

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-01652 от 27.06.2014 г.).

Л и т е р а т у р а

1. Reimer L. Scanning electron microscopy. Physics of image formation and microanalysis. Berlin, N.Y.: Heidelberg Springer, 1998.
2. Рау Э. И., Дицман С. А., Зайцев С. В., Лермонтов Н. В., Лукьянов А. Е., Купреенко С. Ю. Анализ формул для расчёта основных характеристик отражённых электронов и сравнение с экспериментальными результатами // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 8. С. 1050—1058.
3. Боровский И. Б., Водоватов Ф. Ф., Жуков А. А., Черепин В. Т. Локальные методы анализа материалов. М.: Металлургия, 1973.
4. Кузин А. Ю., Степович М. А., Митюхляев В. Б., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Тепловые эффекты при низковольтном электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе с нанометровой локальностью // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 27—29.
5. Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Изменение химического состава анализируемого объекта при низковольтном электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 27—29.

6. Филиппов М. Н. Оценка теплового воздействия электронного зонда в растровой электронной микроскопии и рентгеноспектральном анализе / Известия РАН. Серия физическая. 1993. Т. 57. № 8. С. 163—164.

7. Бакалейников Л. А., Галактионов Е. В., Третьяков В. В., Троп Э. А. Расчёт теплового воздействия электронного зонда на образец нитрида галлия // Физика твёрдого тела. 2001. Т. 43. № 5. С. 779—785.

8. Масловская А. Г. Моделирование теплового воздействия электронного зонда в растровой электронной микроскопии // Информатика и системы управления. 2007. № 2. С. 40—51.

9. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 1999.

10. Mikheev N. N., Stepovich M. A. Distribution of energy losses in interaction of an electron probe with material // Industrial Laboratory. 1996. V. 62. No. 4. P. 221—226.

11. Заблоцкий А. В., Кузин А. Ю., Михеев Н. Н., Степович М. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Широкова Е. В. Учёт матричных эффектов при измерениях методом рентгеноспектрального анализа // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 58—61.

12. Физические величины: справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Дата принятия: 22.12.2016.

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

681.32

Информационно-измерительная система для диагностики электромеханических систем

О. В. ВЕСЕЛОВ, Н. А. КОНОНЫХИНА, В. М. ПЕРЕПЁЛКИН

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
Владимир, Россия, e-mail: nadeka.trust@mail.ru

Рассмотрено построение информационно-измерительной системы на основе многофункциональной платы NI6221 и программной среды Matlab. Приведены решения аппаратной части и программного обеспечения для измерения параметров электромеханических систем и диагностирования их состояния.

Ключевые слова: программное обеспечение, диагностика, электромеханическая система.

The construction of informational-measuring complex based on the multifunctional card NI6221 and Matlab programming environment. The solutions of hardware and software for measuring variables and diagnosing the state of electromechanical systems are proposed.

Key words: software, diagnostics, electromechanical system.

Любая электромеханическая система (ЭМС), с помощью которой осуществляются технологические процессы, недолговечна и небезотказна. Для продления её жизненного цикла без поломок и аварий, нередко приводящих к большим экономическим затратам и значительным потерям времени, необходимо своевременно предопределять неисправности. С этой задачей можно справиться, если постоянно или систематически анализировать техническое состояние ЭМС с помощью оборудования, ориентированного на измерения и обработку информации.

Среди множества решений проектирования информационно-измерительных систем (ИИС) и разработки программного обеспечения особый интерес представляют многофункциональная плата NI6221 и пакет прикладных программ Matlab [1, 2]. Данная плата и пакет программ являются основой для построения диагностических устройств диагностики ЭМС. Заметим, что класс ЭМС достаточно широк и представляет собой устройства, содержащие преобразователь электрической энергии в механическую, а также механизм и систему управления преобразователем энергии. К

задачам диагностирования ЭМС относятся: анализ состояния, выполненный на основе прикладных программ из программной среды Matlab; формирование выводов, полученных с привлечением различных алгоритмов; принятие решений по результатам этих выводов. Если система полностью автоматическая, то реализуется автоматическое устранение дефектов в объекте, в противном случае выводится сообщение о надлежащих действиях для устранения дефекта в диагностируемой системе.

