

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА, МОДЕЛИРУЮЩАЯ НАГРУЗКУ В РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Я.И. Пешев, Ю.А. Чабанов

Самарский государственный технический университет, учебный центр «СамГТУ – Шнейдер-электрик»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

В статье описывается реализация микропроцессорной системы автоматического управления, которая призвана имитировать механическую нагрузку на валу электродвигателя. Рассматривается методика синтеза алгоритма цифрового ПИ-регулятора и его программная реализация на языке программирования С.

Ключевые слова: микроконтроллер, момент нагрузки, нагрузочное устройство, ПИ-регулятор, регулятор тока, рекуперация, тиристорный преобразователь, электропривод.

Активное развитие микропроцессорной и преобразовательной техники, а также элементной базы привело к широкому применению на практике интеллектуальных сервоприводов с векторным управлением.

С целью наиболее полного исследования указанных сервоприводов необходимо иметь нагрузочное устройство, позволяющее имитировать на валу тестируемого серводвигателя механическую нагрузку. Таким образом, нагрузочные устройства находят широкое применение в учебных лабораториях по подготовке студентов и специалистов для работы с современными сервоприводами и на предприятиях при проведении испытательных работ.

Важными требованиями, предъявляемыми к нагрузочному устройству, являются возможность задания момента нагрузки в широком диапазоне и устойчивость к внешним возмущающим воздействиям.

Наибольшее распространение получили нагрузочные устройства с применением в качестве исполнительного элемента электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) и системой стабилизации тока в его якорной цепи, реализованной на принципе регулирования Ползунова – Уатта.

Структурная схема системы автоматического управления (САУ) моментом нагрузки показана на рис. 1.

Работает схема следующим образом: сигнал ошибки, являющийся результатом сравнения сигнала задания тока $U_{зТ}$ и сигнала отрицательной обратной связи по току $U_{ост}$, подаётся на вход ПИ-регулятора тока; последний обеспечивает динамические показатели качества САУ в соответствии с техническим оптимумом и придаёт контуру тока астатические свойства в статике [1].

Формирование сигнала, пропорционального величине тока якорной цепи ДПТ НВ, обеспечивает датчик тока $K_{дт}$.

Выходной сигнал регулятора тока поступает на вход тиристорного преобразователя.

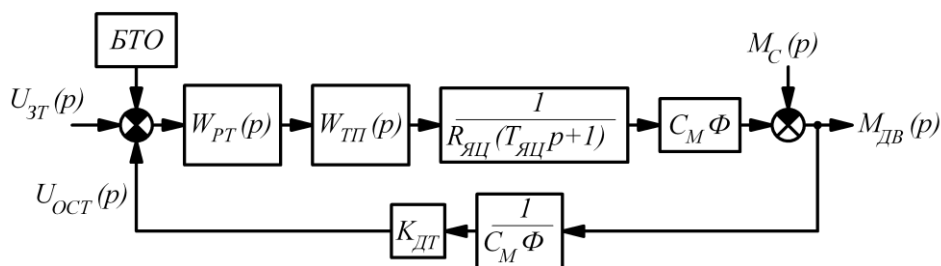


Рис. 1. Структурная схема САУ моментом нагрузки

Электромагнитные процессы в электродвигателе постоянного тока с независимым возбуждением описываются звеном с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{I_{яц}(p)}{U_{яц}(p)} = \frac{1}{R_{яц}(T_{яц}p + 1)}, \text{ где } I_{яц}(p) - \text{изображение тока в якорной цепи ма-}$$

шины постоянного тока нагрузочного устройства; $U_{яц}(p)$ – изображение напряжения, прикладываемого к якорной обмотке; $R_{яц}$ – активное сопротивление якорной цепи; $T_{яц}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи.

Связь тока в якорной цепи с моментом, развиваемым ДПТ НВ, осуществляется через безынерционный элемент с коэффициентом передачи $C_M \Phi$, причём C_M – конструктивный коэффициент, Φ – магнитный поток.

Блок БТО предназначен для установки уровня токоограничения и позволяет в динамических режимах или вследствие некорректных действий оператора исключить превышение тока выше допустимого.

Указанная система работает в режиме рекуперации и, следовательно, имеет относительно высокий КПД (порядка 60-70%), меньшие тепловые потери, обеспечивает в широком диапазоне постоянство и независимость создаваемого момента от внешних возмущающих воздействий. Однако практическая реализация вышеупомянутой структурной схемы на аналоговых операционных усилителях приводит как к значительному усложнению схемотехники, так и нетехнологичности процедуры на- стройки и обслуживания нагрузочного устройства в целом.

