Кулиев Т. И.
Kuliev T.I.

младший научный
сотрудник Института
конструкторско-технологической информатики
Российской академии наук,
г. Москва,
Российская Федерация

Глашев Р. М.
Glashev R.M.

аспирант, младший
научный сотрудник
Института конструкторско-технологической информатики
Российской академии наук,
г. Москва,
Российская Федерация

Яхутлов У. М.
Yakhutlov U.M.

аспирант, младший
научный сотрудник
Института конструкторско-технологической информатики
Российской академии наук,
г. Москва,
Российская Федерация

УДК 006.91

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИЯ РАЗРУШЕНИЯ ШВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ КОМБИНАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ И КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ

В лабораториях есть огромное количество измерительных стендов старого образца, которые используются в качестве датчиков преобразователей физических величин в электрические, а также для проведения измерений электродвигателей. Системы управления этими установками созданы на устаревшей на данный момент элементной базе, которая уже не выпускается и может не иметь прямых аналогов. При поломке блоков управления всё устройство может оказаться непригодным к работе, а ремонт электроники – нерациональным.

Ручная наладка, подстройка и калибровка – еще одна проблема, которой обладает электроника устаревших стендов. Со временем номиналы электронных радиоэлементов (ЭРЭ) могут измениться и показания прибора станут неверными или изменчивыми. Использование программируемого контроллера позволяет ввести алгоритмы самокалибровки и самотестирования, а встроенные модули ЦАП – непосредственную подстройку работы схемы в автоматическом режиме.

Разработка системы управления на основе микроконтроллера дает возможность избавиться от обозначенных выше проблем, тем самым уменьшив размеры электронного содержимого стенда и позволив увеличить ее надежность за счет использования меньшего количества более современных деталей, т.е. увеличить степень интеграции. Технические характеристики установки (точность измерения, скорость измерения) должны, как минимум, остаться на прежнем уровне, что и при использовании оригинальной электроники, или улучшиться.

Адгезиометр представляет собой устройство, состоящее из тяжелого основания, на котором крепится электродвигатель РД-09А, соединенный через муфту с редуктором, подвижная платформа и стойка с датчиком. Подвижная платформа через передачу типа «винт-гайка» соединена с электродвигателем. Диапазон передвижения платформы ограничен концевыми выключателями с двух сторон. На платформе закреплены нагреватели для возможности испытания образцов при повышенных температурах. На стойке закреплен тензометрический

датчик, который регистрирует усилие на образцах при их растяжении подвижной платформой.

Датчик представляет собой полный мост Уитстона, что, в свою очередь, является классическим решением в тензометрии. Его выходной сигнал представляет собой два уровня напряжения, отклоняющихся от уровня $U_{пит}/2$ в противофазе при подаче усилия на измерительный фланец датчика. Для усиления и регистрации таких сигналов используются инструментальные усилители, которые работают в дифференциальном режиме. Амплитуда отклонения напряжения составляет порядка нескольких милливольт.

Повысилась точность и качество изменений.

Упростилась схема наладки установки. При небольшой доработке калибровка стенда может производиться в полностью автоматическом режиме.

Произведено взаимодействие установки с ПК, что упростило методику проведения экспериментов, а также позволило автоматизировать процесс измерений.

Увеличена надежность установки.

Ключевые слова: Микроконтроллер, сигма-дельта АЦП, тензометрия, измерения, лабораторный стенд, принципиальная схема.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF MEASURING THE FAILURE FORCE OF A SEAM TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF VARIOUS COMBINATIONS OF MATERIALS

In the laboratories there is a huge number of measuring stands of the old model, which are used as sensors for converting physical quantities into electrical ones, as well as using electric motors for measuring. The control systems of these installations are based on the outdated element base, which is no longer available and may not have direct analogues. If the control unit breaks down, the entire device may be unusable, and the repair of electronics may be irrational.

Manual adjustment, adjustment and calibration is another problem that the electronics of obsolete stands have. Over time, the ratings of electronic radioelements (ERE) may change and the instrument readings will become incorrect or changeable. Using a programmable controller allows you to enter algorithms for self-calibration and self-testing, and built-in DAC modules – direct adjustment of the circuit in the automatic mode.

The development of a control system based on a microcontroller makes it possible to get rid of the problems identified above, thereby reducing the size of the electronic contents of the stand and will increase its reliability by using fewer more modern parts, i.e. increase the degree of integration. The technical characteristics of the installation (measurement accuracy, measurement speed) should, at a minimum, remain at the same level as with original electronics or improve.

