

## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Шишкин А. В.**

Рассмотрены вопросы модельно-ориентированного проектирования систем управления на примере системы управления электроприводом перемещения физической модели суппорта токарного станка. Рассмотрены этапы проектирования стенда для исследования динамики электропривода при модельно-ориентированном подходе проектирования. Выполнены исследования и эксперименты, заключающиеся в определении реальных параметров электродвигателя и параметров объекта управления, синтезе цифрового регулятора и исследовании возможности генерации программного кода реализации регулятора, проектирование S-образного задатчика интенсивности, исследовании стабильности работы комбинированной системы управления.

Розглянуті питання модельно-орієнтованого проектування систем управління на прикладі системи управління електроприводом переміщення фізичної моделі супорта токарного верстата. Розглянуті етапи проектування стенду для дослідження динаміки електроприводу при модельно-орієнтованому підході проектування. Виконані дослідження і експерименти, що полягають у визначенні реальних параметрів електродвигуна і параметрів об'єкту управління, синтезі цифрового регулятора і дослідженні можливості генерації програмної коду реалізації регулятора, проектування S-образного задатчика інтенсивності, дослідженні стабільності роботи комбінованої системи управління.

The problems of the model-based engineering of control system on an example of physical model of the electromechanic lathe carriage control system are considered in the article. The stages of the stand engineering for research of electromechanic dynamics at the model-based approach are considered. Researches and experiments are performed. They consist in determination of the electric motor real parameters and control object parameters, digital compensator design and research of possibility of programming code realization of regulator generation, development of s-shaped intensity setter, research of stability of combined control system work.

Шишкин А. В.

ассистент кафедры АПП ДГМА

d.art.shishkin@mail.ru

УДК 62-83(075.8)

**Шишкин А. В.**

## **СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Автоматизированные электроприводы являются главным средством приведения в движение большинства рабочих машин и технологических агрегатов в машиностроении, металлургии, станкостроении, транспорте и других отраслях промышленности. Основная тенденция развития электропривода заключается в существенном усложнении функций, выполняемых электроприводом, и законов движения рабочих машин при одновременном повышении требований к точности выполняемых операций. Это неминуемо приводит к функциональному и техническому усложнению управляющей части электропривода и закономерно вызывает использование в ней средств цифровой вычислительной техники, которая стимулирует развитие микропроцессорных регуляторов и средств их автоматизированного проектирования. В мире наблюдается все более широкое применение концепций управляемой моделью разработки ПО (MDD, model-driven development) с использованием нотации UML (унифицированный язык моделирования) и методов объектно-ориентированного программирования. Существующая диспропорция между скоростью роста производительности микроконтроллеров и микропроцессоров (70 % в год), роста производительности средств разработки аппаратного обеспечения (35 % в год) и роста производительности создания ПО (10 % в год) заставляет сообщество программистов искать новые технологии создания ПО. В частности хорошие перспективы у MDD, где визуальная модельно-ориентированная разработка является важнейшей составляющей.

Среди средств разработки ПО с применением подхода MDD выделяются ряд пакетов: Rhapsody, IAR visualSTATE, CodeSys, MATLAB Simulink, Telelogic TAU. Пакет Rhapsody [1] является визуальной средой разработки приложений реального времени для встраиваемых систем. Он решает такие задачи, как сведение этапов анализа, проектирования, кодирования и тестирования ПО в один технологический процесс на основе модели проектируемой системы. Для описания модели используется графическая нотация UML. В то же время пакет не предназначен для разработки алгоритмов обработки данных и для разработки систем, реагирующих на внешние стимулы, управляемые событиями. В целом для большинства пользователей встроенных систем парадигма программирования в Rhapsody, придуманная профессиональными программистами, является слишком сложной для понимания, а для малых встраиваемых систем проблемы решаемые пакетом не являются актуальными. IAR visualSTATE – концептуально напоминает Rhapsody но значительно упрощенный. Из всего стандарта UML оставлены только диаграммы состояний. Данный продукт ориентирован на более низкий уровень встраиваемых систем, чем Rhapsody, на 8-16-32-х разрядные микроконтроллеры без использования операционных систем или под управлением RTOS OSEK. Как и в Rhapsody для голых платформ (при отсутствии RTOS) нельзя обойтись без дополнительного ручного кодирования. Пользователю нужно самому писать драйверы аппаратных ресурсов, что для visualSTATE является совсем не простым делом. Пакет visualSTATE [2] можно применить для весьма ограниченного круга задач, и он не является законченной системой предусматривающей отладку и развертывание на целевой платформе.

Разработчик пакета CodeSys [3] – фирма S3 – применяет систему лицензирования, согласно которой за каждый выпущенный контроллер с RTS производитель ПЛК (на который ориентирована среда разработки) должен выплачивать фирме определенные отчисления, но при этом саму среду CoDeSys получает бесплатно. Для разработки ПЛК производитель также, естественно, должен приобрести и саму RTS.