Применение микропроцессорной техники позволяет выйти на принципиально новый уровень создания подобных устройств, расширить их функциональные возможности, придать им гибкость за счёт возможности диалогового режима ввода параметров как со встроенного пульта управления, так и с персональной ЭВМ, повысить эксплуатационную надёжность при одновременных снижениях массогабаритных и ценовых показателей.

На рис. 2 показана функциональная схема микропроцессорного нагрузочного устройства (МНУ), реализованная согласно структурной схеме на рис. 1.

Силовая схема МНУ выполнена по трёхфазной реверсивной мостовой противополо- параллельной схеме выпрямления, состоящих из двух выпрямительных комплектов. Первый комплект образуют тиристоры анодной группы VS1-VS3 и тиристоры катодной группы VS2-VS6. Второй комплект образован тиристорами VS7-VS11 и VS10-VS14, образующие анодную и катодные группы соответственно.

В описываемом нагрузочном устройстве применяется совместное согласованное управление тиристорными комплектами, поэтому с целью снижения величины уравни- тельного тока в якорную цепь включены два уравни- тельных реактора L1, L2.

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорами; ПИ-регулятор тока; блок токоограничения; комплекс защит от неправильного чередования фаз, перегрузки, перегрева силовых электронных компонентов; интерфейсы с пользова-

телем, ЭВМ реализованы программным способом в восьмиразрядном микроконтроллере CPU ATmega2560 фирмы Atmel.