Система диагностирования состоит из следующих основных подсистем: прикладного программного обеспечения; программной среды Matlab; измерительной платы NI6221; модуля сопряжения BNC2120 [3]; объекта диагностирования, в качестве которого рассматривается привод постоянного тока с механической системой. Особенность системы заключается в том, что управление работой привода, процессом измерений и обработкой информации осуществляется с использованием программных модулей, построенных в среде имитационного моделирования Simulink [4], а настройка аппаратных средств — посредством RealTimeWindowsTarget [5]. Источником информации служат непосредственно измеряемые в приводе переменные. Необходимые для принятия решений данные восстанавливаются с привлечением методов идентификации, которые выполняются в той же программе, в которой проводились измерения.

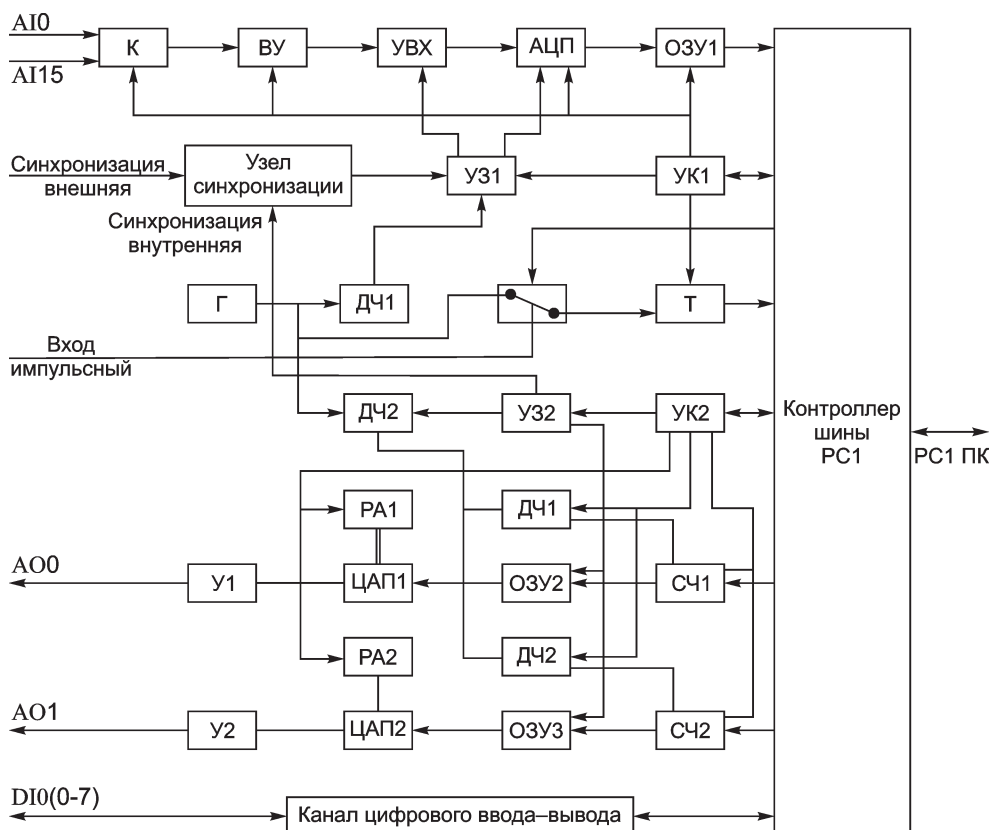


Рис. 1. Структурная схема платы обмена информацией:

К — коммутатор; ВУ — усилитель; УВХ — устройство выборки и хранения; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; УК — управление каналами; Г — генератор; ДЧ — делитель частоты; Т — таймер; УЗ — устройства запусков; РА — регулятор амплитуды; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; СЧ — счётчик; У — усилитель

Программная среда Matlab. В основу построения программного обеспечения работы ИИС положен пакет прикладных программ Matlab. Возможности его настолько широки, что позволяют решать множество задач, а средства построения моделей и простота создания различных структур практически во всех отраслях реализованы доступными средствами. В зависимости от желаний разработчика можно создавать модели на различных языках программирования (например, C++), на собственном языке пакета с соответствующим набором команд, в виде блоков, объединяя их на основе функционально-физических или причинно-следственных связей, а также на основе аналогий реальных устройств.