MATLAB Simulink [4] – довольно известный продукт в среде профессиональных разработчиков алгоритмов. Одно из самых мощных средств имитационного моделирования от простых до сложных систем преимущественно связанных с цифровой обработкой данных. Модельно-ориентированный подход проектирования систем управления [4] электроприводом реализован в MATLAB последовательностью этапов:

- разработка математической модели системы электропривода;
- реализация структуры модели привода в среде MATLAB Simulink;
- настройка параметров регулятора путем моделирования в MATLAB Simulink;
- генерация программного кода – MATLAB Realtime Workshop Embedded Coder;
- интеграция реализованного программного кода в проект ПО микроконтроллера;
- отладка работы микроконтроллерной системы управления.

Целью работы является проектирование стенда электропривода для исследования качества методики модельно-ориентированного проектирования систем управления. В качестве объекта выбран привод перемещения суппорта физической модели токарного станка. Основной силовой частью привода является транзисторный мостовой широтно-импульсный преобразователь ШИП (рис. 1). Скорость вращения двигателя, подключенного по мостовой схеме, задается средним значением напряжения моста (MOSFET мост), определяемым скважностью сигнала ШИМ. Сигнал ШИМ формируется микроконтроллером (МК) и через MOSFET-драйверы передается к затворам силовых ключей.

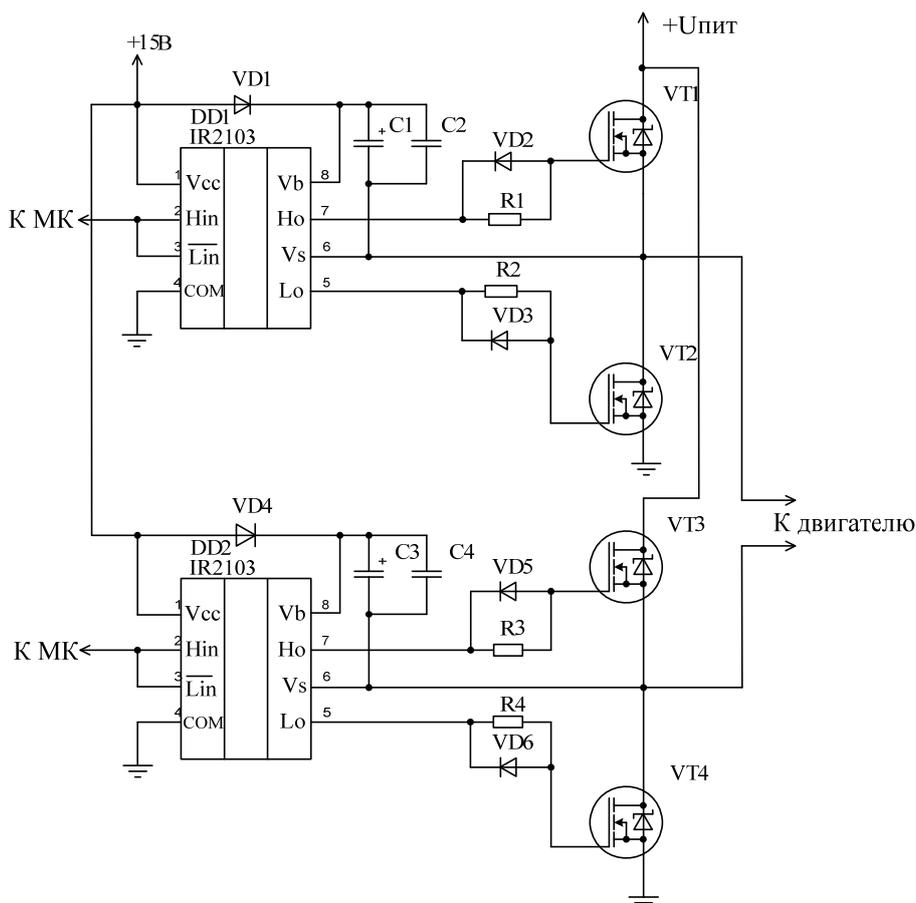


Рис. 1. Схема включения драйверов и MOSFET транзисторов типа «мост»

В качестве силовых ключей использованы MOSFET транзисторы IRFZ44N со следующими характеристиками  $I_m = 49A$ ,  $U_m = 50 V$  (максимально допустимые ток стока и напряжение сток-исток соответственно). Для надежного открытия транзисторов и защиты от сквозных токов использованы драйверы IR2103 [5].

В качестве центрального ядра цифровой системы управления использован микроконтроллер LPC2138, имеющий в своем составе широтно-импульсный модулятор, аналого-цифровой преобразователь и ряд последовательных интерфейсов для связи с ЭВМ и возможной дополнительной периферии [6].

Для определения угла поворота двигателя использован 10-битный абсолютный магнитный энкодер AS5040 [7], подключаемый к микроконтроллеру посредством интерфейса SPI. Для контроля тока установлен датчик тока ACS712-5A с диапазоном измеряемого тока  $\pm 5$  А [8].

