

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М.М., Малеев Д.М.

Кафедра ТОЭ ДонГТУ

E-mail: michael@fedorov.dc.donetsk.ua

### Abstract

*Fedorov M. M., Maleev D. M. Microprocessor's system for control thermal and electromechanical characteristics asynchronous motors. In article has been considered the principles of creation microprocessor's systems for control thermal and electromechanical characteristics asynchronous motors on the base of using dynamical thermal models knots of electrical machines and T-scheme of replacing with taking into account nonlinearity its parameters.*

### Введение

Непрерывный контроль температуры обмоток асинхронных двигателей (АД) является актуальной задачей. Прежде всего, это относится к защите обмоток АД от тепловых перегрузок. Контроль температуры обмоток позволяет учитывать расход ресурса изоляционных материалов. Функциональная зависимость сопротивлений обмоток от температуры оказывает определенное влияние на электромеханические характеристики АД, поэтому непрерывный контроль температуры является важным фактором в алгоритме работы систем автоматического управления электроприводами.

Применяемые в настоящее время устройства непосредственного контроля температуры разделяют по типу применяемых датчиков: термометры сопротивления; терморезисторы с отрицательным коэффициентом электрического сопротивления (ТКС), с положительным ТКС – позисторы; и др. Кроме того, непосредственный контроль температуры может быть осуществлен на базе схем измерения сопротивления обмоток АД. Устройства, основанные на непосредственном измерении температуры, имеют неоспоримые преимущества, и находят свое применение на практике, в основном в системах защиты обмоток АД от тепловых перегрузок. Однако, они обладают определенными недостатками, которые существенно ограничивают возможности их применения. Необходимость укладки датчиков температуры в обмотки существенно усложняют технологический процесс, особенно при автоматизированном процессе изготовления и укладки обмоток. Непосредственное измерение сопротивления обмоток при работающем АД весьма затруднительно. Встроенные в обмотки датчики температуры практически невозможно использовать для электроприводов механизмов, получающих питание от троллеев через контактную систему или двигателей, находящихся на значительном удалении от станций управления, так как практически невозможно получить надежную связь маломощного датчика температуры с исполнительным устройством. Аналогичные проблемы имеют место при контроле температуры в обмотке ротора АД. Ограничено применение встроенных датчиков и в обмотках высоковольтных машин.

Устройства, основанные на косвенной оценке температуры, лишены указанных недостатков. Их основной проблемой является адекватное воспроизведение температуры обмоток (или их частей). Как правило, входным сигналом для них является сигнал напряжения, пропорциональный току обмотки статора, который поступает на вход узла моделирования температуры обмотки. В настоящее время имеется большое количество устройств защиты АД, основанных на косвенной оценке

температуры, однако, большинство из них пригодны для АД, работающих в длительном режиме S1, когда температура обмоток находится в жесткой функциональной зависимости от тока двигателя [1]. Для АД, работающих в повторно-кратковременных и перемежающихся режимах (S3-S8) необходимо учитывать динамику тепловых процессов. Это означает, что устройстве должен быть, обеспечивающий адекватное воспроизведение тепловых переходных процессов в заданном узле АД при различных режимах работы

### 1. Алгоритм формирования температуры обмоток с помощью динамических тепловых моделей узлов.

В настоящее время имеется ряд разработок устройств защиты, использующих тепловую модель (аналог) электродвигателя. Наиболее перспективными являются динамические тепловые модели узлов (ДТМУ) электрических машин, разработанные в ДонГТУ [2]. На рис. 1 приведена схема этой тепловой модели.