Рассмотрим программные продукты пакета Matlab, такие как Simulink и RealTimeWindowsTarget, используемые для создания ИИС и выполнения процедур диагностирования. Среда Simulink является приложением программной среды Matlab и служит её базовым инструментом. При моделировании с помощью Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране монитора создаёт модель устройства из блоков, находящихся в библиотеке данной среды, и осуществляет расчёты. В процессе работы с Simulink не требуется полноценных знаний о Matlab и его приложениях, не нужно изучать языки программирования и численные мето-

ды математики, достаточно лишь обладать навыками, необходимыми при работе на компьютере [6]. При этом доступ к функциям Matlab и его инструментам остаётся открытым, и их можно использовать в Simulink. Часть приложений, входящих в состав пакета Matlab, содержит встраиваемые в Simulink инструменты, при работе с которыми можно составлять свои собственные блоки, или модернизировать библиотечные, а также создавать новые библиотеки блоков, ориентированные на решение поставленной задачи.

Ещё одна возможность программной среды Matlab — получение программных кодов на языке C или его подмножеств, а также создание объектного кода и исполняемого файла. Это позволяет запускать программу на компьютере или загружать в микропроцессорное устройство для управления процессом.

При моделировании в среде Simulink можно выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В процессе моделирования имеется возможность формировать различные виды управляющих сигналов, следить за процессами, происходящими в системе. Результаты моделирования можно представить в виде графиков или таблиц [7].

Программа RealTimeWindowsTarget содержит модули ввода и вывода аналоговой и цифровой информации, энкодеры, счётчики и другие устройства. Набор устройств, способных работать в составе Matlab, находится в специальной библиотеке. Часть перечисленных устройств, к которым относится и плата NI6221, применяемая для диагностики, принадлежит фирме National Instruments (США) и в настоящее время сертифицирована для применения в разработках на территории РФ.

Настройку модулей выполняют при их выборе из библиотеки. Сначала определяют тип устройства. Для аналоговых устройств устанавливают уровень сигнала, номер канала, дискретность измерений, а для цифровых — номер устройства и биты, участвующие в обмене информацией.

Плата NI6221 и соединитель BNC2120.

Структурная схема платы NI6221 представлена на рис. 1. Плата содержит различные подсистемы, такие как ввода аналоговой информации, каналов вывода аналоговой информации, цифрового побайтового обмена данными и набора устройств синхронизации, запуска и коммутации. Ввод аналоговой информации может осуществляться либо по 16 каналам с общей точкой, либо по восьми каналам, включённым по дифференциальной схеме. Через входной коммутатор *K* преобразуемый сигнал, нормализованный в промежуточном внутреннем усилителе *ВУ*, поступает на устройство выборки и хранения *УВХ* и запоминается на время преобразования аналогового сигнала в цифровой код. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой код используется 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Преобразованные данные сохраняются в буферном оперативном запоминающем устройстве *ОЗУ*, а затем передаются в персональный компьютер *ПК* на обработку. Управление работой АЦП осуществляется от устройств запуска *УЗ1* и коммутации *УК1* и синхронизируется через узел синхронизации внешним или внутренним сигналами. Тактирование процессов осуществляется от генератора *Г* и таймера *Т*. Цифровые данные передаются по каналу цифрового ввода—вывода, имеющему восемь разрядов и обеспечивающему как побитовый обмен, так и байтовый. Отдельно в плате предусмотрены два канала аналогового вывода, построенные на цифроаналоговых преобразователях (ЦАП) *ЦАП1*, *ЦАП2*, *ОЗУ2*, *ОЗУ3*, регистрах *РА1*, *РА2*, счётчиках *СЧ1*, *СЧ2* и делителях частоты *ДЧ1*, *ДЧ2*. В *ОЗУ* записывается форма сигнала и с помощью счётчиков изменяется его частота, а посредством регистров определяется амплитуда. Для увеличения сигнала по мощности на выходе установлены усилители *У1*, *У2*.

