

## КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Федоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М.

Донецкий государственный технический университет

Michael@fedorov.dc.donetsk.ua

*Considered construction principles of microprocessor's control system of thermal fortune of asynchronous motors in repeatedly-momentary routine with frequent starting*

Обмотки асинхронных двигателей (АД), работающих в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками (S4) и электрическим торможением (S5), подвергаются значительным тепловым перегрузкам, поэтому контроль их температуры и защита от тепловых перегрузок является актуальной задачей. Контроль температуры обмоток АД можно осуществлять с помощью устройств, основанных на непосредственном измерении температуры с использованием встроенных датчиков или устройств с косвенной оценкой температуры, когда ее величину получают путем моделирования по величине тока статора.

Устройства с непосредственным измерением температуры имеют неоспоримые достоинства и нашли широкое применение. Однако их использование затруднено по ряду причин. К ним следует отнести: трудности укладки датчиков в обмотки при автоматизированном процессе изготовления обмоток; передача маломощного сигнала от датчика температуры к станции управления АД, находящейся на значительном удалении, или от двигателей подвижных механизмов, получающих питание через троллеи, а также от обмотки ротора АД с фазным ротором. Имеются проблемы с точки зрения техники безопасности при встраивании датчиков температуры в обмотки высоковольтных двигателей. В этой связи применение устройств с косвенной оценкой температуры, когда входным сигналом является ток обмотки статора, более предпочтительно.

Основным требованием к устройствам с косвенной оценкой температуры является наличие в ней узла моделирования, позволяющего адекватно воспроизводить в нем тепловые переходные процессы в обмотках АД с достаточной степенью точности. В этой связи перспективным является использование динамических тепловых моделей (ДТМУ) электрических машин, разработанных в Донецком государственном техническом университете. Модель представляет собой многополюсник, на входы (вход) которого подаются сигналы, пропорциональные мощностям источников тепла (потерям в электрической машине), а на выходе получается сигнал, пропорциональный температуре  $\theta(t)$  выбранного узла машины. Параметры схемы такого многополюсника определяются его входными и выходными динамическими характеристиками. Входными характеристиками являются мощность источников тепла при различных коэффициентах нагрузки, а выходными – кривые нагрева (охлаждения) выбранного узла при различных условиях охлаждения, представляющие собой временную характеристику или реакцию системы на скачок нагрузки. Контролируемым узлом может быть выбран любой элемент конструкции электрической машины. Практическую же ценность представляют элементы обмоток с наиболее напряженными тепловыми нагрузками. Например, для АД с самовентиляцией такими являются лобовые части обмотки статора. С точки зрения условий охлаждения для АД следует выделить два режима: нагрев при вращающемся роторе и охлаждение (при неподвижном роторе). Аналитические выражения, описывающие кривые нагрева и охлаждения АД, имеют вид

$$\theta_{нз} = \theta_{уст} (1 - a_{1нз} \cdot \exp(-t/T_{1нз}) - a_{2н} \cdot \exp(-t/T_{2нз})), \quad (1)$$

$$\theta_{ох} = \theta_{уст} \cdot (a_{1ох} \cdot \exp(-t/T_{1ох}) + a_{2нг} \cdot \exp(-t/T_{2ох})), \quad (2)$$

где:  $\theta_{нз}$  и  $\theta_{ох}$  – превышения температуры выбранного узла АД над температурой окружающей среды в режимах нагрева и охлаждения;

$T_{1нз}$  и  $T_{1ох}$  – большие постоянные времени экспонент в режимах нагрева и охлаждения;

$T_{2нз}$  и  $T_{2ох}$  – малые постоянные времени экспонент;

$a_{1нз}$ ,  $a_{2нз}$ ,  $a_{1ох}$ ,  $a_{2ох}$  – коэффициенты удельного веса экспонент;

$\theta_{уст}$  – установившееся превышение температуры узла АД при постоянном коэффициенте нагрузки  $\beta$ .

