

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М.М., 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 and prognostication of asynchronous motors, working in diverse modes.*

Температуры узлов асинхронных двигателей (АД), работающих в повторно-кратковременных режимах, постоянно изменяются, их величины зачастую превышают предельно допустимые значения, что может привести к преждевременному выходу да из строя. Контроль теплового состояния узлов АД достаточно сложен, поэтому создание системы непрерывного контроля и прогнозирования температуры обмоток АД, работающих в различных повторно-кратковременных режимах и различных характерах нагрузки является актуальным.

Непрерывный контроль температуры позволяет осуществлять защиту обмоток от тепловых перегрузок, когда их температура превышает допустимую для данного класса изоляции  $\theta_{доп}$ , а также фиксировать аварийные ситуации и адекватно реагировать на их появление. Например, при заторможенном роторе имеет место 5-8-ми кратное превышение тока, что приводит к высокой скорости нарастания температуры в обмотках, и, если она превысит  $8^\circ\text{C}/\text{с}$ , обмотка может разрушиться еще до достижения предельно допустимой температуры  $\theta_{доп}$ ; или возникновение несимметричных режимов (при обрыве линейного провода повторный пуск может привести к значительным токовым перегрузкам) и пр. Помимо перечисленных задач непрерывный температурный контроль позволяет осуществлять учет расхода ресурса изоляционных материалов обмоток.

Системы непрерывного контроля могут быть построены на базе непосредственного и косвенного измерения температуры. Непосредственное измерение температуры имеет неоспоримые преимущества, но требует использования датчиков температуры, установка и эксплуатация которых сопряжена с рядом технологических трудностей: сложность установки датчиков в обмотку, искажения при передаче маломощного сигнала датчика за счет внешних факторов (магнитные поля, шумы в линии связи и т.д.). Кроме того, невозможна передача сигнала от двигателей подвижных механизмов. В связи с этим целесообразно использование цифровых систем, основанных на косвенном контроле температуры с использованием тепловых моделей АД, где входным сигналом является ток и напряжение обмотки статора.

Возможная структурная схема системы контроля и прогнозирования приведена на рис 1. Она состоит из измерительно-преобразовательного комплекса (ИПК) и вычислительного комплекса (ВК), соединенного с ИПК линией связи (ЛС).

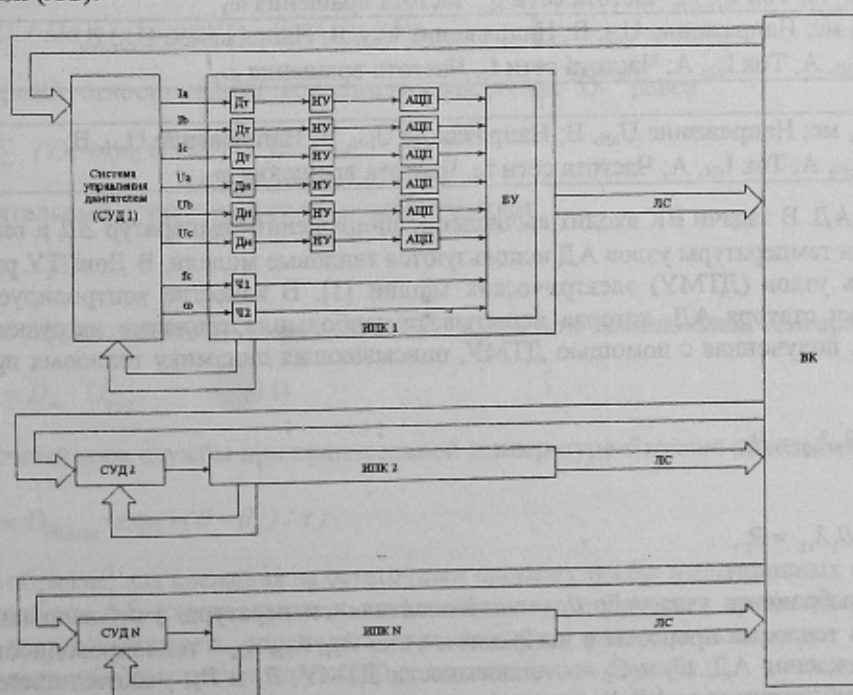


Рисунок 1 - Структурная схема системы контроля и прогнозирования

Возможен вариант применения системы также для контроля группы двигателей, для этого ИПК устанавливается на каждый двигатель, а данные от всех ИПК поступают по ЛС в один ВК.

