

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Малеев Д.М.

Донецкий государственный технический университет

demon_1500@mail.ru

Are considered principles of building and functioning peculiarities of microprocessors system of thermal control of asynchronous motors, working in diverse modes.

Процесс преобразования энергии в электрических машинах сопровождается выделением тепла, а следовательно, и нагревом элементов их конструкций. Величины температур узлов асинхронных двигателей (АД), работающих в повторно-кратковременных режимах, постоянно изменяются и их определение достаточно сложно, поэтому контроль их температуры и защита от тепловых перегрузок являются актуальными.

Предлагаемая система контроля температуры обмоток позволяет: фиксировать ее предельно допустимую величину, осуществлять прогнозирование температурного состояния в различных режимах работы и вести учет расхода ресурса изоляционных материалов. Различают непосредственное и косвенное измерением температуры. Устройства с непосредственным измерением температуры имеют ряд преимуществ, однако, их применение ограничивает ряд условий: трудность укладки термодатчиков в обмотки, передача сигнала небольшой величины от термодатчика в систему и т.д. С учетом поставленных задач, система должна быть основана на косвенной оценке температурного состояния с использованием тепловых моделей АД, где входным сигналом является ток и напряжение обмотки статора.

Система состоит из: измерительно-преобразовательного комплекса (ИПК), вычислительного комплекса (ВК) и линии связи (ЛС). Структурная схема системы представлена на рис. 1. Важным свойством системы является способность к каскадированию, что дает возможность ее применения для контроля теплового состояния группы двигателей различной мощности, работающих в произвольных режимах работы.

ИПК должен быть снабжен каждый контролируемый двигатель; в его функции входит: измерение в реальном времени с шагом $t_{опр}$ среднего эквивалентного значения тока $I_{срЭ}$ и напряжения $U_{срЭ}$ а также скорости вращения ω , частоты сети f_c для последующей передачи их в ВК по ЛС через определенные промежутки времени $t_{лс}$.

Сведения от всех ИПК поступают в ВК (один для всей системы). В задачи ВК (роль которого выполняет ПЭВМ) входит вычисление по определенным значениям тока и напряжения, частот и скоростей вращения значений тепловых потерь P и, расчет по ним приращений температур узлов двигателя за время $t_{лс}$.

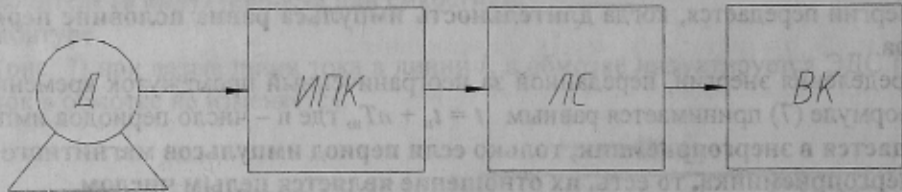


Рисунок 1 – Структурная схема системы контроля

Передача данных в ВК должна производиться через равные промежутки времени, для того, чтобы обеспечить синхронность в приеме данных для группы двигателей. Время между посылками $t_{лс}$ определяет скорость реакции системы на тепловые изменения; оно не должно быть слишком мало, чтобы можно было опросить ИПК на всех двигателях и рассчитать температуры в них; вместе с тем, это время не должно быть слишком велико, т.к. при этом возрастает объем передаваемых данных и в двигателях могут происходить процессы, на которые ВК должен реагировать с достаточно большой скоростью (например, большая скорость нагрева или приближение температуры той или иной части двигателя к максимально допустимой). Учитывая пропускную способность интерфейса, по которому осуществляется связь ИПК с ВК, время между посылками $t_{лс}$ должно лежать в пределах $10 < t_{лс} < 60$ сек.