The adhesion meter is a device consisting of a heavy base on which the RD-09A electric motor is attached, connected through a coupling with a gearbox, a movable platform and a stand with a sensor. The movable platform through the transmission of the type "screw-nut" is connected to the electric motor. The range of movement of the platform is limited by limit switches on both sides. Heaters are attached to the platform to allow samples to be tested at elevated temperatures. A strain gauge is mounted on the rack and registers the force on the specimens as they are stretched by a moving platform.

The sensor is a complete Wheatstone bridge, which, in turn, is the classic solution in strain gauging. Its output signal consists of two voltage levels deviating from the $U_{пит} / 2$ level in antiphase when force is applied to the measuring flange of the sensor. To amplify and record such signals, instrumental amplifiers are used that operate in the differential mode. The amplitude of the voltage deviation is of the order of several millivolts.

Improved accuracy and quality of change.

Simplified setup. With a slight refinement, stand calibration can be done in fully automatic mode.

The interaction of the installation with a PC was made, which simplified the methodology for conducting experiments, and also allowed to automate the measurement process.

Increased reliability of the installation.

Key words: Microcontroller, $\Sigma\Delta$ ADC, tensometrics, measuring, laboratory equipment, electronic schematics.

Введение

Объект исследования. Лабораторный адгезиометр – прибор, предназначенный для измерения прочности соединения материалов.

Предмет исследования. Разработка встраиваемой системы управления, которая представляет собой комплекс аппаратно-программных средств для обеспечения работоспособности стенда и проведения на нём измерений в автоматическом режиме, а также обеспечения взаимодействия ПК со стендом для визуализации и анализа собранных данных.

Актуальность темы. В лабораториях есть огромное количество измерительных стендов старого образца, которые используются в качестве датчиков преобразователей физических величин в электрические, а также для проведения измерений электродвигателей. Системы управления этими установками созданы на устаревшей на данный момент элементной базе, которая уже не выпускается и может не иметь прямых аналогов. При поломке блоков управления всё устройство может оказаться непригодным к работе, а ремонт электроники – нерациональным.

К тому же оригинальные системы управления, как правило, не позволяют обеспечить взаимодействие установки с ПК и автоматизировать процесс проведения измерений.

Ручная наладка, подстройка и калибровка – еще одна проблема, которой обладает электроника устаревших стендов. Со временем номиналы ЭРЭ могут измениться и показания прибора станут неверными или изменчивыми. Использование программируемого контроллера позволяет ввести алгоритмы самокалибровки и самотестирования, а встроенные модули ЦАП – непосредственную подстройку работы схемы в автоматическом режиме.

В связи с этим, разработка системы управления на основе микроконтроллера дает возможность избавиться от обозначенных выше проблем, тем самым уменьшив размеры электронного содержимого стенда и позволив увеличить ее надежность за счет использова-

ния меньшего количества более современных деталей, т.е. увеличить степень интеграции. Технические характеристики установки (точность измерения, скорость измерения) должны, как минимум, остаться на прежнем уровне, что и при использовании оригинальной электроники или улучшиться.

Целью данного исследования является модернизация существующих лабораторных приборов за счет разработки новых электронных систем управления ими и их дальнейшего внедрения.

Для достижения поставленной цели в работе решен следующий комплекс задач:

1. Теоретическое обоснование целесообразности применения микроконтроллеров на базе ядра ARM в лабораторных установках.
2. Разработка структуры тестового стенда.
3. Разработка принципа действия стенда.
4. Практическая реализация стенда и подтверждение правильности выводов.

Обзор модернизируемого лабораторного стенда

Адгезиометр представляет собой устройство, состоящее из тяжелого основания, на котором крепится электродвигатель РД-09А, соединенный через муфту с редуктором, подвижная платформа и стойка с датчиком. Подвижная платформа через передачу типа «винт-гайка» соединена с электродвигателем. Диапазон передвижения платформы ограничен концевыми выключателями с двух сторон. На платформе закреплены нагреватели для возможности испытания образцов при повышенных температурах. На стойке закреплен тензометрический датчик, который регистрирует усилие на образцах при их растяжении подвижной платформой.

Датчик представляет собой полный мост Уитстона, что, в свою очередь, является классическим решением в тензометрии. Его выходной сигнал представляет собой два уровня напряжения, отклоняющихся от уровня $U_{пит}/2$ в противофазе при подаче усилия на измерительный фланец датчика. Для усиления и регистрации таких

сигналов используются инструментальные усилители, которые работают в дифференциальном режиме. Амплитуда отклонения

напряжения составляет порядка нескольких милливольт. Взаимная связь между компонентами системы показана на рисунке 1.