Предварительно спроектированные в среде Proteus печатные платы широтно-импульсного преобразователя, силового питания и ряда плат периферийного назначения были изготовлены, смонтированы на объекте (рис. 2), отлажена работа всей системы.

После расчета параметров электродвигателя и определения параметров стенда на основании модели электропривода произведен синтез регулятора. Для анализа характеристик электропривода (структура математической модели в MATLAB Simulink представлена на рис. 3) проведен анализ линеаризованной системы в частотной и во временной областях с использованием Control System Toolbox, входящего в комплект поставки MATLAB.

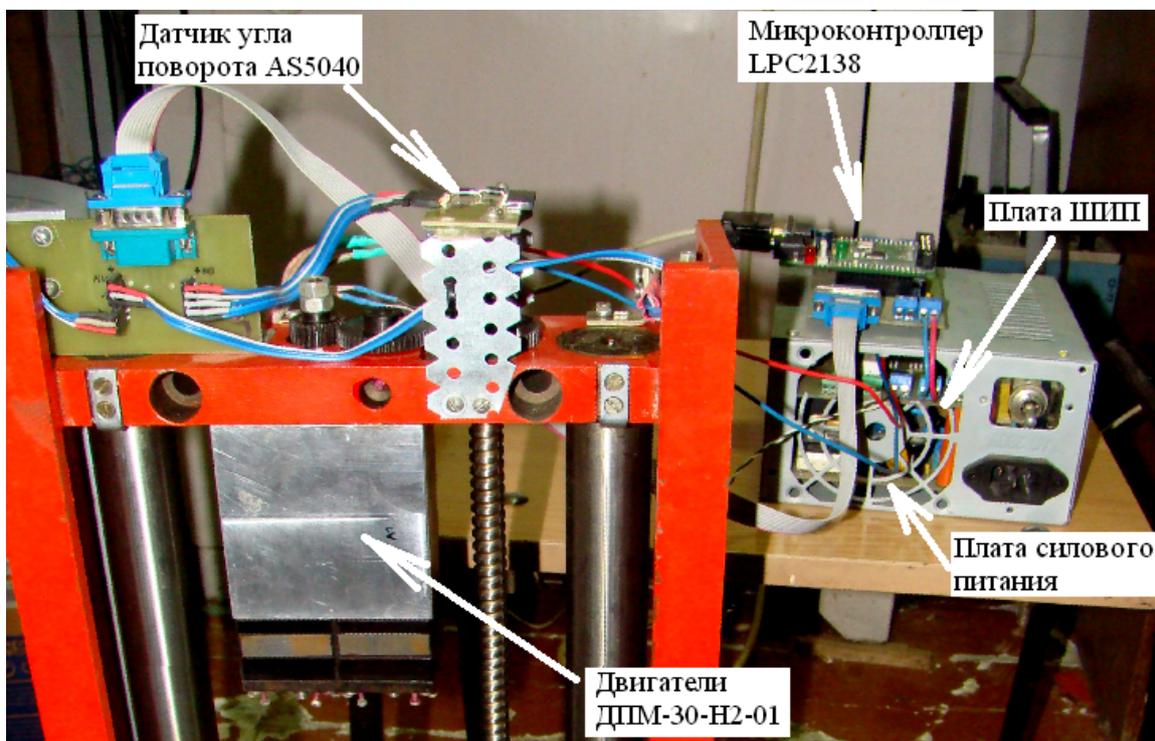


Рис. 2. Внешний вид узлов стенда

Общая передаточная функция объекта управления:

$$W_{общ}(p) = W_{ШИМ} \cdot W_{m\_fric} \cdot W_{sens} \cdot W_{red} \cdot \frac{1}{p} = \frac{0,000415}{p \cdot (3,24 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 0,0004567 \cdot p^1 + 0,003057)}$$

Для реализации цифрового электропривода требуется преобразование общей передаточной функции к дискретному виду при помощи команды (Plant\_d = c2d(Plant, Ts).):

$$W_{общ}(z) = \frac{3,879e - 0,05z^2 + 4,908 \cdot 10^{-5} z + 4,36 \cdot 10^{-7}}{z^3 - 1,935z^2 + 0,9349z - 7,576 \cdot 10^{-7}}$$

