

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, ***И.В. БОВДУЙ***, ***А.В. ВОЛОШКО***,
Е.В. ВИНИЧЕНКО

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНДА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Розроблена система управління імітаційним стендом двомасової електромеханічної системи та наведені експериментальні дослідження динамічних характеристик такої системи.

Разработана система управления имитационным стендом двухмассовой электромеханической системы и проведены экспериментальные исследования динамических характеристик такой системы.

In the article development the control system by the imitation stand of two-mass electromechanics system and resulted of dynamic characteristics experience for such system.

Введение. Создание систем управления сложными многомассовыми электромеханическими системами с упругими и нелинейными элементами, как правило, выполняется с использованием имитационного моделирования.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Достоверность результатов, полученных в ходе синтеза систем управления сложными многомассовыми электромеханическими объектами может быть проверена только при работе с реальным объектом. Одним из подходов к решению данной проблемы является использование физических моделей - стендов, повторяющих структуру объекта управления. При этом, первоначальная отладка регуляторов и сравнение их эффективности работы в условиях, максимально приближенных к реальным, выполняется на таком стенде, содержащем все необходимые элементы.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Исследовательские стенды для отладки программного обеспечения систем управления преобразователями с учетом особенностей кинематических связей между приводным двигателем и рабочим механизмом выпускаются многими электротехническими фирмами. Однако, стоимость подобных стендов многократно превышает первоначальную стоимость серийных преобразователей и двигателей. В работах [1-2] рассматриваются вопросы разработки таких стендов.

Цель работы. Разработка и изготовление исследовательского стенда двухмассовой электромеханической системы, позволяющим выполнить отладку программного обеспечения алгоритмов управления и исследование динамических характеристик стенда.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Стенд двухмассовой электромеханической системы, схема которого

показана на рис. 1, содержит две одинаковые электрические машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа ДПТ-25-Н2, роторы которых связаны между собой упругим звеном. Предполагается, что одна машина будет работать в двигательном режиме, а другая в генераторном, с помощью которой будет имитироваться активный момент нагрузки. При необходимости, первая машина может также работать в режиме торможения. На роторах каждой машины установлены оптические дискретные датчики углового положения, с помощью которых измеряются также и угловые скорости роторов.

На валах каждой машины установлены тормозные устройства так, что моменты сухого трения каждой машины равны естественному моменту сухого трения машины и регулируемому с помощью тормозных устройств дополнительному моменту внешнего трения. Необходимость механических тормозов на роторах обеих машин обусловлена тем, что предполагается отладка алгоритмов управления при движении на малых скоростях, когда возникают фрикционные колебания, параметры которых определяются упругой связью между роторами машин и сухим трением на валах машин. Такой режим прилипания и срыва характерен при движении подвижных частей исполнительного двигателя и рабочего органа многих машин и механизмов с трением на малых скоростях. Причем, в ряде случаев такой режим работы является нормальным, а для многих механизмов такой режим работы является аварийным.

