

$$R_{3,л} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{l_{ст}}{2}}{\gamma_{fe} \frac{\pi}{4} (D_{a1}^2 - (D_{i1} + 2 \cdot h_n)^2)} = \frac{l_{ст}}{\gamma_{fe} \cdot \pi (D_{a1}^2 - (D_{i1} + 2 \cdot h_n)^2)}, \quad (10)$$

где γ_{fe} – удельная теплопроводность электротехнической стали.

Тепловое сопротивление воздушного зазора R_2 определим через коэффициент теплоотдачи и площадь поверхности теплоотдачи

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_{рот} \cdot \pi (D_{i1} - 2 \cdot \delta) l_{ст}}, \quad (11)$$

где $\alpha_{рот}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности ротора, который можно определить в соответствии с [10, с. 131]; δ – ширина воздушного зазора, м.

Тепловое сопротивление ротора R_1 , как и в случае со статором, будем рассчитывать для цилиндрических однородных тел, учитывая теплопроводность алюминиевых стержней и пренебрегая теплопроводностью сердечника, так как, во-первых, теплопроводность алюминия в 2,3 раза выше теплопроводности стали, и, во-вторых, основные потери активной мощности в роторе обусловлены токами, протекающими через короткозамкнутые стержни.

Теплоемкости C_1 – C_4 определим классически как произведения удельных теплоемкостей материалов однородных тел на их массы, используя обозначения, показанные на рис. 3, 4.

При этом измеренные токи для каждой k -й фазы сети будут равны

$$\dot{I}_{j,k} = I_{j,k} \cdot e^{j\varphi_{j,k}}. \quad (14)$$

Ток намагничивающей цепи для k -й фазы сети $\dot{I}_{1,j,k}$ определим по измеренным значениям фазных напряжений:

$$\dot{I}_{1,j,k} = \frac{\dot{U}_{j,k}}{R_1 + j(X_1 + X_\mu)}. \quad (15)$$

Тогда нагрузочный ток $\dot{I}_{2,j,k}$ можно найти по формуле

$$\dot{I}_{2,j,k} = \dot{I}_{j,k} - \dot{I}_{1,j,k}. \quad (16)$$

Соответственно, потери будут равны:

$$P_1 = \sum_{k=1}^3 |I_{2,j,k}|^2 R_2'', \quad (17)$$

$$P_3 = P_{\text{ст}} + P_{\text{об}} + P_{\text{м}} = \sum_{k=1}^3 |I_{1,j,k}|^2 R_1 + \sum_{k=1}^3 |I_{2,j,k}|^2 R_1' + P_{\text{м}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{ст}}$ – потери в стали статора; $P_{\text{об}}$ – потери в обмотках статора; $P_{\text{м}}$ – механические потери; R_1 – активная составляющая цепи намагничивания (см. рис. 5); R_1' – активное сопротивление обмоток статора (см. рис. 5).

Приблизительное значение $P_{\text{м}}$ можно определить по эмпирической формуле [9, с. 94].

Потери в стали ротора учитывать не будем, так как они незначительны [9, с. 92].

Потери в корпусе P_4 введены для компенсации отклонения теплового сопротивления R_4 от реального теплового сопротивления окружающей среды в адаптивном алгоритме, который описан ниже. Очевидно, что реальные потери мощности в корпусе очень малы и обусловлены потоками рассеяния двигателя. Для нормальной работы алгоритма необходимо иметь исходное значение этих потерь, отличное от нуля. В качестве такого значения можно принять часть добавочных потерь, обусловленную потоками рассеяния. В соответствии с [13, с. 281] эта составляющая добавочных потерь приблизительно равна 0,5 % от номинальной мощности двигателя.