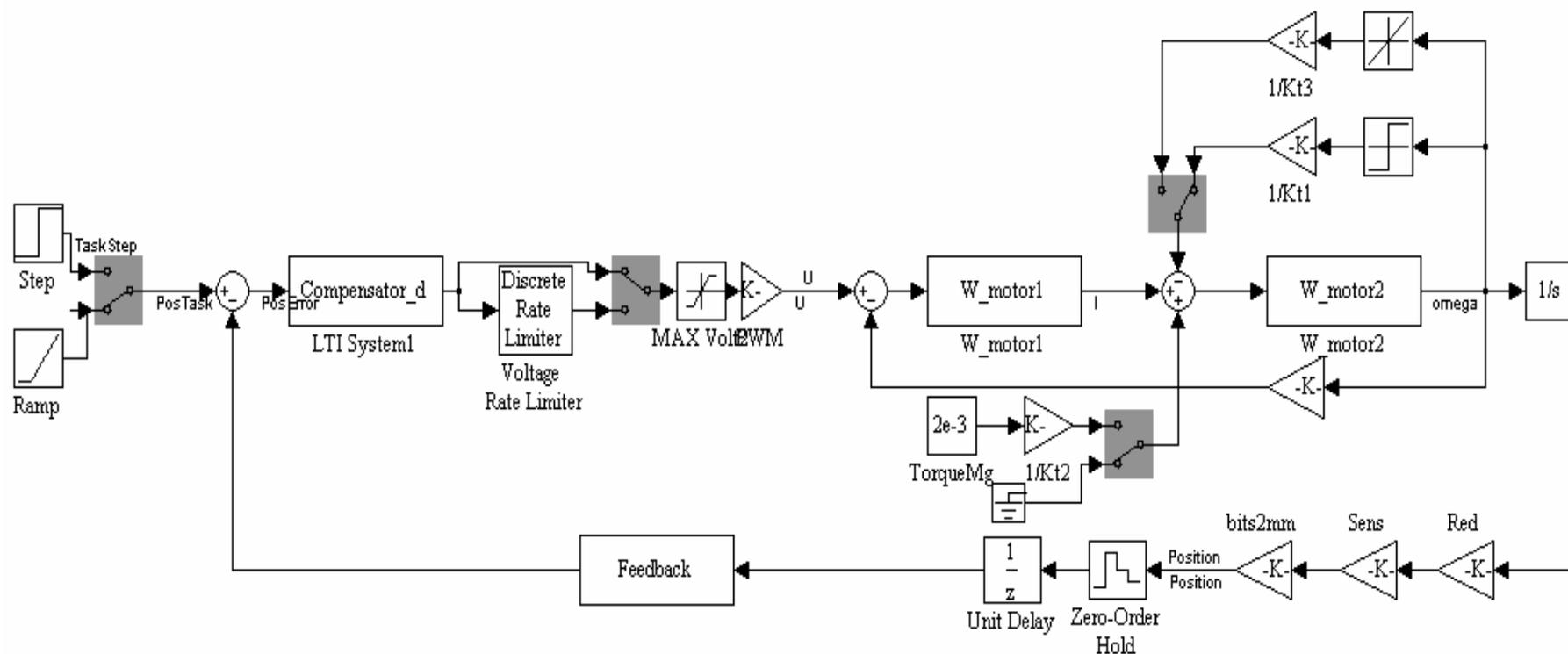


Рис. 3. Структура математической модели электропривода подачи токарного станка:

PosTask – сигнал заданий положения; Compensator\_d – ПФ регулятора в дискретной форме; Voltage Rate Limiter – ограничитель скорости нарастания напряжения; Volt2PWM – ПФ ШИП; W\_motor1 – ПФ электрической части двигателя; W\_motor2 – ПФ механической части двигателя; Red – ПФ редуктора; Sens – ПФ датчика положения

В качестве регулятора на начальном этапе проведения исследований выбран ПИ-регулятор с начальной передаточной функцией:

$$W_{рег}(p) = 1 + \frac{1}{p}.$$

Коррекция параметров регулятора осуществлена при помощи функции:

$$\text{sisotool('bode',Plant_d,Compensator_d,Feedback,Prefilter)}.$$

Анализ частотных характеристик (рис. 4, а) позволил смещением нуля регулятора вправо и увеличением коэффициента усиления регулятора достичь удовлетворительных показатели качества системы (рис. 4, б): время регулирования (определяемое по моменту входа в 2 %-ую зону при перемещении суппорта станда на 240 мм) составляет 4,0 с, перерегулирование – 20 %.

Подстроенный регулятор в дискретной форме имеет вид:

$$W_{рег}(z) = \frac{31,5936(z - 0,9959)}{z - 1}.$$

Подстроенный регулятор в аналоговом виде (Compensator\_a = d2c(Compensator\_d)):