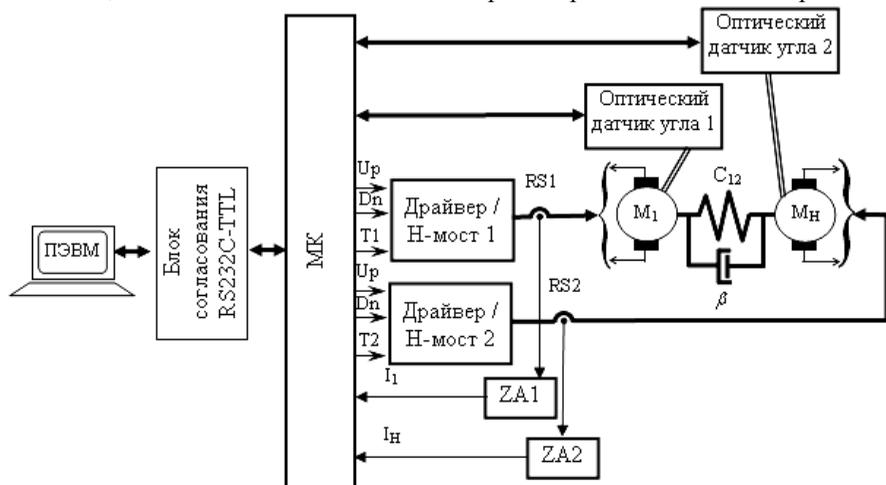


Рис. 1. Схема системы управления станком

Для управления режимом работы основного и нагрузочного двигателей M_1 и M_H , работающих в 4-х квадрантах, необходимо сформировать сигналы питающего напряжения ДПТ, измерить величины токов и углов поворота вала двигателей. Величина напряжения питания двигателей задается 8-

разрядными таймерами МК, работающих в режиме ШИМ. На рис. 2 показана плата силовых преобразователей и датчиков

Направление вращения двигателя задается дискретным сигналом, на основе анализа направления тока в конкретном двигателе. Формирование питающего напряжения двигателей по уровню и току выполняется 4-х канальным драйвером *L293D* фирмы *SGS-Thomson*, 2 канала которого образуют *H*-мост для одного двигателя.

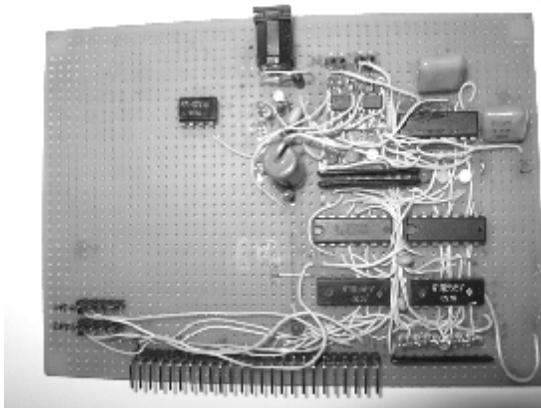


Рис. 2. Плата силовых преобразователей и датчиков

На рис. 3 показана плата микроконтроллерного модуля программирования и связи с ПК.

Драйвер двигателей, работая в ключевом режиме обладает значительным динамическим диапазоном коммутации (до 5 кГц), высокой перегрузочной способностью по току (до 2-х кратного превышения тока замыкания двигателя), температурной защитой и возможностью блокировки выходного напряжения каждого моста. Для управления драйвером двигателей необходим модуль контроля запрета одновременного включения плечей *H*-моста, либо организовать дополнительный программный контроль состояния сигналов управления мостом.

Датчики измерения сигнала по току выполняются без гальванической развязки в виде шунта, последовательно включаемого в якорную цепь двигателя и фильтра-усилителя *ZA*. Выделение частотной полосы и усиление полезного сигнала с датчика тока *RS* осуществляется фильтром 4-го порядка Баттерворта, выполненного на прецизионных операционных усилителях *INA117P*. Цифровая обработка сигналов обратных связей по току производится после их преобразования блоками 8-ми разрядных АЦП МК. В режиме измерения малых токов АЦП позволяет увеличить точность преобразования посредством программно изменяемого коэффициента усиления входного сигнала внутренними предусилителями, от 1-го до 200-х кратного.