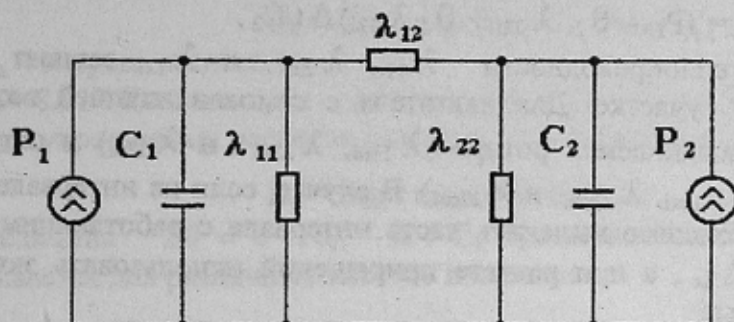


Рисунок 1. - Схема ДТМУ

В узле 1 модели формируется температура  $\theta_i(t)$  любого  $i$ -го узла АД. Пассивные параметры модели - теплопроводности ( $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}$ ) и теплоемкости ( $C_1$  и  $C_2$ ) рассчитываются с помощью экспериментальных кривых нагрева и охлаждения соответствующего узла двигателя. Их величины могут меняться в зависимости от режима охлаждения двигателя. Например, в режиме S3 в АД с самовентиляцией имеет место два состояния - нагрев при вращающемся роторе и охлаждение при неподвижном роторе. Источниками тепла в тепловой модели  $P_1$  и  $P_2$  являются потери мощности в АД.  $P_1$  - в выбранном узле машины, а  $P_2$  - суммарные потери в остальных узлах. Переходные процессы, имеющие место в модели, описываются системой из двух дифференциальных уравнений.

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

где  $\theta_1$  - температура в выбранном узле АД.

Техническая реализация модели в устройствах тепловой защиты может быть осуществлена на основе аналогового или дискретного принципов. Вариант аналоговой модели возможен в виде эквивалентной электрической схемы из R - C цепочек или с использованием операционных усилителей. Устройства защиты с использованием аналоговой модели прошли успешную апробацию на установках ряда предприятий. Накопленный опыт эксплуатации тепловых защит свидетельствует о некоторых недостатках и ограничениях. Это относится к сложности подбора емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , формированию потерь  $P_1$  и  $P_2$  и др. Использование дискретного принципа моделирования позволяет устранить указанные недостатки, что позволяет повысить

точность моделирования и одновременно расширить функциональные возможности, например, моделирование в одном устройстве температуры нескольких узлов АД, учет использованного ресурса изоляции, групповая защита нескольких АД и др.

Алгоритм формирования температуры в выбранном узле АД составляется на основе уравнений теплового состояния (1). С этой целью на основе известных температур  $\theta_{1i}$  и  $\theta_{2i}$  на  $i$ -м интервале рассчитывают приращения температур  $\Delta\theta_{1i}$  и  $\Delta\theta_{2i}$  через выбранный интервал времени  $\Delta t$ . Тогда температуры  $\theta_{1i+1}$  и  $\theta_{2i+1}$  на  $i+1$  интервале соответственно будут

$$\begin{aligned}\theta_{1i+1} &= \theta_{1i} + \Delta\theta_{1i} \\ \theta_{2i+1} &= \theta_{2i} + \Delta\theta_{2i}.\end{aligned}\quad (2)$$

Формулы для расчета  $\Delta\theta_{1i}$  и  $\Delta\theta_{2i}$  могут быть получены из уравнений (1)

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{1i} &= (P_{1i} - \theta_{1i} \lambda_{11i} + \theta_{2i} \lambda_{12i}) \Delta t / C_1 \\ \Delta\theta_{2i} &= (P_{2i} - \theta_{2i} \lambda_{22i} + \theta_{1i} \lambda_{21i}) \Delta t / C_2.\end{aligned}\quad (3)$$

Коэффициенты теплопроводности  $\lambda_{11i}$ ,  $\lambda_{22i}$  и  $\lambda_{12i}$  зависят от режима охлаждения АД на  $i$ -м участке. Для двигателя с самовентиляцией возможны два режима: нагрев при вращающемся роторе ( $\lambda_{11ni}$ ,  $\lambda_{22ni}$  и  $\lambda_{12ni}$ ) и остывание при неподвижном роторе ( $\lambda_{11oxi}$ ,  $\lambda_{22oxi}$  и  $\lambda_{12oxi}$ ). В случае, если на интервале  $\Delta t$  имеют место оба режима, необходимо выделить часть интервала с работающим двигателем  $\Delta t_p$  и период пауз  $\Delta t_n$ , а при расчете приращений использовать эквивалентные теплопроводности, равные

$$\lambda_{\Sigma} = (\lambda_n \Delta t_p + \lambda_{ox} \Delta t_n) / \Delta t.\quad (4)$$