$$W_{рег}(p) = \frac{31,5936(p + 0,4135)}{p}.$$

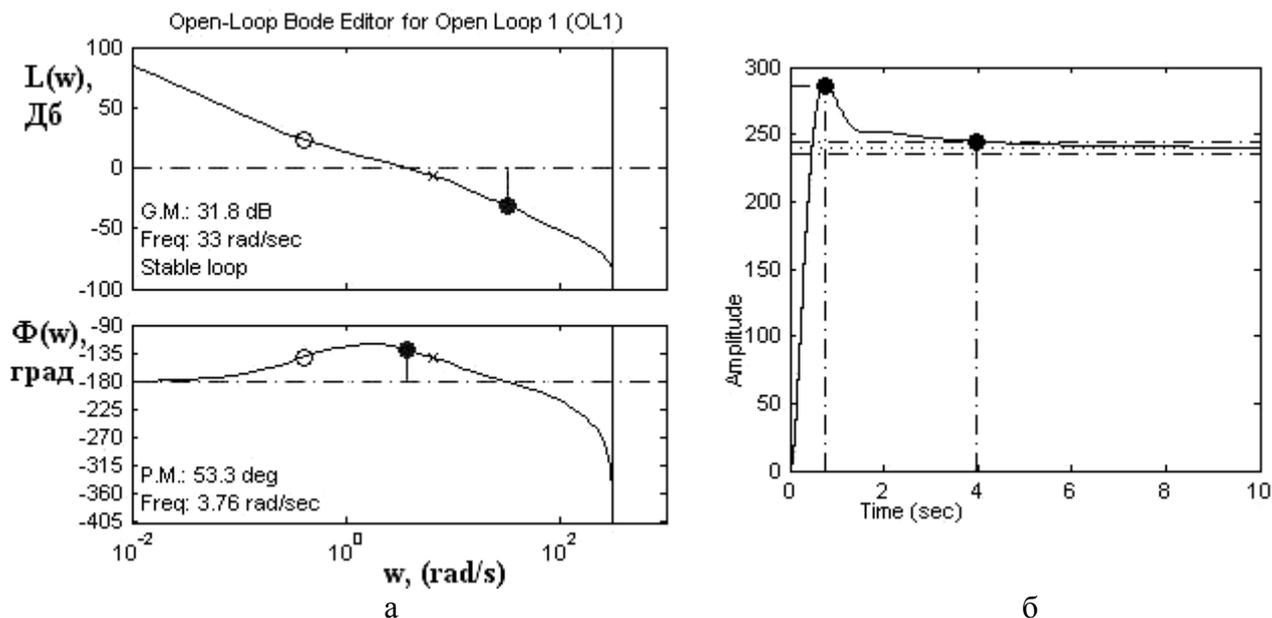


Рис. 4. Частотные характеристики разомкнутой системы (а) и переходная функция замкнутой системы (б) при изменении настроек регулятора

Для проверки соответствия показателей качества линеаризованной системы модели системы с учетом нелинейных элементов: сил сухого трения, ограничения по питающему напряжению ШИП, – было проведено моделирование в Simulink модели (рис. 3). При отсутствии сил сухого трения результаты моделирования динамики системы идентичны, полученным в Control System Toolbox. Однако при включении в моделирование системы сил сухого трения затягиваются фронт и спад сигнала, что вызвано природой трения. Даже с наличием трения переходной процесс носит удовлетворительный характер (несмотря на увеличение времени регулирования, перерегулирование уменьшается).

Для ограничения механических усилий, вызванных динамикой системы, вводятся ограничения на максимальные скорости и ускорения (S-образная кривая). Моделирование системы (рис. 3) показало, что введение S-образного задатчика интенсивности приводит к уменьшению пусковых токов, скачков напряжения широтно-импульсного преобразователя, а также ошибки позиционирования (рис. 5).

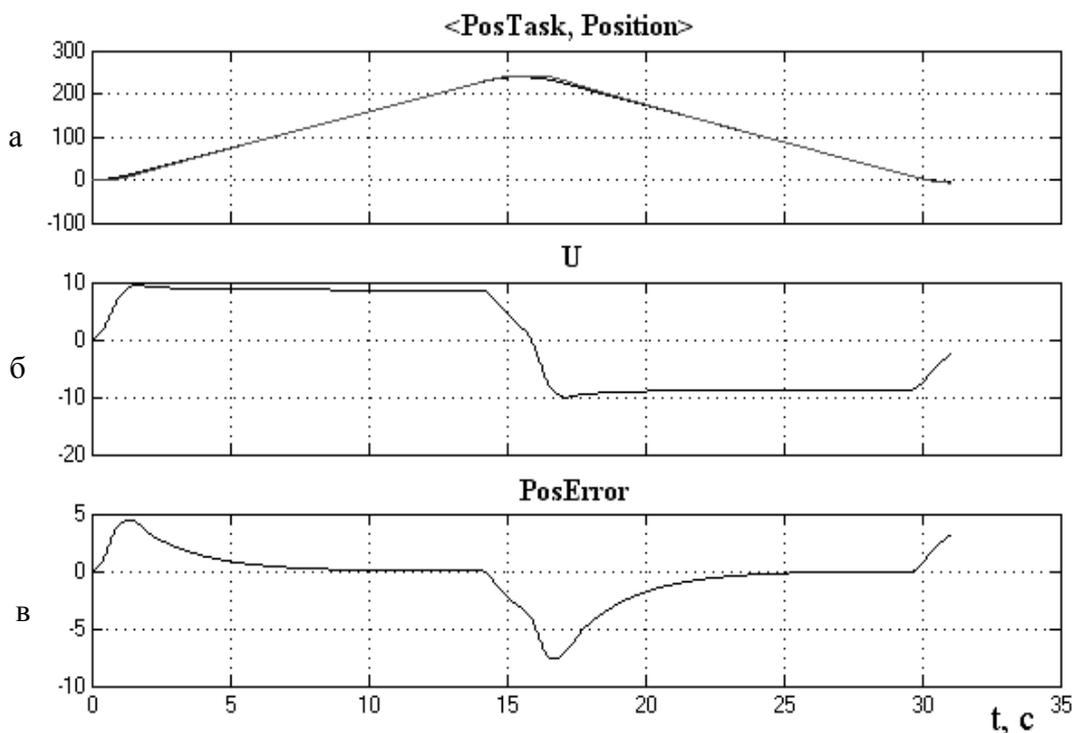


Рис. 5. Графики перемещения (а), напряжения (б) и ошибки позиционирования (в) при S-образной форме задающего воздействия