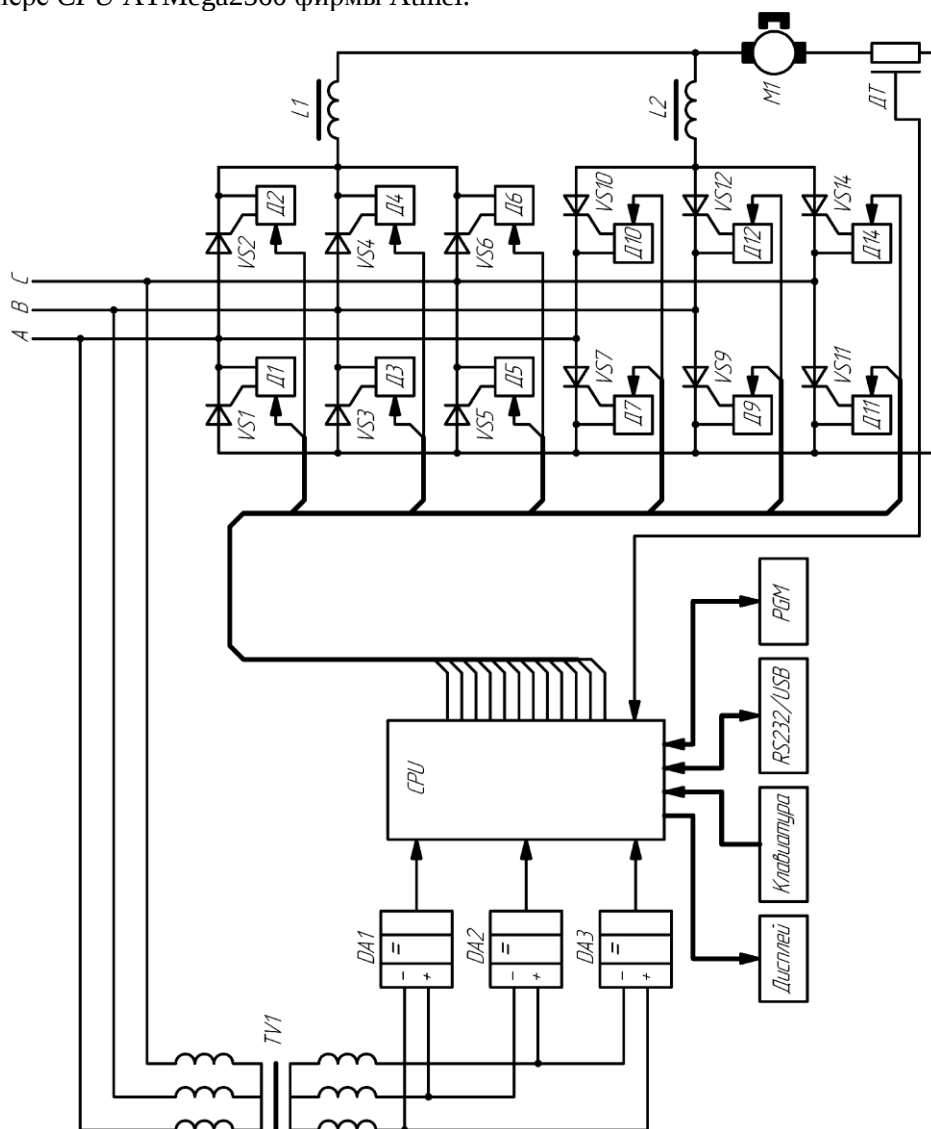


Рис. 2. Функциональная схема МНУ

Согласование управляющих электродов тиристоров VS1-VS12 с портом микроконтроллера производится посредством гибридных драйверов Д1-Д12, которые формируют управляющий импульс прямоугольной формы достаточной мощности и длительности. Избыточная мощность управляющего импульса может привести к повреждению полупроводниковой структуры тиристора, недостаточная мощность и/или длительность приводят к неполному открыванию тиристора, что способствует возникновению эффекта шнурования тока и выходу тиристора из строя. В свете сказанного следует уделить особое внимание выбору схемы драйверов тиристоров.

Трансформатор TV1 используется для электропитания электронных компонентов нагрузочного устройства, формирует необходимый уровень напряжения на вхо-

дах компараторах $DA1$ - $DA2$ блока синхронизации и обеспечивает гальваническую развязку.

Информация о переходах сетевого трёхфазного напряжения через точки естественной коммутации, необходимая для правильной работы программного СИФУ, формируется блоком синхронизации, который реализован на трёх аналоговых интегральных компараторах $DA1$ - $DA3$. Компаратор $DA1$ сравнивает напряжение фаз A и B , компаратор $DA2$ – B и C , а $DA3$ – C и A соответственно. Переход напряжений двух фаз через точку естественной коммутации вызывает переключение соответствующего компаратора, так точка естественной коммутации положительных полупериодов вызывает появление высокого уровня на выходе компаратора (передний фронт), а точка естественной коммутации в зоне отрицательных полупериодов формирует на выходе компаратора низкий уровень (задний фронт). Формируемый компараторами прямоугольный сигнал регистрируется встроенным в микроконтроллер аппаратным модулем захвата переднего/заднего фронтов импульса, последний в момент появления переднего или заднего фронтов импульса генерирует соответствующий вектор прерывания. Таким образом, в прерываниях, которые инициируются прохождением сетевым трёхфазным напряжением точек естественной коммутации, запускаются таймеры-счётчики, сопоставленные соответствующим тиристорам, осуществляющие регулирующую задержку открывания тиристоров, отсчитывающуюся от точек естественной коммутации, реализуя тем самым импульсно-фазовое управление.

Процедура открывания тиристоров реализована в прерываниях от переполнения регистра $TCNT$ соответствующего таймера-счётчика. Время от момента запуска таймера-счётчика до момента переполнения его регистра $TCNT$ и генерации прерывания зависит от значения, которое предварительно занесено в этот регистр, и частоты тактирования таймера счётчика. Частота тактирования выбрана фиксированной, таким образом, значение, предварительно загружаемое в регистр $TCNT$, пропорционально требуемому фазовому углу отпирания тиристоров.

Сопоставление таймеров-счётчиков соответствующим тиристорам, расчёт значения, записываемого в регистры $TCNT$, производится на основе алгоритма совместного-согласованного управления тиристорами. Задающим сигналом СИФУ является сигнал, возвращаемый подпрограммой ПИ-регулятора тока.

Сигнал обратной связи по току снимается с интегрального датчика тока, основу которого составляет элемент холла с интегрированной электронной схемой фильтрации и нормирования выходного сигнала. Такой датчик имеет выход по напряжению и имеет гальваническую развязку между силовыми и сигнальными цепями.

Выходной сигнал датчика тока оцифровывается АЦП микроконтроллера и сравнивается со значением уставки величины тока в якорной цепи ДПТ НВ $M1$. Полученная разность обрабатывается подпрограммой ПИ-регулятора тока.

В теории автоматического управления процедура синтеза корректирующих регуляторов дискретных САУ описывается с применением довольно сложного для инженерной деятельности аппарата Z -преобразований [2], что может являться препятствием к синтезу указанных регуляторов в цифровом виде на базе микроконтроллеров. Поэтому следует подробнее остановиться на практической программной реализации цифрового ПИ-регулятора.

Передаточная функция непрерывного ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{ПИ}(p) = K_{II} + \frac{1}{T_{II}p}, \quad (1)$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональной части; T_{II} – постоянная интегрирования.