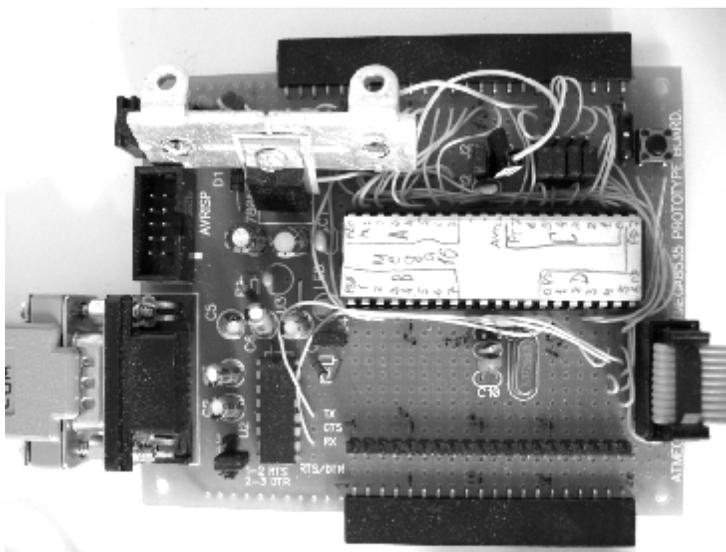


Рис. 3. Плата микроконтроллерного модуля программирования и связи с ПК

Для измерения угла поворота вала двигателей в виду малых конструкционных размеров и требования отсутствия дополнительных масс вносимых датчиками, использован оптический датчик *PAN3101*, фирмы *PixArt Imaging Inc.*, применяемый для измерения линейных перемещений в оптических манипуляторах. Датчик обладает высокой разрешающей способностью, до 800 cpi , и быстродействием, что позволяет измерять линейную скорость до $0,53\text{ м/с}$. Разрешающая способность по углу поворота датчика зависит от его месторасположения относительно центра вала двигателя и при необходимости может быть увеличена. Данные измерений считываются по последовательному интерфейсу в МК, где используются как технологические в процессе управления и информационные для передачи в ПЭВМ.

Использование масштабируемых физических моделей предусматривает адекватность учета параметров реального объекта регулирования. Выполнить данное требование возможно при использовании быстродействующих цифровых узлов управления, подключенных к силовым преобразователям с достаточной полосой пропускания. Кроме требований функциональности к подобным системам, как правило, выдвигаются задачи сбора и обработки информации. Таким образом, создание и моделирование систем управления для ЭМС с микроконтроллерными устройствами должно выполняться с некоторой избыточностью по составу компонентов, с целью обеспечения универсальности и гибкости системы при изменении алгоритма управления.

Типовое решение создания исследовательских стендов предназначенных для синтеза систем управления ЭМС с микроконтроллерными устройствами

предлагается в достаточно большом сегменте рынка, например в пакете *MATLAB*, в котором на текущий момент выполнена поддержка МК фирм *Intel*, *Texas Instruments*, *Atmel* (серия *AVR*). К общим недостаткам подобных сред для разработки можно отнести требования связанные с обязательным наличием специализированных интерфейсных плат ввода-вывода сигналов, для соединения конечного устройства с ПЭВМ. Пример системы с применением типовой реализации с использованием интерфейсной платы *PCI-1711* фирмы *Advantech* рассмотрен в [2].

При создании управляющей части стенда необходимо, в первую очередь, учитывать ограничения, связанные с вычислительными возможностями и скоростью обмена информационного потока между ведущим компьютером и встраиваемым контроллером. В зависимости от типа регулятора и объема передаваемых данных в случае недостаточной вычислительной мощности встраиваемых контроллеров, должно быть обеспечено перераспределение функций по вычислительным затратам между ведущим ПЭВМ и встраиваемым микроконтроллером.

При разработке системы управления макетом необходимо учитывать следующие требования: возможность изменения структуры, параметров и алгоритма управления регуляторов; измерение и протоколирование всех выходных координат; конструкция датчиков и формирователей сигналов измеряемых координат должна учитывать необходимую точность преобразования выходных координат и разрядность по разрешению преобразователей аналоговых сигналов; изменение параметров силовых преобразователей как по величине, так и роду выходных координат (напряжение, ток); возможность автономной работы; протоколы передачи данных должны быть стандартными; распространенность и время освоения программных средств для разработки; возможность дальнейшей модернизации за счет усложнения структуры и количества модулей и агрегативности блоков.