Возможны следующие варианты передачи данных от ИПК: посылки среднего эквивалентного значения тока $I_{срЭ}$ за время $t_{лс}$ или определение за время $t_{лс}$ суммарного времени каждого из интервалов (пуска $t_{нсЭ}$, работы $t_{рЭ}$, торможения $t_{тЭ}$ или паузы $t_{пЭ}$) и средних эквивалентных токов на них (соотв. $I_{нс}$, $I_{р}$, $I_{т}$ и $I_{п}$) и посылка их в ВК. Каждый из вариантов может применяться в зависимости от режимов работы АД. Выбор возможного формата посылок данных определяет требования к системе: структуру и конструкцию ИПК, пропускную способность ЛС, вычислительную мощность ВК и т.д.

Важным требованием к устройствам с косвенной оценкой температуры являются также требования к узлу моделирования, позволяющему адекватно воспроизводить тепловые переходные процессы в обмотках

АД, работающих в сложных повторно-кратковременных режимах, с достаточной степенью точности. Для этой цели можно воспользоваться эквивалентными тепловыми схемами (ЭТС) замещения электродвигателей. АД с короткозамкнутым ротором может быть описан системой дифференциальных уравнений, полученных с помощью ЭТС [1], при использовании четырехтельной модели двигателя, и имеющей следующий вид:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + (\lambda_{12} + \lambda_{14})\theta_1 - \lambda_{12}\theta_2 - \lambda_{14}\theta_4 = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} - \lambda_{12}\theta_1 + (\lambda_{12} + \lambda_{23} + \lambda_{20})\theta_2 - \lambda_{23}\theta_3 = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} - \lambda_{23}\theta_2 + (\lambda_{30} + \lambda_{23} + \lambda_{34})\theta_3 - \lambda_{34}\theta_4 = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} - \lambda_{14}\theta_1 - \lambda_{34}\theta_3 + (\lambda_{40} + \lambda_{34} + \lambda_{14})\theta_4 = P_4. \end{cases} \quad (1)$$

где: $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – превышения температур узлов электродвигателя над температурой окружающей среды (соответственно узел 1 – это пазовая часть обмотки статора, узел 2 – лобовая часть обмотки статора, узел 3 – ротор, узел 4 – железо статора и корпус);

$d\theta_1/dt, d\theta_2/dt, d\theta_3/dt, d\theta_4/dt$ – соответственно производные температур;

C_1, C_2, C_3, C_4 – теплоемкости;

$\lambda_{12}, \lambda_{14}, \lambda_{23}, \lambda_{34}, \lambda_{20}, \lambda_{30}, \lambda_{40}$ – тепловые проводимости;

P_1, P_2, P_3, P_4 – потери в узлах электродвигателя;

Переменными состояниями являются температуры θ_i узлов электродвигателя. Пассивные параметры системы теплоемкости C_i и теплопроводности λ_{ij} определяются массогабаритными показателями и практически постоянны для всех двигателей одного типоразмера. Значения λ_{ij} зависят также от условий охлаждения. На каждом из интервалов двигатель подвергается различным условиям охлаждения. Цикл повторно-кратковременного режима S3 включает в себя следующие интервалы: рабочий интервал - значения тока находятся в пределах номинального с практически постоянной скоростью вращения и пауза (соответственно $\lambda_{p ij}$ и $\lambda_{m ij}$). В повторно-кратковременном режиме с частыми пусками S4 к ним добавляется также пуск – интервал с небольшой длительностью относительно рабочего цикла и наиболее интенсивной скоростью нарастания температуры $d\theta/dt$, т.к. за время пуска ток статора может в 5-8 раз превышать номинальный (что соответствует 20-60-ти кратному возрастанию потерь переменных P). АД с фазным ротором могут работать в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электрическим торможением S5, в котором имеет место еще один участок с превышением потерь - торможение (в случае применения электрического торможения тормозной ток в 2-3 раза превышает номинальный и также оказывает заметное влияние на тепловое состояние машины). В повторно-кратковременных режимах с частыми пусками и электрическим торможением на интервалах t_{nc} и t_m величины тепловых проводимостей $\lambda_{nc ij}$ и $\lambda_{m ij}$ изменяются в функции частоты вращения ω . У двигателей с принудительным охлаждением величины λ являются константами. Принимая во внимание, что временные интервалы t_{nc} и t_m невелики, элементы λ на этих участках можно принять постоянными. Для практических расчетов можно считать $\lambda_{nc ij} = \lambda_{m ij} = (\lambda_{p ij} + \lambda_{m ij})/2$.