Для связи платы и объекта исследований предусмотрен соединитель BNC2120 (рис. 2), содержащий восемь входов для подключения аналоговых сигналов, два канала аналоговых выходных сигналов, разъём для цифровых сигналов ввода—вывода с индикаторами состояния, вход для подключения синхронизирующих сигналов ввода—вывода. Встроенный в соединитель функциональный генератор формирует сигналы уровня транзисторно-транзисторной логики, прямоугольный сигнал с настраиваемой частотой, а также синусоидальный или треугольный сигналы с регулируемой амплитудой и частотой. Соединитель BNC2120 позволяет упростить подключение объекта исследований и избежать дополнительных соединений, однако при необходимости

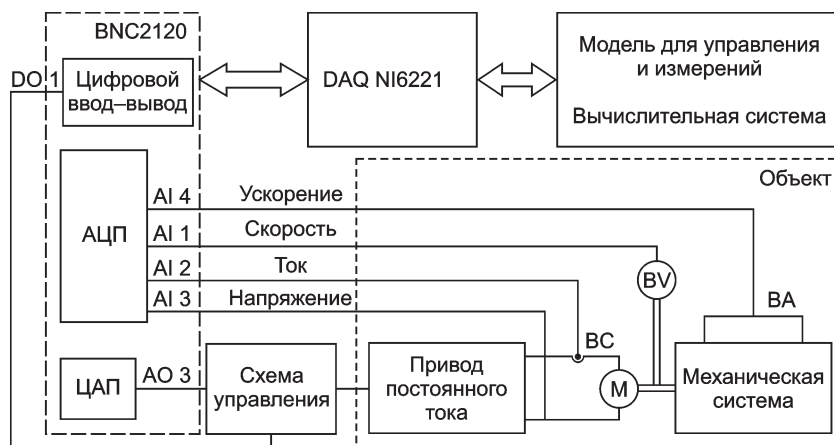


Рис. 2. Структурная схема информационно-измерительной системы:

DAQ NI6221 — плата цифроаналогового преобразования; BNC2120 — соединитель; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; M — электродвигатель; BV, BC, BA — датчики скорости, тока, ускорения, соответственно

объект исследований можно присоединить непосредственно к плате NI6221.

Структурная схема ИИС. Структурная схема разработанной ИИС, построенной на базе персонального компьютера со встроенной платой NI6221, стандартного программного обеспечения и программной среды Matlab, представлена на рис. 2. Для платы NI6221 предусмотрено дополнительное программное обеспечение.

В состав ИИС входит вычислительная система, плата DAQ NI6221, соединитель BNC2120, схема управления, а также схема объекта, состоящего из механической системы, электродвигателя *M* и привода. Плата устанавливается в шину *PCI* вычислительной системы и через разъём на её внешней стороне соединяется с блоком BNC2120. В качестве информационного обеспечения используются датчики, входящие в состав объекта. К ним относятся: датчик скорости, в качестве которого применяется встроенный в двигатель тахогенератор; датчик тока ACS712 BC, выполненный на основе эффекта Холла; пристраиваемый трёхкомпонентный датчик ускорения ADXL335 BA. Напряжение питания измеряется непосредственно на зажимах якоря.