Следующим этапом проектирования системы управления электропривода является тестирование работы с реальным стендом, когда система управления реализована в MATLAB Simulink, а объект управления представлен не моделью, а физическим оборудованием. С этой целью написана программа функционирования микроконтроллера LPC2138, в задачи которой входит:

- прием данных с ЭВМ по последовательному каналу RS232 (подключение осуществляется к порту компьютера COM1);
- обработка принятых данных в соответствии с протоколом передачи;
- установление скважности ШИМ в соответствии с принятым сигналом задания;
- опрос датчика положения AS5040 по последовательному интерфейсу SPI;
- аналогово-цифровое преобразование сигнала с датчика тока ACS712-5A;
- отправка сообщения со значениями положения и тока по RS232 на ЭВМ.

В среде Simulink спроектирована модель системы управления (рис. 6 и 7). Для организации системы реального времени с периодом дискретизации 10мс под операционной системой Windows XP использован инструментальный RTBlockset [9] (рис. 7). Для связи с микроконтроллером из среды Simulink использован пакет RS232Blockset [10], позволяющий по каналу RS232 осуществлять обмен информацией с устройствами, подключенными к COM-порту компьютера. На рис. 7, б представлено содержимое подсистемы Electric Drive структуры системы управления приводом (рис. 6).