ИПК состоит из измерительной и преобразовательной частей. Измерительная часть включает в себя датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), нормирующие усилители (НУ) и дискретные измерители частоты сети  $f_c$  и скорости вращения  $\omega$  (Ч1 и Ч2 соответственно); преобразовательная часть включает в себя устройства АЦП и блок управления (БУ). В функции ИПК входит: непрерывное измерение токов и напряжений для последующего преобразования их в действующие значения, измерение скорости вращения вала двигателя, частоты сети с последующей передачей их в ВК по ЛС через фиксированные промежутки времени, а также, в случае возникновения аварийной ситуации давать команду на отключение двигателя. ИПК может быть выполнен на базе однокристалльной микро-ЭВМ.

Сведения от всех ИПК поступают в ВК (один для всей системы). В задачи ВК входит вычисление по определенным значениям тока и напряжения, частот и скоростей вращения значений тепловых потерь и, расчет по ним приращений температур узлов  $\Delta\theta$  двигателя за время между посылками информации  $t_{лс}$ . В качестве ВК может быть использована ПЭВМ или отдельный микропроцессорный модуль достаточно высокой вычислительной мощности.

ИПК функционирует следующим образом: снимаемый с датчиков сигнал поступает на НУ, где производится его нормирование. После этого производится преобразование сигналов в цифровой формат. Оцифровка значений тока и напряжения происходит с определенной частотой, зависящей от точности, (обычно, достаточно 200 точек на период) и производится постоянно. Измерения всех токов и напряжений должны производиться синхронно и через строго фиксированные промежутки времени. БУ производит возведение в квадрат и суммирование каждого из значений тока и напряжения и хранит в памяти их сумму, чтобы через определенное время вычислить действующий ток или напряжение. В качестве измерителей частоты сети и вращения используются счетчики импульсов. По данным, приходящим от датчиков тока, напряжения и частот вращения БУ формирует массив данных, который через строго определенные промежутки времени  $t_{лс}=(30-60)$  с передается по ЛС в ВК. Отдельно следует отметить, что при возникновении аварийного режима решение о продолжении функционирования в нем двигателя принимается в ИПК, поскольку за время  $t_{лс}$  двигатель может выйти из строя. Следовательно, ИПК помимо связи с ВК должен иметь непосредственную связь с системой управления двигателем (СУД).

Массив включает в себя величины, позволяющие судить о характеристиках двигателя в возможных режимах работы за время  $t_{лс}$ . Его элементы представляют собой набор данных типа запись. В состав записи входят следующие составляющие: Интервал – тип рабочего интервала (пуск, работа, пауза и т.д.); Длительность – длина интервала в миллисекундах; данные о трех средних эквивалентных напряжениях и средних эквивалентных токах на интервале; данные о частоте сети и скорости вращения. Возможная структура массива представлена в табл. 1.

Таблица 1 - Структура массива данных, поступающих в ВК.

Интервал 1:	Длительность $t_1$ , мс; Напряжение $U_{a1}$ , В; Напряжение $U_{b1}$ , В; Напряжение $U_{c1}$ , В; Ток $I_{a1}$ , А; Ток $I_{b1}$ , А; Ток $I_{c1}$ , А; Частота сети $f_1$ , Частота вращения $\omega_1$
Интервал 2:	Длительность $t_2$ , мс; Напряжение $U_{a2}$ , В; Напряжение $U_{b2}$ , В; Напряжение $U_{c2}$ , В; Ток $I_{a2}$ , А; Ток $I_{b2}$ , А; Ток $I_{c2}$ , А; Частота сети $f_2$ , Частота вращения $\omega_2$
...	...
Интервал N:	Длительность $t_N$ , мс; Напряжение $U_{aN}$ , В; Напряжение $U_{bN}$ , В; Напряжение $U_{cN}$ , В; Ток $I_{aN}$ , А; Ток $I_{bN}$ , А; Ток $I_{cN}$ , А; Частота сети $f_N$ , Частота вращения $\omega_N$