Выражения (1) и (2) отражают особенности форм кривых тепловых переходных процессов, получаемых при решении системы уравнений, описывающих многотельную эквивалентную тепловую схему (ЭТС). Экспоненты с большой постоянной времени характеризуют общую длительность переходного процесса  $t_{нз}$ , а экспоненты с малой постоянной времени – скорость изменения температуры  $d\theta/dt$  на начальных этапах тепловых переходных процессов.

При  $t = 0$  скорость изменения температуры в режиме нагрева и охлаждения соответственно равны

$$\frac{d\theta_{нз}(0)}{dt} = \theta_{уст} \cdot (a_{1нз} / T_{1нз} + a_{2нз} / T_{2нз}) = \theta_{уст} \cdot b_{нз}, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_{ох}(0)}{dt} = -\theta_{уст} \cdot (a_{1ох} / T_{1ох} + a_{2ох} / T_{2ох}) = -\theta_{уст} \cdot b_{ох}, \quad (4)$$

где  $b_{нз}$  и  $b_{ох}$  – коэффициенты, характеризующие относительную скорость изменения температуры в режимах нагрева и охлаждения при  $t = 0$ .

Наличие экспонент с двумя постоянными времени свидетельствует о том, что эквивалентная схема физической модели должна иметь два накопителя энергии (теплоемкости). Для многополюсников распространены Т- и П-образные схемы замещения. На рис.1 приведена эквивалентная П-образная схема тепловой физической модели узла электрической машины.

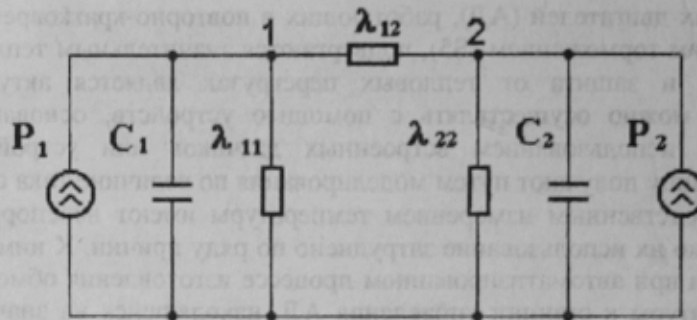


Рисунок 1 - Схема тепловой модели

Схема включает: два источника тепла  $P_1$  и  $P_2$ , теплоемкости  $C_1$  и  $C_2$ , тепловые проводимости  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$ . В узле 1 формируется температура выделенного узла электрической машины. Схема замещения имеет вид двухтельной ЭТС. Трактовка физических процессов может быть следующая. В узле 1 формируется температура выбранного узла электрической машины, а узел 2 отражает суммарную реакцию остальных элементов конструкции машины на тепловые процессы в рассматриваемом узле. Тогда величина  $P_1$  – соответствует потерям мощности в выбранном узле,  $C_1$  – его теплоемкость.  $P_2$  – суммарные потери мощности в остальной части машины, а величину теплоемкости  $C_2$  необходимо подбирать таким образом, чтобы тепловая энергия, запасенная в  $C_2$  в установившемся режиме, равнялась тепловой энергии, запасенной в остальных элементах конструкции электрической машины. Параметры схемы должны быть подобраны таким образом, чтобы в ней имели место процессы, адекватные тепловым переходным процессам в АД и соответствовали выражениям (1), (2), (3), (4).

Необходимо также проверить способность ДТМУ воспроизводить динамику теплового состояния АД в повторно-кратковременных режимах работы, при ненулевых начальных условиях, путем сравнения экспериментальных кривых нагрева при различных ПВ с расчетными в одинаковых условиях. При необходимости пассивные параметры ДТМУ должны быть скорректированы.

Техническая реализация системы теплового контроля АД может быть осуществлена на основе аналогового или дискретного принципов. Аналоговый вариант может быть реализован в виде электрической модели ДТМУ, собранной из R-C цепочек или с использованием операционных усилителей. Устройства тепловой защиты АД с использованием аналоговой модели (УТНЗ-4) прошли успешную апробацию на ряде предприятий. Накопленный опыт эксплуатации свидетельствует о некоторых недостатках и ограничениях – сложности подбора емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , особенно для крупных двигателей, формирование потерь  $P_1$  и  $P_2$  и др.