Возможен вариант работы двигателя с несколькими пусками за время цикла, а также с циклами, в которых практически отсутствует рабочий интервал т.е. цикл состоит из пусков, следующих сразу за ними торможений и пауз. Следует отметить, что завершением тепловых переходных процессов повторно-кратковременных режимов является квазиустановившееся состояние, когда закон изменения температуры повторяется в последующих циклах. С точки зрения теплового старения изоляции обмоток необходимо контролировать их среднюю температуру θ_{cp} в цикле, которая не должна превышать допустимую $\theta_{доп}$ для соответствующего класса изоляции. Принимая во внимание, что в повторно-кратковременных режимах максимальные температуры $\theta_{макс}$ циклов могут превышать $\theta_{доп}$, при значительном размахе колебаний температуры в цикле следует вводить коррекцию θ_{cp} , и необходимо контролировать размах температур $\Delta\theta = \theta_{макс} - \theta_{мин}$ в цикле при квазиустановившемся состоянии.

Потери P , определяющие мощность источников тепла представляет собой сумму постоянных $P_{пост}$, переменных $P_{пер}$ и добавочных $P_{доб}$ потерь. При неизменном напряжении сети $U_{1н}$ постоянные потери АД практически неизменны $P_{пост и}$. В случае, когда имеют место колебания напряжения сети U_i , их можно рассчитать по формуле:

$$P_{пост i} = P_{пост и} (U_i / U_{1н})^2 \quad (2)$$

Переменные потери в обмотках находятся в функциональной зависимости от квадрата тока и температуры:

$$P_{пер i} = \beta_{I_i}^2 \cdot P_{пер и} (1 + \alpha \cdot \theta_i) \quad (3)$$

где: $P_{пер и}$ – потери в обмотке (или ее частях) при номинальном токе и температуре окружающей среды;

$\beta_{I_i} = I_i / I_{1н}$ – кратность тока в обмотке;

θ_i – температура в начале i-го цикла;

α – температурный коэффициент материала обмотки.
 Добавочные потери, в общем случае, можно считать пропорциональными квадрату тока.
 Следовательно, для воспроизведения информации о тепловых процессах, происходящих в двигателе, узлу моделирования необходимо следующее: интервал, на котором находится двигатель (пуск, работа, торможение или пауза) – для использования того или иного значений λ и значение P на данном интервале. Как указывалось ранее, для определения потерь, необходимо знать значения действующих величин токов и напряжений.

Рассмотрим возможные алгоритмы определения температуры. Решение системы (1) численными методами дает значение температуры в конце того или иного интервала, которое используется, как начальное условие для расчета температуры следующего интервала. В случае если на расчетном интервале имеет место несколько режимов работы (пуск, работа, торможение или пауза) приращения температуры определяются отдельно для каждого, а общее приращение определяется, как их сумма: $\Delta\theta = \Delta\theta_{nc} + \Delta\theta_p + \Delta\theta_m + \Delta\theta_{пз}$. Расчет температуры ведется для каждого из узлов в отдельности:

$$\theta_{1,i+1} = \theta_{1,i} + \Delta\theta_1; \theta_{2,i+1} = \theta_{2,i} + \Delta\theta_2; \theta_{3,i+1} = \theta_{3,i} + \Delta\theta_3; \theta_{4,i+1} = \theta_{4,i} + \Delta\theta_4; \quad (4)$$

При определении приращений температур можно воспользоваться методами Эйлера, Рунге-Кутты и т.д. [2], в которых производная температуры $d\theta/dt$ заменяется отношением приращения $\Delta\theta/\Delta t$. Точность решения системы (1) с помощью численного метода зависит от точности определения $\Delta\theta$, а, следовательно, от выбора шага итераций Δt . Для обеспечения наиболее точного воспроизведения теплового переходного процесса шаг нужно уменьшать, однако малые величины шага итераций ставят высокие требования к производительности системы. Это особенно существенно при групповом контроле двигателей, поскольку ВК может не хватить времени на опрос всех двигателей. Кроме того, поскольку тепловые переходные процессы имеют достаточно продолжительный характер, при небольшом шаге Δt иногда значения θ_i и θ_{i+1} практически не отличаются друг от друга.