Исходя из вышеизложенных требований, выбраны следующие узлы и устройства стенда. В качестве ядра системы управления рассматриваемого стенда используется управляющая ЭВМ, выполненная на микроконтроллере (МК) фирмы *ATMEL* серии *Mega* с развитой периферией и протоколами обмена данными, допускающим работу в составе сети МК. В качестве системы управления режимом работы и сбора диагностических данных о выходных координатах объекта управления используется персональная ЭВМ. Для обмена между МК и ПЭВМ выбран протокол связи *RS-232C*, исходя из максимально необходимого потока данных и минимума количества линий передачи данных. Измерение токов и напряжений выполняется с использованием встроенных в МК аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [4-5]. Предварительное согласование уровней, масштабирование и фильтрация сигналов выходных координат (токов и напряжений) выполняется в блоках усилитель-формирователей (БУФ), выполненных на операционных усилителях. Измерение механических величин выходных координат (угол поворота вала)

выполняется стандартными оптическими датчиками с высокой разрешающей способностью и последовательным обменом данными. Для обеспечения работы двигателя в 4-х квадрантах и плавного регулирования напряжения питания с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) сигнала управления силовых преобразователей используется соответствующее программное обеспечение.

Программирование МК осуществляется на языке *C*, компилятор *Code Vision AVR*. Интерфейс и программа управления и сбора диагностических данных для ПЭВМ выполнена в среде визуального программирования *Lab View*.

На рис. 4 показан программатор и плата микроконтроллерного модуля программирования и связи с ПК



Рис. 4. Программатор и плата микроконтроллерного модуля программирования и связи с ПК

Выбор МК *AVR Mega 16* фирмы *ATMEL* в качестве управляющей ЭВМ обусловлен высоким быстродействием данного МК, порядка 16 MIPS при работе с максимальной частотой процессора МК, что обеспечивается набором *RISC* команд, оптимизированных для использования компилятора языка *C* и наличием нескольких уровней аппаратных прерываний. Состав встроенных в МК блоков следующий: 8 каналов АЦП; компаратор; 3 таймера с возможностью формировать ШИМ сигналы; универсальный приемо-передатчик; интерфейсы *SPI*, *JTAG*, *TWI*.

Такой состав блоков МК позволяет решать большинство задач по обработке и формированию сигналов, организации процесса обмена между МК и ПЭВМ, создания сети МК. Наряду с возможностью электрического перепрограммирования области программ и констант внешним программатором, подключенным к ПЭВМ, у данного МК предусмотрена внутрисхемная модификация содержимого области программ посредством перезаписи програм-

мой, размещенной в *BOOT*-модуле, что необходимо при создании регуляторов с изменяемой структурой, например нейросетевого типа.

Данный МК позволяет решать задачи по созданию систем управления с изменяемой структурой и параметрами регулятора, вплоть до увеличения количества МК входящих в систему управления. Таким образом, ограничение на количества измеряемых и управляемых координат ОУ не являются критичными при проектировании систем управления с данными МК.

На рис. 5 показана схема рабочего места оператора



Рис. 5. Схема рабочего места оператора

Система управления стендом состоит из измерительно-управляющего комплекса и ПК связанных между собой через *COM*-порт (*RS-232C*). Измерительно-управляющего комплекс реализован на микроконтроллере. Управляющий сигнал вырабатывается в ПК и передается в МК посредством кода, где дешифруется и подается на ШИМ. Также МК считывает данные с датчиков, кодирует их и пересылает в ПК, где посылка дешифруется и на основе полученных данных вырабатывается управляющий сигнал. Рассмотрим алгоритм работы микроконтроллера. Алгоритм работы основного цикла программа представляет ряд последовательных операций: проверка наличия полученной посылки, в случае наличия таковой производится ее разборка и дешифровка; управление двигателями; чтение данных с датчиков положения; чтение данных о времени цикла; отправка посылки с данными о номере цикла, времени работы цикла и отсчеты с двух датчиков положения; накопление номера цикла. Проверка наличия посылки производится проверкой наличия информации в приемном буфере *USARTa*. Данная информация образуется в результате работы прерывания *USARTa*. В случае наличия посылки начинается чтение и дешифровка информации. Посылка имеет фиксированную длину в 11 байт. Управление двигателями производится через ШИМ. На ШИМ подается сигнал управления вращением в прямом или реверсном направлении и