Использование дискретного принципа моделирования позволяет устранить указанные недостатки, что повышает точность моделирования и одновременно расширяет функциональные возможности. Алгоритм формирования температуры в выбранном узле (узлах) АД составляется на основе уравнений теплового состояния (3) и (4). Для  $i$ -го цикла, используя известные температуры в начале цикла  $\theta_{1n_{i-1}}$  и  $\theta_{2n_{i-1}}$  поочередно рассчитываем приращения  $\Delta\theta_{1i}$  и  $\Delta\theta_{2i}$ , а также температуры  $\theta_{1i}$  и  $\theta_{2i}$  в конце каждого интервала цикла. Например, в режиме S4 цикл состоит из трех временных интервалов: пуск  $t_{nc\ i}$ , работа  $t_{p\ i}$  и пауза  $t_{n\ i}$ . Порядок расчета  $i$ -го цикла следующий:

$$\Delta\theta_{1nc_i} = (P_{1nc_i} - \theta_{1n_{i-1}}(\lambda_{11n} + \lambda_{12n}) + \theta_{2n_{i-1}}\lambda_{12n}) \cdot t_{nc_i} \cdot C_1^{-1},$$

$$\Delta\theta_{2nc_i} = (P_{2nc_i} - \theta_{2n_{i-1}}(\lambda_{11n} + \lambda_{12n}) + \theta_{1n_{i-1}}\lambda_{12n}) \cdot t_{nc_i} \cdot C_2^{-1},$$

$$\theta_{1nc_i} = \theta_{1nc_{i-1}} + \Delta\theta_{1nc_i}; \theta_{2nc_i} = \theta_{2nc_{i-1}} + \Delta\theta_{2nc_i};$$

$$\Delta\theta_{2nc_i} = -(\theta_{1p_i}(\lambda_{22ox} + \lambda_{12p}) + \theta_{1p_i}\lambda_{12ox}) \cdot t_{nc_i} \cdot C_2^{-1},$$

$$\Delta\theta_{2p_i} = (P_{2p_i} - \theta_{2nc_i}(\lambda_{11p} + \lambda_{12p}) + \theta_{1nc_i}\lambda_{12p}) \cdot t_{p_i} \cdot C_2^{-1},$$

$$\theta_{1p_i} = \theta_{1nc_i} + \Delta\theta_{1p_i}; \theta_{2p_i} = \theta_{2nc_i} + \Delta\theta_{2p_i};$$

$$\Delta\theta_{1nc_i} = -(\theta_{1p_i}(\lambda_{11ox} - \lambda_{12ox}) + \theta_{2p_i}\lambda_{12ox}) \cdot t_{nc_i} \cdot C_1^{-1},$$

$$\Delta\theta_{2nc_i} = -(\theta_{1p_i}(\lambda_{22ox} + \lambda_{12p}) + \theta_{1p_i}\lambda_{12ox}) \cdot t_{nc_i} \cdot C_2^{-1},$$

$$\theta_{1nc_i} = \theta_{1p_i} + \Delta\theta_{1nc_i}; \theta_{2nc_i} = \theta_{2p_i} + \Delta\theta_{2nc_i}.$$

Теплопроводности ДТМУ при пуске можно принять равными  $\lambda_m = (\lambda_{nc} + \lambda_{ox})/2$ . Величины потерь  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  можно определить с помощью Т-образной схемы замещения АД. Ее параметры должны быть введены в память микропроцессорной системы, включая нелинейные зависимости напряжения намагничивающего контура  $U_0$  в функции тока  $I_0$  и потерь в стали  $p_{cm}(U_0)$ . Для двигателей с короткозамкнутым ротором вводятся и параметры вторичного контура  $r_2'(s)$  и  $x_2'(s)$  в функции скольжения. Кроме того, в памяти должны быть зафиксированы потери в обмотках статора  $p_{1mn}$ , ротора  $p_{2mn}$  и добавочные потери  $p_{добн}$  при номинальном токе.