Для четырехтельной ЭТС приращения температур на каком-то конкретном интервале в случае применения метода Эйлера будут равны:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 &= \frac{\Delta t}{C_1} (P_1 - (\lambda_{12} + \lambda_{14})\theta_1 + \lambda_{12}\theta_2 + \lambda_{14}\theta_4); \\ \Delta\theta_2 &= \frac{\Delta t}{C_2} (P_2 + \lambda_{12}\theta_1 - (\lambda_{12} + \lambda_{23} + \lambda_{20})\theta_2 + \lambda_{23}\theta_3); \\ \Delta\theta_3 &= \frac{\Delta t}{C_3} (P_3 + \lambda_{23}\theta_2 - (\lambda_{30} + \lambda_{23} + \lambda_{34})\theta_3 + \lambda_{34}\theta_4); \\ \Delta\theta_4 &= \frac{\Delta t}{C_4} (P_4 + \lambda_{14}\theta_1 + \lambda_{34}\theta_3 - (\lambda_{40} + \lambda_{34} + \lambda_{14})\theta_4). \end{aligned} \quad (5)$$

Точность определения приращений (5) зависит от значений $t_{опр}$ и $t_{ис}$. Величина $t_{опр}$ влияет на точность определения среднего тока $I_{срз}$ и, как следствие переменных потерь P . Для наиболее адекватного определения тока целесообразно производить мгновенные измерения токов трех фаз с последующим возведением в квадрат, суммированием и вычислением $I_{срз}$. Практика показывает, что опрос по 100-200 выборок за период (т.е. $t_{опр} = 100$ мкс.) обеспечивает достаточно точное определение среднего эквивалентного тока.

Значение $t_{ис}$ также является итерационным шагом Δt в выражениях (5), поскольку расчет должен проводиться в реальном масштабе времени. Применение значений $\Delta t < t_{ис}$ может повлечь за собой невозможность расчета ВК приращений температур узлов нескольких двигателей. Ниже рассмотрено влияние шага Δt на точность определения температуры в различных режимах работы. Сравнения результатов расчета проводилось по значения температуры, посчитанным методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Расчет температуры проводился для лобовой части обмотки статора двигателя ЭДКО4-2МУ5, как наиболее неблагоприятной в температурном отношении.

В табл. 1 приведены значения температуры лобовой части обмотки статора для продолжительного режима S1 в различные моменты времени при номинальном токе, рассчитанные различными методами с различным шагом.

Таблица 1 - Результаты расчета температуры для режима S1

t , мин	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180
$\Delta t < 1$ сек	26.1	37.2	44.9	51.4	57.0	61.9	82.3	91.9	97.6	102.5
$\Delta t = 5$ сек	26.1	37.2	44.9	51.4	56.9	61.8	81.6	91.9	97.6	102.5
$\Delta t = 60$ сек	27.3	37.6	45.2	51.7	57.3	62.2	81.9	92.1	97.8	102.6

Из табл. 1 следует, что значения температуры, полученные с различным шагом практически совпадают. Оптимальным, с точки зрения обмена информацией с ВК, является шаг $\Delta t > 10$ сек.

Рассмотрим повторно-кратковременный режим S3 (согласно ГОСТ 173-79) со следующими параметрами: продолжительность включения (это отношение времени работы двигателя к времени всего цикла) ПВ = 0.4,

время цикла $t_{\text{ц}} = 10$ мин. с рабочим током $I_p = 1.3I_n$. Квазиустановившееся состояние наступает через 4 часа. Результаты расчета температуры в различные моменты времени, посчитанные с разным шагом, приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Повторно-кратковременный режим S3

Номер цикла		5	10	15	20	25
Точный расчет	θ_n	44.7	68.3	80.3	86.7	90.2
	$\theta_{\text{макс}}$	76.1	98.5	110.2	116.5	120.0
$\Delta t = 30$ сек	θ_n	44.5	68.1	80.1	86.4	90.0
	$\theta_{\text{макс}}$	77.2	99.7	111.4	117.8	121.3

Из табл. 2 видно, что в случае осредненного тока с шагом $\Delta t = 30$ сек. полученные значения температуры практически не отличаются от значений, рассчитанных с шагом $\Delta t = 1$ сек. Следовательно, можно сделать вывод: осреднение по току за период не вносит ошибки в вычисление температуры.