Управление работой ЭМС основано на использовании простой схемы, функциями которой управляет 8-битный регистр цифрового ввода—вывода устройства BNC2120. Сигнал с выхода DO1 запускает реле, через контакты которого подаётся управляющее воздействие на вход привода от платы (см. рис. 2). При этом отключается ручной режим работы объекта. Объектом для измерений и диагностирования служит привод постоянного тока ПРВП-02 с высокомоментным двигателем УПС-6. Входное воздействие на привод формируется в цифроаналоговом преобразователе (ЦАП) (выход AO3). Сигналы с датчиков поступают на соответствующие входы AI1—AI4 АЦП.

Аппаратные средства настраивают с помощью библиотеки программ RealTimeWindowsTarget. Для измеряемых сигналов каждый канал настраивают отдельно. Для этого в панели настройки устанавливают номер канала, диапазон измеряемых уровней напряжения в интервалах $-0,2...0,2$; $-1...1$; $-5...5$; $-10...10$ В и интервал времени дискретизации

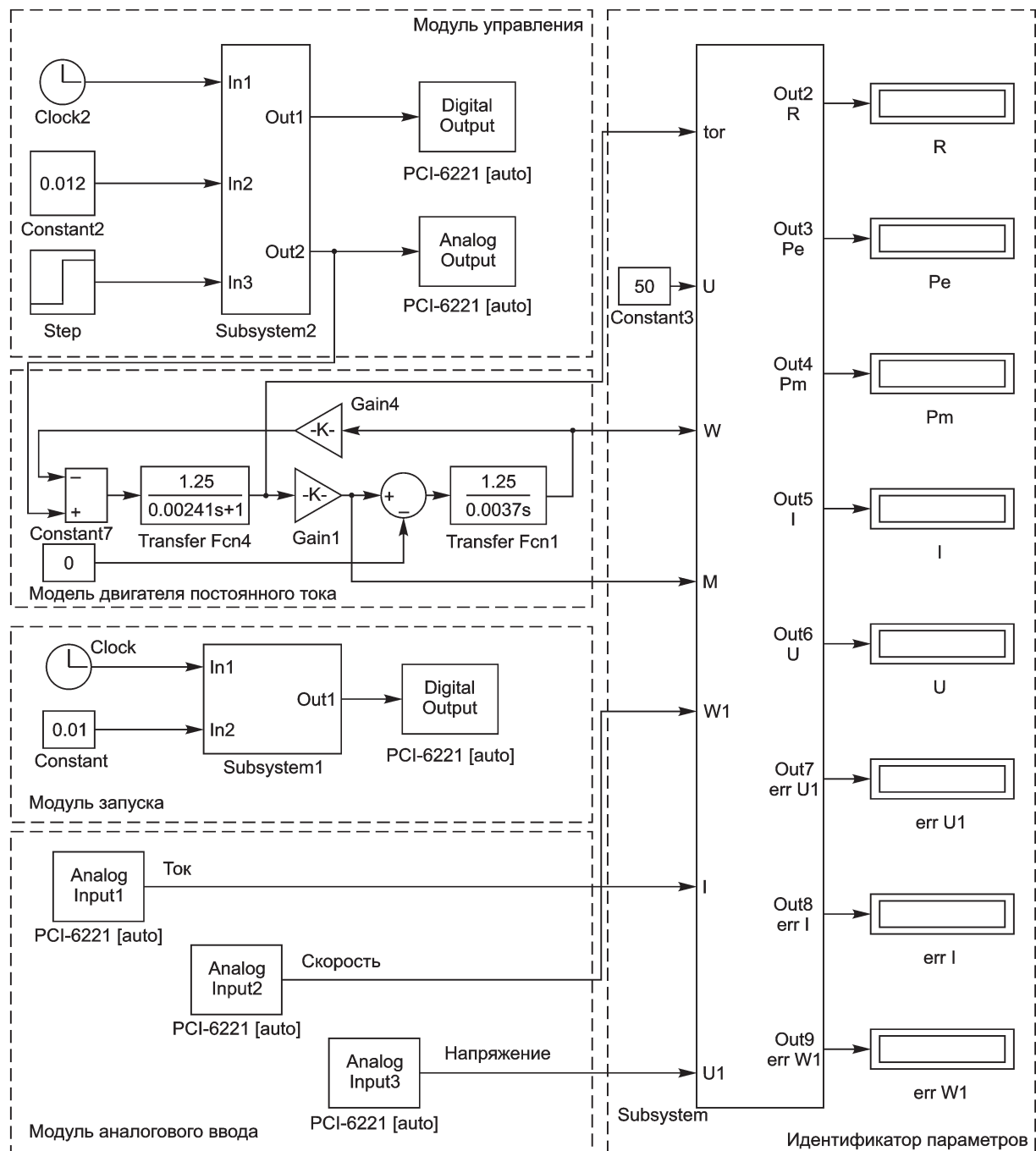


Рис. 3. Структура программы измерений и идентификации параметров электродвигателя:

Clock — таймер; *Constant* — постоянное значение; *Step* — скачкообразное входное воздействие; *Subsystem* — подсистема; *Transfer Fcn* — передаточная функция; *Gain* — усилитель; *Digital Output* — цифровой выход; *Analog Input*, *Analog Output* — аналоговые вход и выход, соответственно; *R*, *Pe*, *Pm*, *err* — индикаторы

(минимум 50 нс). Настройку производят в зависимости от необходимой точности и с учётом сложности программы. Остальные устройства настраивают аналогично.

Калибровка программно-аппаратных устройств ИИС. В реальных условиях суммарная абсолютная погрешность состоит из инструментальной погрешности и погрешности программного обеспечения. Теоретически, при максимальном напряжении 10 В и разрядности 16 бит минимальное на-

пряжение составляет $1,53 \cdot 10^{-4}$ В, что соответствует одному биту преобразователя.

Инструментальная погрешность приведена в документации на плату, где указаны реальные характеристики преобразования платы по точности. Для каждого из диапазонов приведены значения абсолютной погрешности, составляющие соответственно 3100 мкВ для диапазона ± 10 В, 1620 мкВ для ± 5 В, 360 мкВ для ± 1 В и 112 мкВ для диапазо-