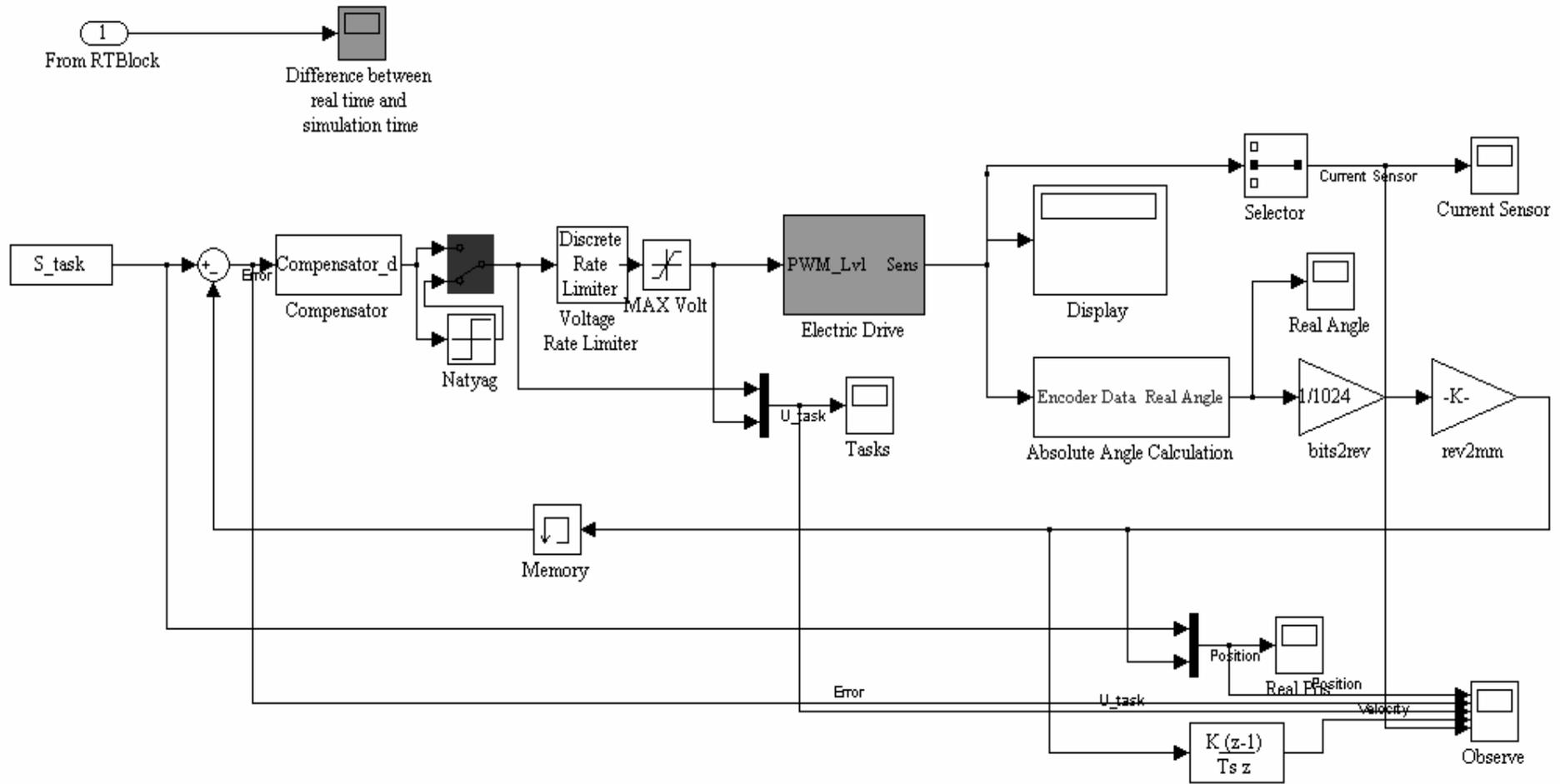


Рис. 6. Структура модели комбинированной системы управления приводом

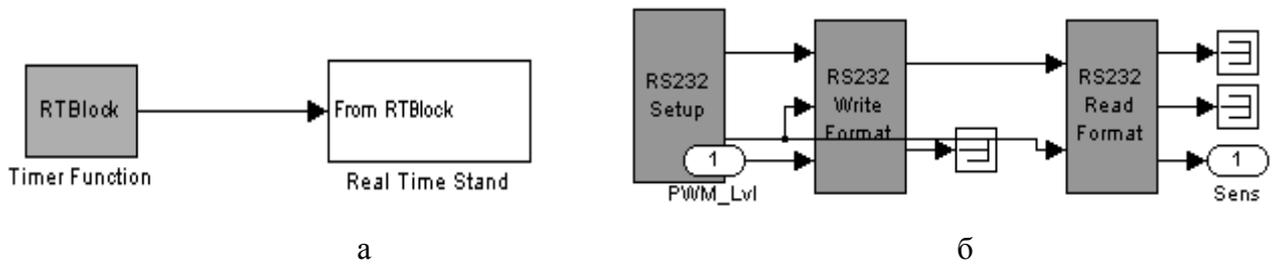


Рис. 7. Подключение к модели инструментов RTBlockset (а) и RS232Blockset (б)

Результаты работы данной комбинированной системы привода перемещения суппорта (рис. 8) показывают, что спроектированная система обрабатывает заданное перемещение S-образной формы с максимальной ошибкой позиционирования 3,6 мм. Причем данная ошибка возникает при старте и остановке двигателя. При движении с постоянной требуемой скоростью, т. е. при номинальном режиме работы привода, ошибка позиционирования не превышает 0,4 мм (рис. 8). Т. к. исследуемый объект является моделью привода подачи токарного станка, то с точки зрения системы управления к нему предъявляются требования минимизации ошибки по скорости. Спроектированная система является системой с астатизмом второго порядка, следовательно, ошибка при линейно нарастающем сигнале задания асимптотически стремится к нулю (рис. 5).