Возможен режим S3 с меняющейся нагрузкой. В отличие от предыдущих расчетов, ток в данном случае не идеализированная постоянная величина, а представляет собой сумму 3-х составляющих:

$$I_{\text{ст}} = I_0 + I_1 \cdot \sin(\omega t + \phi) + I_2 \cdot x[0...1], \quad (6)$$

где: I_0 – постоянная составляющая тока статора (речь идет о действующих значениях тока),

I_1 – синусоидальная составляющая тока статора,

I_2 – случайная составляющая,

$x[0...1]$ – значение случайной величины.

В табл. 3 представлены рассчитанные различными методами (с шагом $\Delta t = 1$ сек, по значению тока в данный момент времени и шагом $\Delta t = 30$ сек по усредненному току на протяжении всего рабочего интервала) значения температур начала цикла θ_n и максимальной температуры в цикле $\theta_{\text{макс}}$ с такими параметрами: вес составляющих $I_0 = 1.0 I_n$, $I_1 = 0.5 I_n$, $I_2 = 0.2 I_n$, что соответствует среднему эквивалентному току $I_{\text{срЭ}} = 1.3 I_n$; для расчетов во всех циклах форма тока была принята одинаковой; расчет проводился до достижения квазиустановившегося температурного состояния.

Таблица 3 - Расчет сложного повторно-кратковременного режима S3

Номер цикла		5	10	15	20	25
Точный расчет	θ_n	44.7	68.3	80.3	86.7	90.2
	$\theta_{\text{макс}}$	76.1	98.5	110.2	116.5	120.0
$\Delta t = 30$ сек, усреднение тока за все время работы I_p	θ_n	45.2	69.0	80.9	87.4	90.9
	$\theta_{\text{макс}}$	77.4	99.6	111.1	117.4	120.9

На рис. 2 представлен вид графиков тока и температур в сложном режиме S3 – тока $I(t)$, температуры, рассчитанная по току $\theta(t)$, и осредненному току $\theta_{\text{ср}}(t)$.