Важную роль играет процесс формирования потерь  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  на  $i$ -м интервале. В общем случае потери  $P_i$  представляют в виде суммы постоянных  $P_{пост i}$ , переменных  $P_{пер i}$  и добавочных потерь  $P_{доб i}$

$$P_i = P_{пост i} + P_{пер i} + P_{доб i}.\quad (5)$$

При неизменном напряжении сети  $U_{1н}$  постоянные потери  $P_{пост i}$  практически неизменны. В случае, когда имеет место колебания напряжения сети  $U_1$ , постоянные потери можно рассчитать по формуле

$$P_{пост i} = P_{постн i} (U_1 / U_{1н})^2\quad (6)$$

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

$$P_{пер i} = (\beta_{1i})^2 (1 + \alpha \theta_i) P_{перн i},\quad (7)$$

где:  $P_{перн i}$  - переменные потери при номинальном токе и температуре обмотки, равной температуре окружающей среды;

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

$\alpha$  - температурный коэффициент материала обмотки.

Добавочные потери в общем случае можно считать пропорциональными квадрату тока в обмотке.

Из вышеизложенного следует, что для формирования  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  обязательно необходимо контролировать токи обмоток статора АД. Желателен и контроль напряжения сети. Последнее дает возможность не только корректировать постоянные потери, но и более точно сформировать величину тока ротора, а, следовательно, и переменных потерь в роторе, которые существенно растут при пониженном напряжении сети. Особую роль играет выбор шага  $\Delta t_1$  контроля тока. Принимая во внимание, что тепловые процессы имеют длительный характер, то шаг  $\Delta t$  для

расчетов  $\Delta\theta_{1i}$  и  $\Delta\theta_{2i}$  рационально выбирать равным  $\Delta t = (30-60)c$ . [2]. Для двигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах S4-S5, что соизмеримо с длительностью цикла  $t_{ц}$ , поэтому шаг  $\Delta t_i$  рационально уменьшить до 1-2с.

При этом по возможности желательно фиксировать мгновенные значения токов, что существенно расширяет функциональные возможности устройства. Прежде всего позволяет контролировать гармонический состав и, следовательно, осуществлять диагностику возможных неисправностей. Мгновенные значения фазных токов и напряжений позволяют формировать их комплекс, а, следовательно, определять составляющие прямой и обратной последовательностей, что дает возможность судить о возможных несимметричных режимах, а также о причинах неисправностей.

Учет использованного ресурса изоляции обмоток осуществляется с помощью уравнения, полученного Вант Гоффом и Аррениусом на основе законов кинетики химических реакций в изоляции обмоток. Срок службы изоляции  $D_{\theta}$  при температуре  $\theta$  и известном сроке службы  $D_{\theta H}$  и номинально допустимой температуре  $\theta_H$  равен:

$$D_{\theta} = D_{\theta H} \cdot \exp \left( E_a (1/\theta - 1/\theta_H) / R \right), \quad (8)$$

где  $E_a$  – энергия активации

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

Для упрощенных расчетов можно использовать формулу:

$$D_{\theta} = D_{\theta H} \cdot \exp \left( - (\theta - \theta_H) / \Delta\theta \right) \quad (9)$$

Величина  $\Delta\theta = \theta \cdot \theta_H \cdot R / E_a$  принимается постоянной, считая  $\theta = \theta_H$  и рассчитывается для различных классов изоляции.

## 2. Принципы построения микропроцессорная система контроля тепловых и электромеханических характеристик.

Поставленные задачи непрерывного контроля температуры и электромеханических характеристик АД, особенно при различного рода аномалиях могут быть осуществлены на основе использования микропроцессорной техники [3]. На рис. 2 приведена структурная схема подобного устройства.

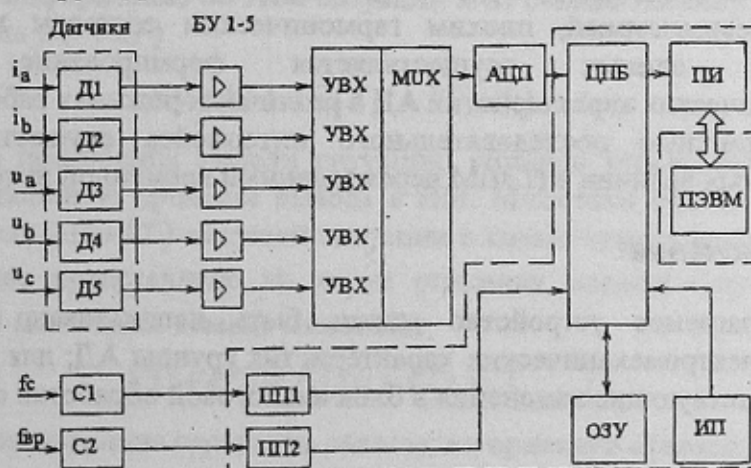


Рисунок 2. - Структурная схема системы контроля тепловых и электромеханических характеристик АД