на $\pm 0,2$ В. Для ЦАП регламентируемая абсолютная погрешность для всех уровней выходного сигнала равна 3200 мкВ.

Вычисления проводят в формате, устанавливаемом пользователем (с фиксированной или плавающей запятой). При создании программ для отображения чисел используют 16 значащих цифр в диапазоне до $10^{\pm 308}$. При этом абсолютная погрешность вычислений на конечном результате не сказывается. Поэтому ожидаемая погрешность измерений не может быть меньше указанных значений. По смыслу решаемой задачи идентификации абсолютная погрешность в 0,001 В является вполне удовлетворительной.

Проверку величин и погрешностей входного и выходного напряжений осуществляют в следующей последовательности. В модуле управления приводом (рис. 3) устанавливаются значения выходного виртуального (поскольку в программе эта величина безразмерная) напряжения одного из диапазонов.

Программно-аппаратное решение контроля основано на том, что в модуле управления приводом задаётся цифра один, что должно соответствовать на выходе ЦАП значению 1 В, а при вводе реального сигнала, наоборот, значению 1 В должен соответствовать код цифры один.

В результате измерений установлено, что заданный выходной сигнал с ЦАП передаётся с оговоренной погрешностью, а для АЦП измеренный сигнал 1 В имеет в своем составе шум амплитудой $\pm 0,2$ мВ. Таким образом, задаваемые в программе величины соответствуют физическим. Аналогичные результаты получены и для интервалов $-0,2...0,2$; $-1...1$; $-5...5$; $-10...10$ В.

Достоинство программы процесса управления приводом и измерений характеристик заключается в том, что программирование процессов осуществляется в среде Simulink. Как и любая программная система, среда Matlab интуитивно понятна, и форма представления в виде пиктограмм блоков легко воспринимается пользователем [4, 6, 7].

Рассмотрим построение программы процесса управления приводом на примере структурной схемы, приведённой на рис. 2. Для решения задачи диагностирования параметров привода из библиотеки последовательно выбирают необходимые блоки и соединяют их так, чтобы реализовать процедуры управления, измерений и обработки полученной информации.