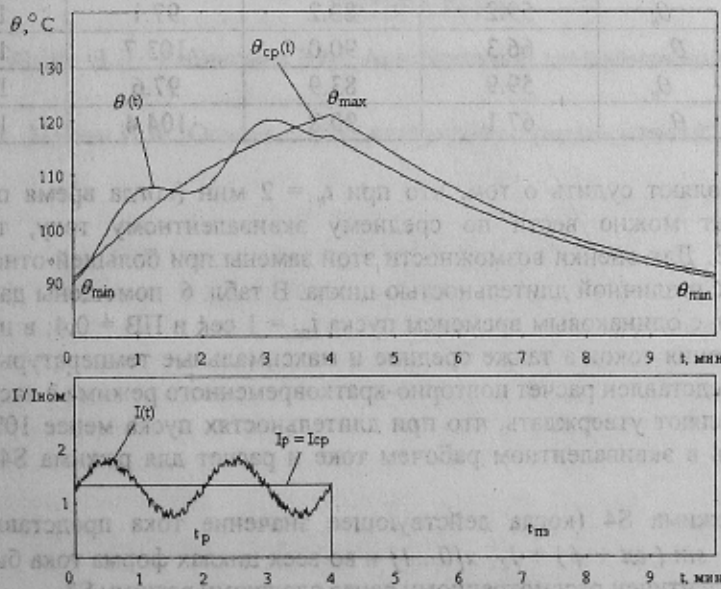


Рисунок 2 - Квазиустановившееся состояние в режиме S3

Из табл. 3 и рис. 2 следует, что для достаточно точного отображения температурных процессов ($\pm 1.5^\circ\text{C}$) достаточно проводить вычисления с итерационным шагом $\Delta t = 30$ сек. по току, осредненному за весь рабочий интервал. Также видно, что несмотря на некоторое различие кривых температуры, значения максимальной $\theta_{\text{макс}}$ и средней $\theta_{\text{ср}}$ температур, определенные разными способами, практически одинаковы. Следует отметить, что в процессе расчета с меньшим шагом колебания нагрузки (а как следствие, и тока) низкой частоты (до 10^2 Гц) оказывают влияние на форму кривой температуры, а колебания более высокой частоты (до 1 Гц) сглаживаются. Также видно, что колебания тока, обусловленные синусоидальной составляющей низкой частоты, имеющие амплитуду до $0.5I_n$ (и как следствие, увеличивающие переменные потери P в 2.25 раза) могут в процессе расчета на $5-7^\circ\text{C}$ отклонять температуру от среднего эквивалентного значения. Подобные расчеты также были проведены для режимов со значениями ПВ = 0.25 и ПВ = 0.15. Результаты расчета температуры и выводы для них идентичны.

В табл. 4. представлены данные о температуре, посчитанной с разным шагом Δt для повторно-кратковременного режима с частыми пусками S4 (ПВ = 0.4, время цикла $t_u = 2$ мин, время пуска $t_{nc} = 1$ сек, что соответствует рабочему току $I_p = 1.2 I_n$); идентичность предварительных расчетов процесса пуска с различным значением шага $\Delta t = 0.1$ сек и $\Delta t = 1$ сек позволяет утверждать, что ток пуска можно принять среднему эквивалентному току пуска $I_{nc} = 5.5 I_n$; расчет велся до наступления квазиустановившегося состояния.

Таблица 4 - Повторно-кратковременный режим с частыми пусками S4

Номер цикла		20	40	60	80	120
Точный расчет	θ_n	59.2	83.2	97.1	105.4	113.9
	$\theta_{\text{макс}}$	66.3	90.0	103.7	112.1	120.5
Осредненный расчет	θ_n	58.6	82.6	96.5	104.8	113.2
	$\theta_{\text{макс}}$	65.9	89.5	103.2	111.5	119.9

Данные табл. 4 показывают, что, как и в режиме S3, осреднение по току за период практически не вносит ошибки в вычисление температуры.

Если же время пуска относительно невелико по сравнению с рабочим интервалом, то необходимо рассмотреть возможность учета пускового тока в осредненном рабочем режиме, т.е. ток пуска входит в рабочий интервал и рассчитывается не отдельно со своими значениями теплопроводностей, а как часть рабочего интервала, т.е. средний эквивалентный ток будет равен:

$$I_{\text{срЭ}} = \sqrt{\frac{I_{nc}^2 \cdot t_{nc} + \sum I_i^2 \cdot t_i}{t_{nc} + \sum t_i}} \quad (7)$$

и расчет температуры будет эквивалентен расчету режима S3. В табл. 5 приведено сравнение расчета режима S4 с расчетом по эквивалентному рабочему току.

Таблица 5 - Сравнение повторно-кратковременного режима S4 с эквивалентным режимом S3

Номер цикла		20	40	60	80	120
Режим S4	θ_n	59.2	83.2	97.1	105.4	113.9
	$\theta_{\text{макс}}$	66.3	90.0	103.7	112.1	120.5
Эквивалентный режим S3	θ_n	59.9	83.9	97.6	105.9	114.3
	$\theta_{\text{макс}}$	67.1	90.8	104.4	112.7	121.0

Данные табл. 5 позволяют судить о том, что при $t_u = 2$ мин (когда время пуска t_{nc} занимает 2% от рабочего интервала) расчет можно вести по среднему эквивалентному току, т.е. заменять режим S4 эквивалентным режимом S3. Для оценки возможности этой замены при большей относительной длительности пуска рассмотрим режимы с различной длительностью цикла. В табл. 6 помещены данные расчета температур для $t_u = 1$ мин и $t_u = 0.5$ мин с одинаковым временем пуска $t_{nc} = 1$ сек и ПВ = 0.4; в нее входят относительные длительности пуска, отношения токов а также средние и максимальные температуры в квазиустановившемся состоянии. Там же будет представлен расчет повторно-кратковременного режима с частыми пусками S4.