Для определения потерь на интервалах цикла при известном скольжении  $s_i$  формируют комплексы фазного напряжения  $\underline{U}_{0i}$  и тока статора  $\underline{I}_{1i}$ . Рассчитывают напряжение намагничивающего контура  $\underline{U}_{0i}$  и токи по формулам

$$\underline{U}_{0i} = \underline{U}_1 - \underline{I}_{1i} \cdot \underline{z}_1,$$

$$\underline{I}'_{2i} = \underline{U}_{0i} / \underline{z}_{2si}.$$

Далее формируют величины кратности тока  $\beta_{11i} = I_{1i} / I_{1n}$  и  $\beta_{12i} = I'_{2i} / I'_{2n}$ , температуры обмоток статора  $\theta_{ci}$  и ротора  $\theta_{pi}$ , напряжение  $U_{0i}$ , рассчитывают потери в стали  $p_{cm}(U_{0i})$ , потери в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери

$$P_{1M_i} = (\beta_{11i})^2 \cdot P_{1mn} (1 + \alpha(\theta_{ci} - \theta_{окр})),$$

$$P_{2M_i} = (\beta_{12i})^2 \cdot P_{2mn} (1 + \alpha(\theta_{pi} - \theta_{окр})),$$

$$P_{доб1_i} = (\beta_{11i})^2 \cdot P_{добн} / 2,$$

$$P_{доб2_i} = (\beta_{12i})^2 \cdot P_{добн} / 2.$$

где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Полученные величины используются для формирования  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  ДТМУ на интервалах для соответствующего узла (узлов) АД. Следует отметить, что если время интервала ( $t_{pi}$  или  $t_{psi}$ ) значительно превышает 30 с, то при расчете  $\Delta\theta_i$  и  $\theta_i$  следует разбивать временной интервал на несколько каждый длительностью 20-30с.

Из вышеизложенного следует, что в микропроцессорной системе необходимо обеспечить контроль мгновенных значений фазных токов и напряжений в виде массива точек через определенный интервал (не менее 100 точек в периоде), что позволит формировать комплексы токов и напряжений, а также контролировать частоту сети и частоту вращения ротора АД, а следовательно, формировать потери на временных интервалах и др.

На рис. 2 приведена структурная схема микропроцессорной системы контроля температурного состояния АД. Функционально система состоит из трех блоков: блока аналоговых устройств (БАУ), блока цифровых устройств (БЦУ) и блока ввода информации (БВИ). В состав БАУ входят: два трансформатора тока (ТТ), три трансформатора напряжения (ТН), пять нормирующих усилителей (НУ), пять устройств выборки и хранения (УВХ) и аналоговый мультиплексор (АМ) с числом каналов не менее пяти. БЦУ содержит в своем составе следующие блоки: блок вычислений (БВ) - центральная часть системы, оперативное запоминающее устройство

(ОЗУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), два регистра (P1 и P2) и два счетчика (СЧ1 и СЧ2). Блок ввода информации включает в себя пользовательский интерфейс (ПИ) и узел ввода информации о двигателе (ВИД), через который осуществляется ввод кривых нагрева и охлаждения для двигателя данного типоразмера.

Алгоритм работы системы следующий:

- С помощью ВИД и ПИ осуществляется ввод в систему информации о двигателе (кривые нагрева и охлаждения в виде массива точек  $\theta_i=f(t_i)$  или аппроксимированного выражения с двумя экспоненциальными составляющими (1) и (2));
- В БАУ осуществляется преобразование в численный вид мгновенных значений фазных токов и напряжений один раз за 0.2 с, со съемом 2000 отсчетов (200 точек на период) по каждой величине;
- С помощью счетчиков СЧ1 и СЧ2 производится измерение частот сети и вращения АД, данные о которых поступают в БВ;
- Численные данные о фазных токах и напряжениях поступают в БВ, в котором формируются комплексы действующих значений фазных токов и напряжений; их гармонический состав; все виды потерь; интервалы  $\Delta t_{нс}$ ,  $\Delta t_p$  и  $\Delta t_{мз}$  режимов работы двигателя на каждом шаге  $\Delta t_i$ . При помощи введенных с ВИД кривых нагрева и охлаждения, а также пассивных параметров ДТМУ ( $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $C_1$  и  $C_2$ ) рассчитываются  $\Delta\theta_{1b}$ ,  $\Delta\theta_{2b}$ ,  $\theta_{1i}$  и  $\theta_{2i}$  для каждого из интервалов и другие характеристики АД, связанные с возможной несимметрией, плохим гармоническим составом напряжения питания и пр. На основе рассчитанных данных осуществляется формирование тепловых и электромеханических характеристик АД в различных режимах работы.