Алгоритм адаптации параметров математической модели

Исходная математическая модель не учитывает многие явления, влияющие на тепловые процессы в двигателе: изменение интенсивности самовентиляции при изменении частоты вращения ротора, колебания напряжения, зависимость тепловых сопротивлений и теплоемкостей от температуры, теплообмен через лобовые части, влияние высших гармоник, сложное распределение внутренних тепловых полей и т. д. Для устранения этого недостатка поставим задачу сделать модель адаптивной, способной подстраиваться под текущие параметры двигателя на основе некоторого количества непосредственно измеряемых величин.

Введем варьируемый адаптирующий параметр K , который будем рассчитывать косвенно на основе имеющихся данных на каждом расчетном интервале, а затем умножать на все виды потерь.

Сформулируем гипотезу: в результате косвенного расчета параметр K приведет к оптимальному изменению расчетных потерь таким образом, что отклонение исходной математической модели от реальных тепловых процессов в двигателе будет частично компенсировано. Подтверждать эту гипотезу будем экспериментальным путем.

Вначале запишем алгоритм расчета температуры поверхности корпуса двигателя θ_4 во временной области (через экспоненциальные составляющие) на основе соотношения (4), умножая все виды потерь на адаптирующий параметр K :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vartheta_{1,i,j} = h_{1,i} \cdot K_j \cdot P_{1,j} + (\vartheta_{1,i,j-1} - h_{1,i} \cdot K_j \cdot P_{1,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{2,i,j} = h_{2,i} \cdot K_j \cdot P_{2,j} + (\vartheta_{2,i,j-1} - h_{2,i} \cdot K_j \cdot P_{2,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{3,i,j} = h_{3,i} \cdot K_j \cdot P_{3,j} + (\vartheta_{3,i,j-1} - h_{3,i} \cdot K_j \cdot P_{3,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{4,i,j} = h_{4,i} \cdot \theta_{5,j} + (\vartheta_{4,i,j-1} - h_{4,i} \cdot \theta_{5,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \theta_{4,j} = \sum_{i=1}^4 (\vartheta_{1,i,j} + \vartheta_{2,i,j} + \vartheta_{3,i,j} + \vartheta_{4,i,j}), \end{array} \right. \quad (19)$$

где i – номер экспоненциальной составляющей теплового процесса; j – номер расчетного интервала; τ_i – постоянные времени экспоненциальных составляющих; $h_{1,i}$, $h_{2,i}$, $h_{3,i}$, $h_{4,i}$ – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа на основе соотношения (4); $\vartheta_{1,i,j}$, $\vartheta_{2,i,j}$, $\vartheta_{3,i,j}$, $\vartheta_{4,i,j}$ – соответственно, составляющие температуры поверхности корпуса от потерь в роторе, статоре, корпусе и от температуры внешней охлаждающей среды по каждой экспоненциальной составляющей; Δt – интервал времени между j -м и $j + 1$ -м расчетными интервалами (период дискретизации).

Сгруппируем параметры при K_j в первом уравнении системы (19):

$$\vartheta_{1,i,j} = K_j \cdot h_{1,i} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \right) + \vartheta_{1,i,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}. \quad (20)$$

Просуммировав (20) по экспоненциальным составляющим, получим:

$$\sum_{i=1}^4 \vartheta_{1,i,j} = K_j \cdot \sum_{i=1}^4 h_{1,i} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \right) + \sum_{i=1}^4 \vartheta_{1,i,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}. \quad (21)$$

Подставим (21) в последнее уравнение алгоритма (19). Проведем алгебраические преобразования, сгруппировав параметры при K_j и вынося K_j за скобки. Выразив K_j , получим:

$$K_j = \frac{\theta_{4,j} - \sum_{i=1}^4 \left(\vartheta_{4,i,j} + \vartheta_{1,i,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} + \vartheta_{2,i,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} + \vartheta_{3,i,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \right)}{\sum_{i=1}^4 \left[\left(P_{1,j} \cdot h_{1,i} + P_{3,j} \cdot h_{2,i} + P_{4,j} \cdot h_{3,i} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \right) \right]}. \quad (22)$$

Алгоритм (22) позволяет на каждом шаге косвенно рассчитывать параметр K_j при следующих непосредственно измеряемых величинах: фазные напряжения и линейные токи статора двигателя в каждой фазе, температура поверхности корпуса, температура внешней охлаждающей среды.