Данные табл. 6 позволяют утверждать, что при длительностях пуска менее 10% от рабочего интервала пусковой ток можно учесть в эквивалентном рабочем токе и расчет для режима S4 вести так же как и для режима S3.

Анализ сложного режима S4 (когда действующее значение тока представляло собой сумму трех составляющих: $I_{cm} = I_o + I_1 \cdot \sin(\omega t + \phi) + I_2 \cdot x[0...1]$ и во всех циклах форма тока была одинаковой) здесь не приводится, поскольку он идентичен рассмотренному ранее сложному режиму S3.

Таблица 6 - Сравнение повторно-кратковременного режима с частыми пусками S4 с эквивалентным режимом S3 при различных длительностях цикла

Длительность цикла $t_{ц}$, мин		2	1	0.5
$t_{nc} / t_{p}, \%$		2	4	10
$I_{ср\Delta} / I_n$		1.43	1.62	1.96
Режим S4	$\theta_{ср}$	117.4	150.3	216.0
	$\theta_{макс}$	120.5	151.6	217.1
Эквивалентный режим S3	$\theta_{ср}$	117.1	149.2	212
	$\theta_{макс}$	121.0	151.3	213.6

Был также рассмотрен режим S4 с несколькими пусками. Данный расчет ставил собой цель проверить возможность учета n пусков за время работы с длительностью t_{nc} в «эквивалентном» пуске в начале рабочего цикла с временем пуска $t_{nc\Delta} = n \cdot t_{nc}$. Результаты эксперимента приведены в табл. 7.

Таблица 7 - Расчет температуры в режиме S4 с несколькими пусками

Номер цикла		10	20	30	40
5 пусков с $t_{nc} = 1$ сек.	θ_n	90.1	130.7	160.8	183.6
	$\theta_{макс}$	108.2	148.0	177.7	200.3
1 пуск с $t_{nc\Delta} = 5$ сек.	θ_n	86.3	126.5	156.2	178.8
	$\theta_{макс}$	106.5	146.5	176.2	198.8

Из табл. 7 видно, что погрешность температуры при учете эквивалентного пуска составляет от 2-х до 5-ти °С, что является достаточно точным и говорит о том, что данный метод учета («эквивалентный» пуск) вполне приемлем для расчета температуры в режиме S4 с несколькими пусками. Можно сделать вывод, что увеличение относительной длительности пуска резко увеличивает среднее значение температуры в цикле, и значительно уменьшает время, за которое температура достигает максимально допустимого значения.

Предложенный алгоритм работы системы, основанный на дискретном вычислении температуры позволяет осуществлять контроль с достаточно высокой степенью точности. Контроль значений температуры различных узлов двигателя в повторно-кратковременных режимах S3 и повторно-кратковременных режимах с частыми пусками S4 можно проводить через достаточно большие промежутки времени (30-60 сек.) по среднему эквивалентному току за это время. Выяснено, что колебания тока, частотой 1-2 Гц не оказывают влияния на изменение температуры узлов; при более низких частотах (0.1 – 0.01 Гц) даже при относительно высоком размахе колебаний тока (1 – 1.5 $I_{ном}$) изменение температуры не превышает 5% от среднего значения. В повторно-кратковременных режимах работы с несколькими пусками в цикле расчет можно вести по среднему эквивалентному пусковому току, а общее время пуска находить как сумму времен этих пусков. Расчеты также показали, что при времени пуска не более 10% от рабочего интервала расчет температуры можно проводить по среднему току за весь цикл.

Предложенный алгоритм функционирования был применен при проектировании системы контроля и прогнозирования температурного состояния АД, работающих в повторно-кратковременных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стариков Б.Я., Азарх В.Л., Рабинович З.М. Асинхронный электропривод очистных комбайнов. – М: Недра, 1981 – 281 с.
2. Демидович Б.П., Морон И.А., Основы вычислительной математики. – М: Наука, 1966 – 644 с.