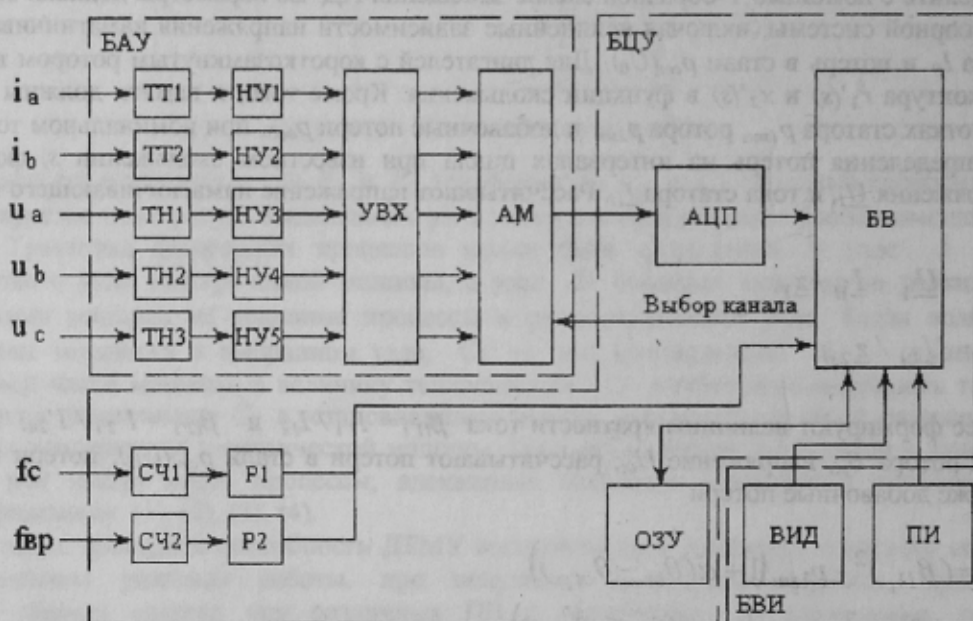


Рисунок 2 - Структурная схема микропроцессорной системы контроля температурного состояния АД

Возможен следующий вариант реализации блоков микропроцессорной системы: нормирующие усилители (НУ1-НУ5), которые могут быть реализованы различными способами, например, на базе микросхем К1401УД7. В качестве микросхем УВХ можно использовать КР1100СК2, мультиплексором может быть микросхема КР590КН6, АЦП реализуется на базе К1113ПВ1. По возможности желательно исполнение блока УВХ-АМ-АЦП в виде единого элемента (примером этого исполнения являются микросхемы МАХ-150, МАХ-155 фирмы МАХИМ, содержащие в одном корпусе сразу 8 УВХ, МУХ и АЦП) для уменьшения его суммарной погрешности. ОЗУ можно выполнить на базе микросхем статической памяти (например, К537РУ17, имеющую объем 8Кбайт или несколько таких). Нежелательно использование динамической памяти, т.к. это приведет к усложнению схемы системы. В качестве регистров P1 и P2 используются К555ИР23. Блок БВ может быть реализован на базе микроконтроллера серии MSC-51 фирмы Atmel или пик-контроллера Pic17Сxxx фирмы MicroChip. Нежелательно использование микросхем КМОП исполнения из-за их низкого быстродействия. Более предпочтительна ТТЛШ-логика.

Предлагаемая система контроля может быть использована для одновременного контроля температуры частей обмотки статора и ротора, осуществлять ряд других функций: прогнозирование теплового состояния, учет использованного ресурса изоляционных материалов обмоток и др. Система может осуществлять контроль группы АД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Ленинград, "Энергия", - 1974, - 840 с., ил.
2. Фритчи В. Применение микропроцессоров в системах управления. М., "Мир", - 1984, - 314 с., ил.