Программа состоит из следующих модулей: управления приводом; запуска; модели двигателя постоянного тока; ввода данных и идентификации параметров, представленных в виде блоков программы Simulink (см. рис. 3). Основная программа имеет значительный размер и не может быть представлена полностью из-за ограниченного объёма.

Для выполнения программы процесс запускается с использованием стандартных процедур Simulink. Модуль запуска включается, и данные, формируемые в этом модуле, через устройство цифрового выхода *Digital Output* подключают вход привода к устройству управления с использованием схемы управления (см. рис. 2). В модуле запуска с помощью таймеров *Clock2*, *Constant2* и *Subsystem1* устанавливается интервал времени, в течение которого будет работать привод.

Измерение переменных происходит при подаче на вход привода скачкообразного входного воздействия *Step* (возможно формирование любого сигнала в зависимости от решаемой задачи), формируемого в модуле управления приводом. Этот сигнал подаётся в ограниченный промежуток

времени (задаваемый *Clock2*, *Constant2* и *Subsystem2*), достаточный для выполнения измерений, реализуемых модулем аналогового ввода. Измеряемые данные по трём каналам вводятся одновременно (*Analog Input1*, *Analog Input2*, *Analog Input3*) посредством модуля обслуживания аналогового ввода. После чего на входе привода устанавливается нулевой уровень напряжения задания. В результате получают характеристики, представленные на рис. 4, т. е. переходный процесс по скорости и ток в цепи якоря, использованные при дальнейшей обработке для идентификации параметров двигателя. Имеющиеся в измеренных сигналах шумы в дальнейшем устраняются с использованием цифровых фильтров.

Модель электродвигателя постоянного тока (см. рис. 3) показана в общепринятом виде на основе уравнений, представленных в [8] и реализованных блоками *Transfer Fcn1*, *Transfer Fcn4*, *Gain1*, *Gain4*. Параметры модели взяты из каталожных данных. Такие данные характеризуют усреднённые значения по группе однотипных устройств и могут отличаться от реальных. Для настройки и оптимизации электромеханических систем в паспортных данных на двигатель часто отсутствуют необходимые параметры.

В процессе измерений рассчитываются новые параметры и корректируются константы в программе модели двигателя. Для этой цели используют модуль идентификатора параметров, который и позволяет рассчитать параметры. Он построен на основе системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих связь параметров, а исходными данными являются реально измеренные характеристики. Часть параметров получают экспериментально по амплитудно-частотной характеристике, а часть — по переходной.

Программу для решения алгебраических выражений реализовать достаточно просто, а для решения дифференциальных уравнений применяют метод прямого программирования [9, 10]. Затем с помощью идентификатора *Subsystem* вычисляются необходимые параметры и отображаются в индикаторах *R*, *Pe*, *Pm*, *I*, *U*, *err*. Результаты работы программы идентификации приведены в таблице, в которой паспортные данные, сравниваются с результатами работы идентификатора.

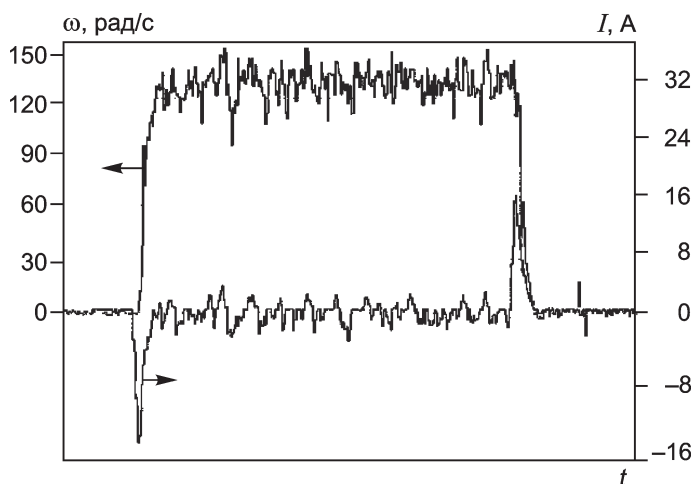


Рис. 4. Измеренные характеристики электромеханической системы: переходный процесс по скорости и ток якоря