ВК обслуживает группу АД. В задачи ВК входит вычисление приращений температур  $\Delta\theta$  и температуры узлов АД  $\theta$ . При формировании температуры узлов АД используются тепловые модели. В ДонГТУ разработана динамическая тепловая модель узлов (ДТМУ) электрических машин [1]. В качестве контролируемого узла выбрана лобовая часть обмотки статора АД, которая испытывает наибольшие тепловые нагрузки. Система дифференциальных уравнений, полученная с помощью ДТМУ, описывающая динамику тепловых процессов в выбранном узле имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1(\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \theta_2 \lambda_{12} &= P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2(\lambda_{22} + \lambda_{12}) - \theta_1 \lambda_{12} &= P_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $\theta_1$  – температура выбранного узла АД;  $\theta_2$  – эквивалентная температура, учитывающая реакцию остальных частей двигателя на тепловые процессы в выбранном узле;  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$  - теплопроводности ДТМУ, соответствующие режиму охлаждения АД;  $C_1$  и  $C_2$  - теплоемкости ДТМУ;  $P_1$  и  $P_2$  – соответственно потери мощности (источник тепла) в выбранном узле АД и суммарные потери в остальных частях двигателя.

На основе приведенных уравнений составляется алгоритм формирования температуры в выбранном узле. Для  $i$ -ого интервала, используя известные температуры в начале интервала  $\theta_{1,i-1}$  и  $\theta_{2,i-1}$  рассчитываются приращения температур  $\Delta\theta_{1i}$  и  $\Delta\theta_{2i}$  за время  $\Delta t = t_{nc}$  по формулам

$$\Delta\theta_{1i} = (P_{1i} - \theta_{1,i-1}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{2,i-1}\lambda_{12}), \quad \Delta\theta_{2i} = (P_{2i} - \theta_{2,i-1}(\lambda_{22} + \lambda_{12}) + \theta_{1,i-1}\lambda_{12}). \quad (2)$$

Тогда температуры на  $i$ -м интервале соответственно равны:

$$\theta_{1i} = \theta_{1,i-1} + \Delta\theta_{1i}, \quad \theta_{2i} = \theta_{2,i-1} + \Delta\theta_{2i}. \quad (3)$$

Пассивные параметры ДТМУ теплоемкости ( $C_1$  и  $C_2$ ) и теплопроводности ( $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$ ) всех возможных условий охлаждения записаны в памяти ВК для каждого АД. Кроме того в памяти хранятся постоянные  $P_{постн}$ , переменные  $P_{перн}$  и добавочные  $P_{добн}$  потери при номинальной нагрузке. Следует отметить, что режим работы АД постоянно меняется для формирования переменных и добавочных потерь на  $i$ -ом интервале необходимо иметь коэффициент кратности тока  $\beta_{ii} = I_i/I_n$ . Тогда

$$P_{перi} = \beta_{ii}^2 (1 + \alpha(\theta_i - \theta)) P_{перн}, \quad P_{добi} = \beta_{ii}^2 P_{добн}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Постоянные потери  $P_{постн}$  могут изменяться при колебаниях напряжения  $U$ . В этом случае постоянные потери на  $i$ -ом интервале можно скорректировать

$$P_{постi} = P_{постн} (U/U_n), \quad (5)$$

При определении расхода ресурса изоляционных материалов используют уравнения, полученные Вант Гоффом и Аррениусом [2], с помощью которых определяют срок службы изоляционных материалов  $D_\theta$  при температуре  $\theta$ .

$$D_\theta = D_{\theta_n} \cdot \exp(E_a(1/\theta - 1/\theta_n)/R), \quad (6)$$

где:  $E_a$  — энергия активации,

$R=8.317$  Дж/моль град — универсальная газовая постоянная.