разрешающий сигнал с частотой 900 Гц и длительностью импульса $0 \div 1$ мс в зависимости от задания напряжения ($000 \div 255$). Измерение времени работы цикла производится посредством встроенного таймера микроконтроллера, который каждые 10 мкс инкриминирует переменной «time10mks» единицу, после прохождения одного цикла она обнуляется, а насчитанное значение перед обнулением добавляется в отправляемую посылку.

Рассмотрим алгоритм и программу управления стендом на персональном компьютере. Программа обработки данных и выработки управляющего значения написана в виде виртуального прибора в среде *LabVIEW*. Внешний вид лицевой панели представлен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид интерфейса программы

Программа состоит из ряда подпрограмм, таких как: приемо-передачи и кодировки сигнала, расчета скорости, положения, разности скоростей и углов, и подсчета времени, регулятора, а также модулей построения временных диаграмм, сохранения данных в файл и настройки *COM*-порта. Диаграмма основной программы представлена на рис. 7 и состоит из элементов настройки и основного цикла. К элементам настройки относятся: настройка открытие и закрытие *COM*-порта, а также настройка открытие и закрытие файла для записи данных в файл. Организация работы с *COM*-портом построена на так называемой архитектуре *VISA*. Основной цикл состоит из регулятора, подпрограммы обмена с микроконтроллером, подпрограммы обработки принятых данных, блока записи данных в файл на жестком диске, а также блоков построения графиков, задания управляющих воздействий и вывода управ-

ляющего напряжения и периодов работы цикла. Кроме того, имеются элемента переноса переменных на следующий цикл.

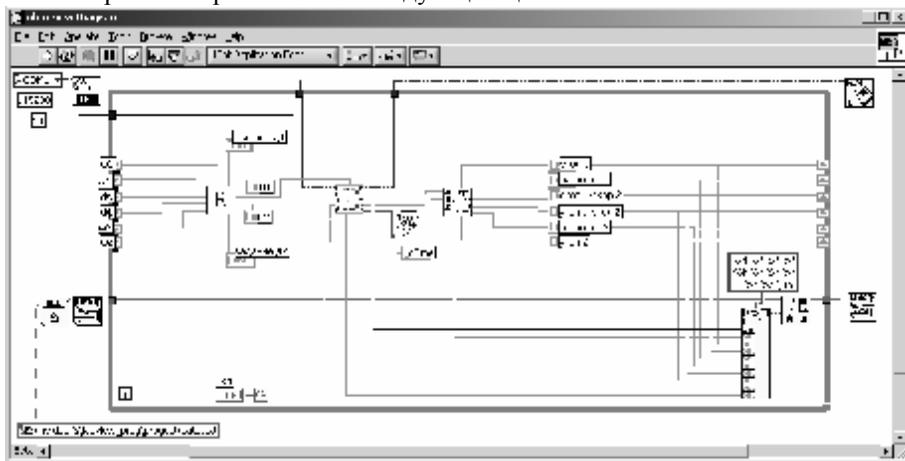


Рис. 7. Схема основной программы

Входными переменными являются: сигналы задания напряжений на каждый из каналов, параметры ресурса передачи и количество символов подлежащих прочтению из посылки. Выходные переменные - параметры ресурса передачи, принятая строка, а также обработанные значения из принятой посылки. Работает эта подпрограмма следующим образом: сигнал управления кодируется; собирается в передаваемую строку в соответствии с шаблоном и передается; проверяется наличие посылки в буфере чтения; выравнивается по контрольному символу (для повышения надежности процесса чтения); считывается заданное количество символов (байт); разбирается посылка в соответствии с шаблоном; дешифруется.