Микропроцессорная система состоит из блоков аналоговой и цифровой обработки сигналов. В состав блока аналоговой обработки входят два датчика тока Д1 и Д2, три датчика напряжения Д3, Д4 и Д5, 5 буферных усилителей, обеспечивающих нормализацию сигналов а также устройство оцифровки сигнала, состоящее из 5-ти устройств выборки и хранения (УВХ), аналогового коммутатора МУХ и аналогового-

цифрового преобразователя (АЦП). Блок цифровой обработки состоит из центрального процессорного блока (ЦПБ), выполняющего функции управления системой и расчета необходимых характеристик; устройства оперативной памяти (ОЗУ); пользовательского интерфейса ИП (ввод команд с клавиатуры и индикация их на дисплее, и индикация информации о возможных неисправностях АД); последовательного интерфейса ПИ (осуществляющего передачу данных в ПЭВМ для их дальнейшего хранения и возможной последующей обработки) и двух параллельных портов ПП1 и ПП2, необходимых для опроса счетчиков С1 и С2, измеряющих соответственно частоту сети и частоту вращения АД.

Возможен следующий вариант исполнения системы: в качестве датчиков Д1-Д5 используются трансформаторы тока и напряжения. Буферные усилители реализуются различными способами, например, на базе микросхем К140УД17. Блок УВХ-МУХ-АЦП для уменьшения его суммарной погрешности желательно исполнить в виде единого элемента (как в микросхемах МАХ-150, МАХ-155 фирмы МАХИМ, содержащих в одном корпусе сразу 8 УВХ, МУХ и АЦП). ОЗУ можно выполнить на базе микросхем статической памяти (например, К537РУ17, имеющую объем 8Кбайт или несколько таких). Остальные компоненты блока цифровой обработки сигнала, а именно ПП1-2, ПИ, ЦПБ можно реализовать в едином интегральном исполнении на базе пик-контроллера фирмы MicroChip серии PIC17Сxxx.

Алгоритм работы схемы следующий:

1. В блоке аналоговой обработки сигнала осуществляется преобразование в численный вид мгновенных значений фазных токов и напряжений один раз за 0.2 с (в течение 10-ти периодов по 100 точек на период).

2. С помощью счетчиков С1 и С2 производится измерение частот сети и вращения АД, данные о которых поступают в ЦПБ.

3. Численные данные о фазных токах и напряжениях поступают в блок цифровой обработки сигнала, в котором формируются комплексы действующих значений фазных токов и напряжений, их гармонический состав, все виды потерь, а также интервалы  $\Delta t_p$  и  $\Delta t_n$  режимов работы двигателя на каждом шаге  $\Delta t_i$ , рассчитываются  $\Delta \theta_{1i}$ ,  $\Delta \theta_{2i}$ ,  $\theta_{1i+1}$  и  $\theta_{2i+1}$  и другие характеристики АД, связанные с возможной несимметрией, плохим гармоническим составом и пр. На основе рассчитанных данных осуществляется формирование тепловых и электромеханических характеристик АД в различных режимах работы.

4. С помощью последовательного интерфейса осуществляется передача сформированных величин в ПЭВМ через заданный временной интервал.

### Заключение

Предлагаемое устройство может быть использовано и для контроля тепловых и электромеханических характеристик группы АД; для этого необходимо внести соответствующие изменения в блок аналоговой обработки сигнала.

### Литература:

1. Сыромятников Н.А., Режимы работы асинхронных электродвигателей, М., Энергоиздат, 1987.
2. Федоров М.М. и др. Микропроцессорные системы защиты двигателя от тепловых перегрузок. Труды Дон ТГУ. Электротехника и энергетика, вып 2, Донецк 1998.
3. Фритчи В. Применение микропроцессоров в системах управления. М. "Мир", 1984.