Для упрощенных расчетов можно использовать формулу

$$D_\theta = D_{\theta_n} \cdot \exp(-(\theta - \theta_n)/\tau) \quad (7)$$

Величина  $\tau \approx \theta_{дон}^2 R/E_a$  принимается постоянной величиной для соответствующего класса изоляции.

При эксплуатации электрических машин определенный интерес представляет остаточный срок службы  $D_{ост}$  изоляционных материалов, особенно в том случае когда температура обмоток постоянно изменяется. При этом удобно воспользоваться относительными единицами, принимая за базу  $D_{\theta_n}$ . В этом случае относительный использованный ресурс изоляции  $D^*$  за время эксплуатации  $D_i$  с температурой  $\theta_i$  будет равен:

$$D_{\theta_i}^* = D_i / D_{\theta_n} = (D_i \cdot \exp((\theta_i - \theta_n)/\tau)) / D_{\theta_n}. \quad (8)$$

Суммарный относительный использованный ресурс  $D^*$  равен

$$D^* = \sum (D_i \cdot \exp((\theta_i - \theta_n)/\tau)) / D_{\theta_n}. \quad (9)$$

Относительный остаточный срок службы составит

$$D_{ост}^* = 1 - D^*. \quad (10)$$

Соответственно остаточный срок службы  $\tilde{D}_{\theta_{ном ост}}$  при номинальной температуре  $\theta_n$  равен

$$D_{\theta_{ном ост}} = D_{\theta_n} \cdot D_{ост}^*. \quad (11)$$

Остаточный срок службы при произвольной температуре  $\theta$  можно определить по формуле

$$D_{\theta_{ост}} = D_{\theta_{ном ост}} \cdot \exp(-(\theta - \theta_n)/\tau). \quad (12)$$

Таким образом, для слежения за остаточным сроком службы изоляционных материалов за определенный промежуток работы АД (смена, сутки и т.д.) необходимо определять среднюю температуру и длительность работы, что дает возможность определять относительный расходуемый ресурс за выделенный промежуток времени, а следовательно и результирующий остаточный срок службы.

Задачей прогнозирования является оценка температурного состояния обмоток АД, работающих в повторно-кратковременных режимах с соответствующим графиком нагрузки. При этом интерес представляют

характеристики квазиустановившегося состояния, которое теоретически наступает через бесконечно большое время, а практически – за время теплового переходного процесса в продолжительном режиме S1. Если средняя температура в квазиустановившемся состоянии  $\theta_{cp}$  будет превышать допустимую  $\theta_{дон}$ , то необходимо определить допустимое количество включений, такое чтобы  $\theta_{cp}$  не превышала  $\theta_{дон}$ .

При осуществлении прогнозирования важно иметь информацию о графике нагрузок АД, которые работают в известном повторно-кратковременном режиме. Такими могут выступать: осредненная диаграмма нагрузки цикла и наиболее напряженный график цикла.

При формировании осредненного графика нагрузки вначале необходимо определить, к какому из повторно-кратковременных режимов работы предусмотренных ГОСТ183-79 (S3 – повторно кратковременный режим, S4 – повторно-кратковременный режим с частыми пусками и т.д.) подходит данный режим работы АД. Исходя из этого, необходимо после каждого цикла производить измерения характеристик нагрузочной диаграммы в нем и фиксировать их средние значения. Например, в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками S4 имеют место три интервала: пуск, работа и пауза. Это означает, что необходимо получить средние значения следующих величин: среднее время пуска  $t_{nc\ cp}$ , средний пусковой ток  $I_{nc\ cp}$ , среднее время работы  $t_{p\ cp}$ , средний рабочий ток  $I_{p\ cp}$  и среднее время паузы  $t_{m\ cp}$ .