Текущее время определяется путем суммирования интервалов работы МК. Положение валов каждого двигателя определяется суммированием текущих обработанных отсчетов разности приращений углов по положению вала двигателя, скорость каждого из двигателей определяется отношением приращения угла поворота вала двигателя к интервалу времени.

В качестве примера рассмотрим переходные процессы угла поворота второго двигателя при остановке первого двигателя. Эксперимент проходил в следующих условиях: на первый двигатель подается максимальное напряжение и двигатель разгоняется до максимальной скорости. Двигатели связаны пружиной. После разгона первого двигателя, его вал резко затормаживается, и записываются колебания угла поворота второго двигателя, показанные на рис. 8. Как следует из рисунка, в системе возникают собственные механические колебания частотой 1,97 Гц. На рис. 9 показаны переходные процессы для случая, когда двигатели поменяли местами. Как следует из рис. 10, в сис-

теме возникают собственные механические колебания частотой 2,03Гц. Таким образом, в переходных процессах стэнда двухмассовой электромеханической системы возникают собственные механические колебания частотой около 2 Гц, обусловленные наличием упругой связи между валами приводного двигателя и двигателя, имитирующего рабочий механизм.

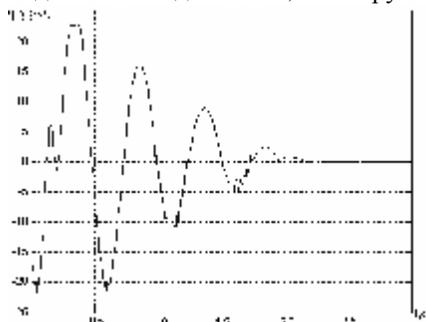


Рис. 8. Переходный процесс угла поворота второго двигателя при остановке первого двигателя

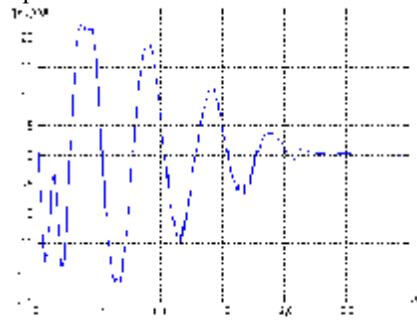


Рис. 9. Переходный процесс угла поворота первого двигателя при остановке второго двигателя

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана схема, техническое и программное обеспечение системы управления и приведены динамические характеристики стэнда двухмассовой электромеханической системы. Полученные динамические характеристики будут использованы для определения параметров математической модели стэнда, необходимой для синтеза алгоритмов управления.

Список литературы: 1. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федорик Р.В. Практическая реализация цифровых САУ в среде пакета Матлаб с использованием платформы реального времени «QNX TARGET» // Вісник Національного політехнічного університету «ХПІ». Сер. Електротехніка, електроніка і електропривод. - 2002. - № 2, Т.1. - С.98-101. 2. Зеленев А.Б., Полилов Е.В., Щелочков А.Г. Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом// Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сер. Електротехніка, електроніка і електропривод. Харьков: НТУ «ХПІ». - 2002. - № 12. - Т.2. - С.472-475. 3. Войтенко В.П., Хоменко М.А. Встраиваемая система позиционирования с нейрорегулятором // Технічна електродинаміка, тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». - Київ - 2008, ч.1. - С. 71 - 74. 4. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами: Пер. с англ. - М.: ДМК Пресс, 2003. - 320 с. 5. Кузьминов А.Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. - М.: Радио и связь, 2004. - 168 с. 6. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров.: Пер. с нем. - К.: «МК Пресс», 2006. - 208 с. 7. Гук М.Ю. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. 3-е изд. - СПб.: Питер, 2006. - 1072 с. 8. CodeVisionAVR v.1.23.8d User Manual. Rev. 17.5.2003: Pavel Naiduc and HP Info Tech S.R.L., 2003. - 200 с. 9. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. - М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2007. 592 с.

Поступила в редакцию 15.01.09.