Входной для ПИ-регулятора сигнал ошибки есть разность сигнала задания и сигнала обратной связи:

$$e(t) = x_3(t) - x_{OC}(t), \quad (2)$$

причём $x_3(t)$ – сигнал задания, $x_{OC}(t)$ – сигнал обратной связи.

Выражение для выходного сигнала ПИ-регулятора в соответствии с (1) и (2):

$$y_{BbIX}(t) = K_{II} \cdot e(t) + \frac{1}{T_{II}} \cdot \int_0^t e(t) dt. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет легко показать пропорциональную и интегральную части ПИ-регулятора и их связь с выходным сигналом.

Последовательность синтеза 24-разрядного с плавающей запятой ПИ-регулятора на языке C следующая. Введем обозначения: *set_current_value* – переменная задания величины тока, *sensor_current_value* – переменная сигнала обратной связи по току, *error0* – переменная актуального значения сигнала ошибки. Тогда выражение пропорциональной составляющей запишется в виде:

$$error0 = (\text{float})(\text{set_current_value} - \text{sensor_current_value}).$$

Переменные *set_current_value*, *sensor_current_value* изначально определены как целые знаковые 16-разрядные переменные, так как значение в эти переменные заносится из регистра АЦП, поэтому необходимо явное приведение разности *set_current_value* – *sensor_current_value* к вещественной 24-разрядной переменной *error0*.

Интегрируя составляющую $\frac{1}{T_{II}} \cdot \int_0^t e(t) dt$ методом трапеций, имеем:

$$\text{int_egral} += t_Qnt * (error0 + error1) / (2 * t_Int);$$

здесь *error1* – вещественная 24-разрядная переменная сигнала ошибки предыдущего вызова подпрограммы ПИ-регулятора, *int_egral* – вещественная 24-разрядная переменная интегральной составляющей, *t_Int* – вещественная 24-разрядная переменная постоянной времени интегрирования, *t_Qnt* – вещественная 24-разрядная переменная периода квантования (период вызова подпрограммы ПИ-регулятора).

Учитывая, что интегральная составляющая величина всегда положительная и не должна превышать зону пропорциональности, необходимо добавить следующие условия:

$$\text{if}(\text{int_egral} < 0) \text{ int_egral} = 0;$$

$$\text{if}(\text{int_egral} > z_P) \text{ int_egral} = z_P,$$

в которых *z_P* – вещественная 24-разрядная переменная зоны пропорциональности.

Полный сигнал с выхода ПИ-регулятора:

$$\text{out_pi_reg} = (error0 + \text{int_egral}) / z_P.$$

Последним действием является сохранение актуального значения сигнала ошибки:

$$error1 = error0.$$

С учётом вышесказанного функция цифрового ПИ-регулятора на языке C имеет вид:

```

float current_pi_reg void
{
    error0 = (float)(set_current_value – sensor_current_value);
    int egral += t_Qnt*(error0 + error1)/(2*t_Int);
    if( int egral < 0 ) int egral = 0;
    if( int egral > z_P ) int egral = z_P;
    out_pi_reg = (error0 + int egral)/z_P;
    error1 = error0;
    return(out_pi_reg)
}

```

Причём выходной сигнал может быть соответствующим образом нормирован, а типы переменных изменены под конкретную задачу.

Диалоговое общение между пользователем и МНУ осуществляется посредством кнопочной клавиатуры (ввод информации) и жидкокристаллического символьного дисплея (вывод информации).

Порт PGM предназначен для подключения программатора для загрузки управляющей программы в микроконтроллер.

Опционально МНУ может иметь интерфейс RS323 или USB для подключения ЭВМ для целей диагностики и задания необходимых режимов или для организации сетевого режима работы по принципу SCADA.

Образец МНУ использовался для имитации нагрузки на валу асинхронного электродвигателя, управляемого от сервопривода Altivar 71, и показал высокую надёжность и стабильность в работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: Конспект лекций. – Куйбышев: КПТИ, 1985. – 56 с.
2. *Бессекерский В.А.* Цифровые автоматические системы. – М.: Наука, 1976. – 575 с.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2010 г.

UDC 621.316

MICROPROCESSOR SYSTEM, WHICH MODELS LOADING IN THE ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE

Y.I. Peshev, Y.A. Chabanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The article presents a realization for microprocessor automatic control systems, which is intended for simulating a mechanical loading on an electric motor shaft. Synthesis algorithm of a digital PI-regulator and realization of the specified algorithm in programming language C is presented.

Keywords: current regulator, electric drive, loading device, loading moment, microcontroller, PI-regulator, recuperate, thyristor converter.

Y.I. Peshev –Engineer.

Y.A. Chabanov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.