При выборе наиболее напряженного цикла следует выделять наиболее тяжелый пусковой режим, в этом случае в основном критерием выступает максимальная тепловая мощность, которая выделяется при пуске, определяемая по величине  $I_{nc}^2 t_{nc}$ . При выборе характеристик для наиболее напряженного цикла необходимо рассматривать наибольшую относительную тепловую энергию цикла, определяемую с помощью выражения:  $\Sigma(I^2 t_i) / t_{\Sigma}$ .

Расчет характеристик теплового переходного процесса для прогнозирования теплового состояния в повторно-кратковременном режиме осуществляется поочередно для каждого цикла до достижения квазиустановившегося состояния. Расчет производится численными методами и начинается с 1-го цикла путем определения приращений температуры  $\Delta\theta$  на каждом интервале цикла по формуле (2). Мощность источников тепла  $P$ , на каждом интервале определяется в соответствии с токовой нагрузкой  $\beta_{Ti}$  по формулам (4) и (5). Далее определяется приращение температуры в цикле, температура в конце цикла и средняя температура цикла  $\theta_{cp}$ . После чего производится расчет температур в последующих циклах до достижения квазиустановившегося. В ходе расчета полученное значение среднее значение температуры в цикле  $\theta_{cp}$  сравнивается с допустимой температурой  $\theta_{дон}$  и, если оно превысит допустимую, фиксируется номер цикла и последующее число включений. Методика расчета одинакова как для среднего, так и для максимального циклов.

Осредненный и наиболее напряженный циклы формируются на протяжении всей смены. Учитывая медленный характер тепловых переходных процессов в АД и возможности современной вычислительной техники, осуществлять прогнозирование можно не чаще, чем один раз за время  $t_{np} = (10-20) t_{nc}$ . В целом, расчет температуры при прогнозировании, проводящийся численными методами, аналогичен ее расчету при контроле, с той разницей, что ведется с шагом  $\Delta t$  равным времени интервала (пуск, работа или пауза), что практически не отражается на результатах расчета (погрешность не превышает 1%), но значительно сокращает их время [3].

Задачи подобного рода ставят серьезные требования к элементной базе и, в частности, к вычислительной мощности как БУ и ВК, что особенно важно при контроле группы двигателей. Например, расчет теплового переходного процесса до достижения квазиустановившегося состояния для одного двигателя с шагом итераций  $\Delta t = 0.1$  секунда, производимый на ПЭВМ класса Pentium занимает по времени около 150 мс. Следовательно, в идеальном случае за время  $t_{nc} = 30$  секунд, можно полностью просчитать переходные процессы в 200 двигателях, однако, учитывая, что еще необходимо время на прием информации, и другие задачи, это количество сокращается. Предварительный расчет показывает, что число контролируемых двигателей для ПЭВМ класса Pentium с частотой 200МГц при  $t_{nc} = 30$  сек. и скорости передачи данных по ЛС в ВК равной 33600 бит/сек., число контролируемых двигателей в наихудшем случае будет не менее 100. В случае прогнозирования, в зависимости от точности и числа рассчитываемых циклов оно может уменьшиться до 50.

При создании лабораторного образца системы в качестве элементной базы для ИПК были использованы ИМС Pic16c774 фирмы MicroChip и AT90S8515 фирмы Atmel; в качестве ЛС был использован стандартный последовательный интерфейс RS-232 с опторазвязкой; роль ВК выполняла ПЭВМ класса Pentium. Испытания лабораторного образца подтвердили работоспособность системы. Применение систем подобного рода позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики АД и обеспечить рациональное использование ресурса изоляции обмоток АД, что продлит срок их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин. - Сб. тр. Одесского государственного политехнического университета, Вып. 53, К., 1999 - С.70-73.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. - М: ВШ, 1988 - 232с.
3. Малеев Д.М. Особенности построения системы контроля теплового состояния асинхронных двигателей – Сб. тр. Донецкого государственного технического университета, серия «Электротехника и энергетика», Вып 17, Донецк, 2000 – с. 96-101.