При правильной работе алгоритмов (21) и (22) значения измеренной и расчетной температуры поверхности корпуса после некоторых переходных процессов, обусловленных начальными стадиями итерационного процесса, должны полностью совпадать.

Значения K_j , полученные по (22), необходимо на каждом j -м интервале расчета умножать на все виды потерь и рассчитывать значения температур ротора и статора в соответствии с (2), (3) по отношению к высоте установки датчика температуры поверхности корпуса. Так, например, алгоритм расчета температуры статора запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \vartheta_{1,i,j} = m_{1,i} \cdot K_j \cdot P_{1,j} + \left(\vartheta_{1,i,j-1} - m_{1,i} \cdot K_j \cdot P_{1,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{2,i,j} = m_{2,i} \cdot K_j \cdot P_{3,j} + \left(\vartheta_{2,i,j-1} - m_{2,i} \cdot K_j \cdot P_{3,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{3,i,j} = m_{3,i} \cdot K_j \cdot P_{4,j} + \left(\vartheta_{3,i,j-1} - m_{3,i} \cdot K_j \cdot P_{4,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{4,i,j} = m_{4,i} \cdot \theta_{5,j} + \left(\vartheta_{4,i,j-1} - m_{4,i} \cdot \theta_{5,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \theta_{3,j} = \sum_{i=1}^4 \left(\vartheta_{1,i,j} + \vartheta_{2,i,j} + \vartheta_{3,i,j} + \vartheta_{4,i,j} \right), \end{cases} \quad (23)$$

где $m_{1,i} - m_{4,i}$ – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа на основе соотношения (3).

Отметим, что алгоритмы (19), (22), (23) не требуют значительных вычислительных мощностей и могут быть реализованы даже в программном обеспечении восьмиразрядного микроконтроллера, обеспечивая при этом расчеты в режиме реального времени.

Экспериментальные исследования

На кафедре «Электроснабжение» имеется двигатель 4AM112M4У3 с электромагнитным тормозом на валу и возможностью регулирования напряжения. На базе этого двигателя авторами данной статьи проводились экспериментальные исследования.

Были использованы три датчика температуры. Первый датчик был размещен сверху лобовой части обмотки статора, второй – в верхней части корпуса на уровне первого датчика и покрыт теплоизолирующим материалом, а третий – на расстоянии 20 см от двигателя. Все датчики были подключены к соответствующим входам цифрового регистратора, собранного на кафедре «Электроснабжение». Кроме этого на входы регистратора подавались напряжения и токи всех фаз статора двигателя.

Вначале эксперимента двигатель работал на холостом ходу, затем ток регулировался с помощью электромагнитного тормоза, а напряжение с помощью реостатов. После этого двигатель был отключен от сети, но измерения температур продолжались.

Действующие значения измеряемых напряжений и токов, а также значения температур каждые 4 секунды передавались регистратором в компьютер по интерфейсу RS232.

На рис. 6 и 7 показаны графики измеренных действующих значений напряжения и тока фазы «А», а на рис. 8 – графики измеренных температур.