Сравнительные данные паспортные и программы идентификации

Параметры	Паспорт	Идентификация
Номинальный ток якоря, А	11	11
Сопротивление якоря, Ом	0,8	0,81
Максимальное напряжение питания, В	85	85
Номинальное напряжение питания, В	28	28
Ток холостого хода, А	—	0,76
Пусковой ток, А	—	43
Момент инерции ротора, кг·м ²	—	0,00037
Постоянная двигателя, Нм/А	—	0,87
Пусковой момент, не менее, Нм	12	34,71
Номинальный момент, Нм	3	3
Максимальная частота вращения, об/мин	1000	1000
Номинальная частота вращения, об/мин	300	302,10
Потребляемая электрическая мощность, Вт	—	632,20
Выходная механическая мощность, Вт	—	504,30
ПротивоЭДС, В	—	50,20
Угловое ускорение, рад/с ²	—	4500
Постоянная времени, с	—	0,002700
Индуктивность, Гн	—	0,002349

Разработанная программа позволяет определять большинство параметров, в том числе и те, измерение которых невозможно из-за особенностей работы рассматриваемого двигателя. Например, для нахождения сопротивления якорной цепи необходимо подать номинальное напряжение питания на якорь, затормозить двигатель для исключения влияния его электродвижущей силы, и при нулевой скорости измерить ток и напряжение. Реализовать в реальном приводе такой процесс практически невозможно из-за срабатывания токовой защиты. Разработанная модель в этом случае позволяет без осложнений произвести измерения, причём при заданном по паспорту значении сопротивления 0,8 Ом, полученное по результатам измерений сопротивление составит 0,81 Ом.

Заключение. Представленная ИИС кроме основных функций измерений обладает множеством возможностей. Система позволяет реализовать: двухкоординатное управление приводами, различные виды регуляторов, построение системы программного управления, систем контроля и диагно-

стики и многое другое. Одновременно можно измерять и обрабатывать необходимые параметры для получения характеристик исследуемого процесса.

Как и любая ИИС, данная система имеет ряд специфических особенностей, связанных с построением программ измерений и управления. Для проектов, сложных по структуре, а также при значительном объёме используемых данных целесообразно разделять процессы сбора и обработки измеренной информации.

Л и т е р а т у р а

1. **Магда Ю. С.** NI Measurement Studio: практика разработки систем измерения и управления на С#. М.: ДМК-Пресс, 2013.
2. **Потёмкин В. Г.** Справочник по MATLAB. [Электрон. ресурс]: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/index.php> (дата обращения: 20.07.2016).
3. **Образовательная** брошюра National Instruments: Россия, СНГ и Балтия. [Электрон. ресурс]: <http://ni.com/russia/labview> (дата обращения: 20.07.2016).
4. **Черных И. В.** Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. [Электрон. ресурс]: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1> (дата обращения: 30.07.2016).
5. **Matlab: RealTimeWindowsTarget.** Запуск моделей Simulink в реальном времени на компьютерах под управлением Microsoft Windows. [Электрон. ресурс] <http://dropdoc.ru/doc/321381/real-time-windows-target> (дата обращения: 28.07.2016).
6. **Герман-Галкин С. Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА-принт, 2001.
7. **Гультяев А. К.** Визуальное моделирование в среде МАТЛАБ: Учебный курс. СПб.: Питер, 2000.
8. **Михайлов О. П.** Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1989.
9. **Веселов О. В.** Косвенное измерение переменных состояния для диагностирования электромеханических систем // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 43—46.
10. **Веселов О. В., Ермоленко Е. Ю., Веселов А. О.** Косвенное измерение переменных состояния для диагностирования электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. 2008. № 2. С. 24—27.

Дата принятия: 28.09.2016.