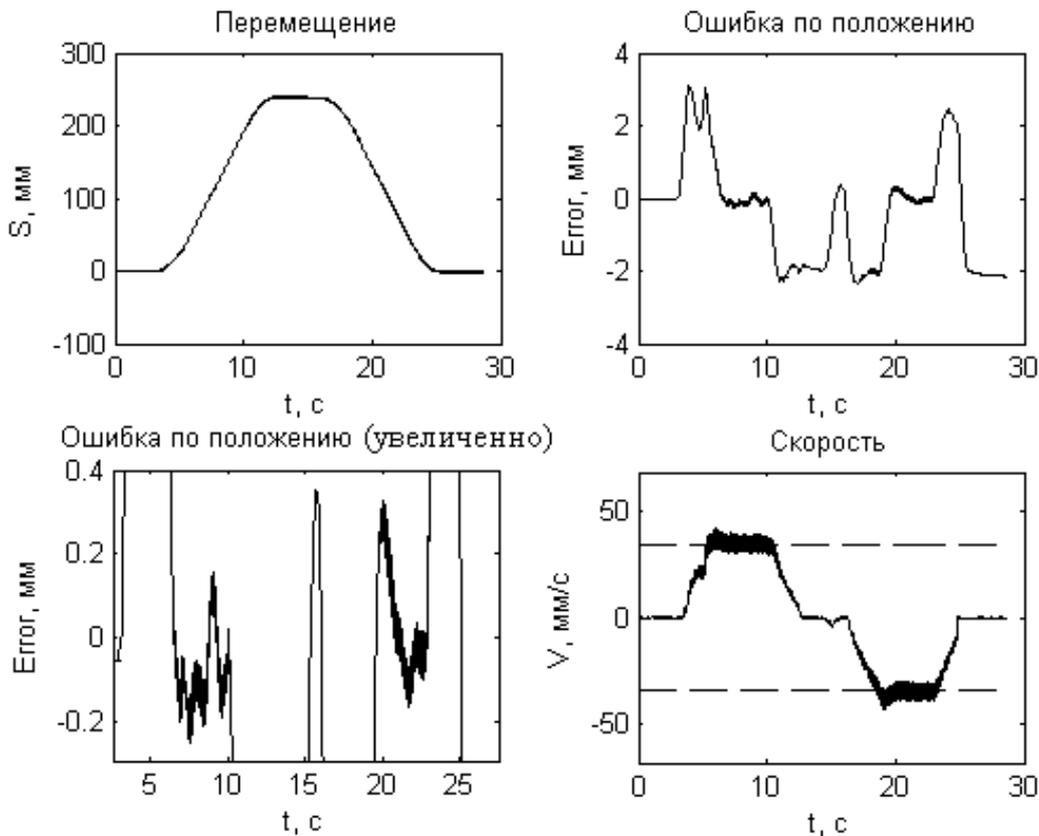


Рис. 8. Графики перемещения, ошибки позиционирования и скорости движения комбинированной системы

Графики динамических процессов в электроприводе, полученные на реальном стенде, соответствуют модельным данным, что позволяет сделать вывод о целесообразности подхода проектирования электропривода при помощи модельно-ориентированного подхода.

Трудности традиционного подхода к проектированию систем управления заключаются в: несовершенстве используемых текстовых документов на этапе составления требований и спецификаций при итеративном подходе проектирования; сложности и дороговизне физических прототипов на этапе проектирования; в том, что при ручной разработке на этапе реализации применение других программных средств и человеческие ошибки делают процесс ненадежным, а на этапе проверки традиционное тестирование приводит к обнаружению ошибок лишь в конечной стадии разработки ПО.

При применении модельно-ориентированного проектирования, когда строгая спецификация представлена в виде модели в дополнение к текстовым требованиям, используется один и тот же набор моделей для всего коллектива разработчиков, а также полная модель всей системы и внешних условий; использование функциональных диаграмм обеспечивает раннее обнаружение ошибок путем разработки тестов.

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы были рассмотрены вопросы модельно-ориентированного проектирования систем управления на примере системы управления электроприводом перемещения физической модели суппорта токарного станка. Выполнены исследования и эксперименты, заключающиеся в определении реальных параметров электродвигателя и параметров объекта управления, синтезе цифрового регулятора и исследовании возможности генерации программного кода реализации регулятора, проектирование S-образного задатчика интенсивности, исследовании стабильности работы комбинированной системы управления.

Таким образом, разработан стенд для проведения экспериментальных исследований по оптимизации структур регуляторов, исследованию динамических свойств привода при работе на различную нагрузку.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А. Использование среды проектирования IBM Rational / Telelogic Rhapsody для разработки встраиваемых цифровых приложений [Электронный ресурс] / А. Николаев. – Режим доступа до журн. : <http://www.interface.ru/home.asp?artId=20938>.
2. Мамаева Т. Программные и аппаратные средства поддержки разработок компании IAR Systems [Электронный ресурс] / Т. Мамаева. – Режим доступа до журн. : [http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2008\\_4\\_108.pdf](http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2008_4_108.pdf).
3. Брокеров А. Ж. Программируемые логические контроллеры, МЭК системы программирования и CoDeSys [Электронный ресурс] / А. Ж. Брокеров, И. В. Петров // Автоматизация и производство. – 2006. – № 1. – Режим доступа до журн. : [http://www.prolog-plc.ru/docs/plc\\_codesys.pdf](http://www.prolog-plc.ru/docs/plc_codesys.pdf).
4. Ефремов А. А. Модельно-ориентированное проектирование для решения задач автоматизации. [Электронный ресурс] / А. А. Ефремов, С. М. Зенков // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях (4–8 апреля 2011 г.)». – Режим доступа до журн. : <http://sl-matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2040-43%20Sorokin.pdf>.
5. IR2103(S) & (PbF) HALF-BRIDGE DRIVER Data Sheet No. PD60045-O [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2103.pdf>.
6. LPC2131/32/34/36/38 Product data sheet [Электронный ресурс] Режим доступа до журн. : [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC2131\\_32\\_34\\_36\\_38.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC2131_32_34_36_38.pdf).
7. AS5040 Rotary Encoder IC Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : <http://www.austriamicrosystems.com/eng/Products/Magnetic-Encoders/Rotary-Encoders/AS5040>.
8. ACS712 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : [http://www.allegromicro.com/en/Products/Part\\_Numbers/0712/0712.pdf](http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf).
9. Leonardo D. RT Blockset [Электронный ресурс] / Daga Leonardo. – Режим доступа до журн. : <http://leonardodaga.insyde.it/Simulink/RTBlockset.htm>.
10. Leonardo D. RS232Blockset Blockset [Электронный ресурс] / Daga Leonardo. – Режим доступа до журн. : <http://leonardodaga.insyde.it/Simulink/RS232Blockset.htm>.

Статья поступила в редакцию 31.10.2011 г.