Рис. 6. График измеренного напряжения фазы «А» двигателя 4АМ112М4У3

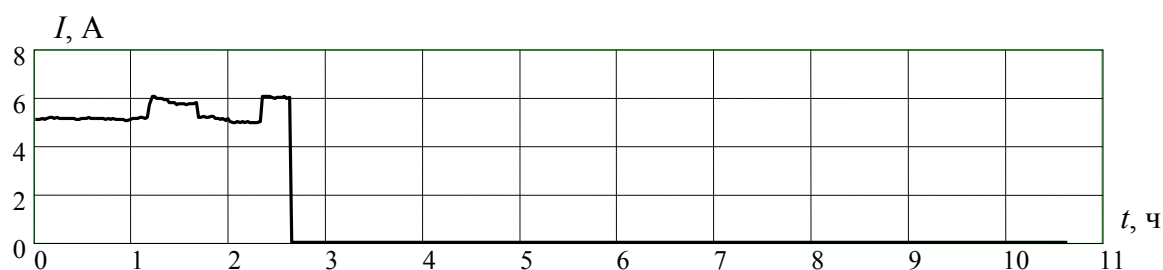


Рис. 7. График измеренного тока фазы «А» двигателя 4АМ112М4У3

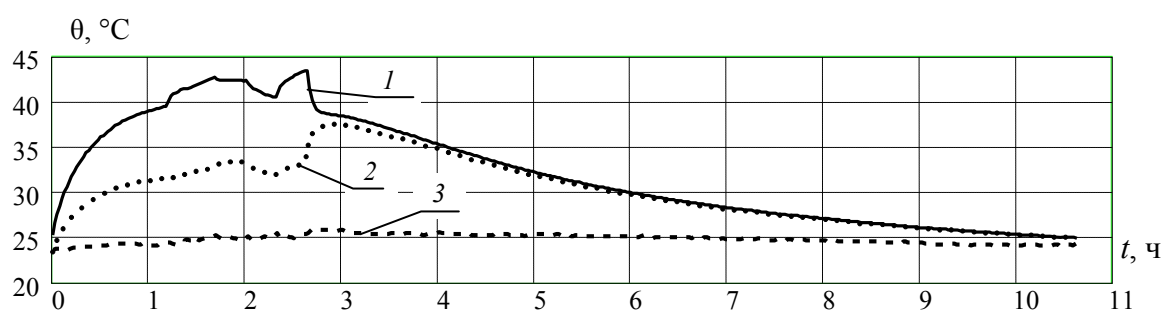


Рис. 8. Графики измеренных температур двигателя 4АМ112М4У3:
1 – верх лобовой части обмотки статора; 2 – поверхность корпуса; 3 – воздух

На рис. 9 приведены графики измеренной и расчетной температуры верха лобовой части обмотки статора. Расчет выполнен как по исходной математической модели (линия 2), так и по адаптивной модели (линия 3). На рис. 10 показан график изменения адаптирующего коэффициента K .

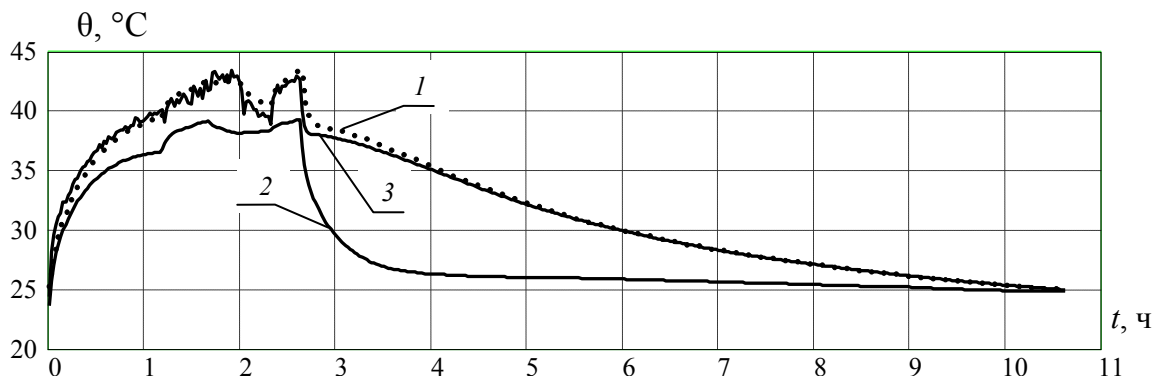


Рис. 9. Графики температуры верха лобовой части обмотки статора двигателя 4AM112M4У3:

1 – эксперимент; 2 – расчет по исходной модели; 3 – расчет по адаптивной модели

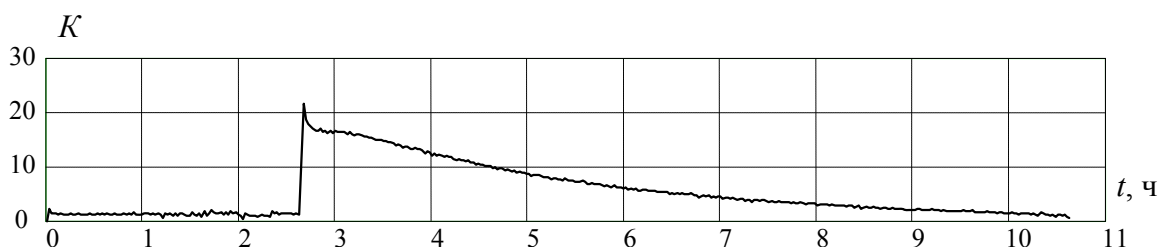


Рис. 10. График адаптирующего коэффициента K

Из рис. 9 видно, что алгоритм адаптации значительно повлиял на динамику расчетной температуры статора, приблизив ее значения к экспериментальным значениям. Это влияние особенно велико на этапе отключения двигателя и прекращения его самовентиляции (рис. 10).

Показатели качества исходной и адаптивной моделей, полученные по отношению к измеренной температуре статора, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели качества математических моделей

Модель	Максимум абсолютной погрешности, °С	Минимум абсолютной погрешности, °С	Коэффициент корреляции
Исходная	10,2	0,1	0,862
Адаптивная	3,44	-1,98	0,996

Максимальная абсолютная погрешность адаптивной модели в 3,5 °С вполне приемлема для практических целей, так как не превышает приращение температуры, которое приводит к удвоенному износу изоляции двигателя, т. е. 8 °С.

Заключение

Разработанная в статье математическая модель может быть использована в программном обеспечении существующих устройств защиты и диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором или же при создании подобных устройств, так как позволяет вести расчет температур в реальном времени. Основные требования к аппаратной части: наличие датчика температуры поверхности корпуса двигателя, датчика температуры окружающего воздуха, цепей измерения на-

пряжений и токов всех фаз статора, восьмиразрядного микроконтроллера с памятью программ не менее 8 Кбайт.

Внедрение предложенных алгоритмов повысит надежность эксплуатации электродвигателей за счет защиты их внутренних элементов от перегрева и раннего выявления возрастающего дополнительного аномального нагрева, обусловленного развитием неисправностей.

Литература

1. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance // IEC Revision of Publication 60034. – draft 1. – 2004. – 137 p.
2. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models / D. Staton, A. Cavagnino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 55. – № 10. – October 2008. – P. 3509–3516.
3. Thermal Modeling as a Tool to Determine the Overload Capability of Electrical Machines / S. Mahdavi and all / International Conference on Electrical Machines and Systems. – Oct. 26–29. – 2013. – Busan. – Korea. – P. 454–458.
4. Wallmark, O. Analysis of Electrical Machines / O. Wallmark. – Royal Institute of Technology Stockholm. – Sweden. – 2012.
5. Осташевский, Н. А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / Н. А. Осташевский, В. П. Шайда // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 46–51.
6. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, А. М. Якимец // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2008. – № 71. – С. 47–51.
7. Анучин, А. С. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя / А. С. Анучин, К. Г. Федорова // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 21–25.
8. Широков, О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Научные технологии. – 2008. – № 2. – С. 63–67.
9. Сечин, В. И. Проектирование асинхронных двигателей / В. И. Сечин, Е. В. Разумных. – Хабаровск : ДВГУПС, 2011. – 132 с.
10. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. – М. : Энергия, 1980. – 495 с.
11. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ–Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 25–34.
12. Асинхронные двигатели серии 4А / А. Э. Кравчик [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
13. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк. ; Логос, 2000. – 607 с.

Получено 16.06.2014 г.