Рисунок 1. Схема установки

Определение требований к управляющей электронике

Встраиваемая система управления установкой должна решать следующие задачи:

1. Управление двигателем – включение и выключение, а также смена направления вращения вала.
2. Определение состояния концевых выключателей и остановка платформы.

3. Усиление и фиксация аналогового сигнала с тензодатчика.

4. Передача показаний на ПК и прием команд.

5. Аварийная остановка эксперимента в случае нажатия соответствующей кнопки.

6. Управление нагревателями.

Данный перечень задач позволяет определить структуру разрабатываемой системы, которая представлена на рисунке 2.

Рисунок 2. Структурная схема установки

Выходной сигнал тензодатчика поступает на входы дифференциального усилителя, где усиливается относительно уровня смещения, необходимого для компенсации разности показаний полуплечей полного моста, возникающих из-за неидентичности тензорезисторов. Для согласования уровней сигналов усилителя и микроконтроллера предусмотрен неинвертирующий усилитель сигнала ЦАП установки смещения и буфер на основе сдвоенного ОУ с задающими делителями.

Микроконтроллеру требуется для своей работы подсистема тактирования в виде кварцевого резонатора, который настроен на частоту 8 МГц.

Данные АЦП передаются на ПК с помощью адаптера USB-COM на скорости 1 МБод.

Логическая и силовая часть устройства питается от отдельных блоков питания напряжением 5 В.

Поскольку требуется управление двигателем, который питается от сети переменного тока напряжением 220 В, что повлечет за собой возникновение нежелательных электромагнитных помех, в схеме использована

гальваническая развязка цепей управления, а блок реле питается от отдельного БП для исключения перепадов напряжения в момент включения катушек.

Двигатель РД-09А требует для своей работы наличия фазосдвигающих конденсаторов.

Выбор контроллера

Параметры контроллера, которые определяют его пригодность в разрабатываемой системе:

1. Разрядность встроенного АЦП.
2. Скорость преобразования встроенного АЦП.
3. Наличие встроенного ЦАП.
4. Тактовая частота, обеспечивающая необходимую скорость обработки информации.
5. Количество портов ввода-вывода для управления двигателем.
6. Наличие аппаратного интерфейса UART.

В оригинальной электронике стенда применялся АЦП ADS 1286, основные характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исходного АЦП

Название характеристики	Значение параметра
Количество разрядов	12
Ошибка смещения	0,75 НЗР*
Ошибка усиления	До 2 НЗР*
Напряжение питания	5 В
Максимальная частота преобразования	20 кГц

*НЗР – наименее значимый разряд

В результате анализа существующих доступных моделей МК на ядре ARM от компании STMicroelectronics был выбран контроллер STM32 F373 CCT6. Его характеристики представлены в таблице 2.

Стоит обратить внимание, что значения ошибок смещения и усиления даны для АЦП до процесса калибровки, которая предусмотрена при отладке контроллера заводом изготовителем и происходит автоматически при запуске соответствующих микропрограмм [1].

Согласно технической документации компании STMicroelectronics [2], применение данного контроллера и входящего в его состав сигма-дельта АЦП рекомендуется для устройств, которые фиксируют электрические величины, и критичным параметром для этой задачи является быстродействие, которое у выбранного АЦП в 2,5 раза превосходит показатели оригинальной микросхемы.

Сигма-дельта АЦП контроллера имеет несколько режимов работы, но для целей данного исследования наиболее подходящим оказывается режим Single ended zero-reference [3]. В данном режиме 0 выхода

Таблица 2. Характеристики выбранного контроллера

Название характеристики	Значение параметра
Количество разрядов АЦП	16
Ошибка смещения АЦП	100 мкВ
Ошибка усиления АЦП	3 %
Напряжение питания	3,3 В
Максимальная частота преобразования	50 кГц
Максимальная тактовая частота	72 МГц
Объём ПЗУ	256 <u>кБайт</u>
Объём ОЗУ	32 <u>кБайт</u>
Количество разрядов ЦАП	12
Наличие аппаратного UART	есть
Количество портов ввода-вывода	38

соответствует половине опорного напряжения на входе АЦП, 0В = -32 768 отсчетов, а $U_{\text{опорное}} = 32\,768$ отсчетов.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: характеристики МК удовлетворяют поставленной задаче, и его использование позволяет создать систему управления с заданным функционалом, поэтому разработка принципиальной схемы устройства будет основываться на требованиях к данному МК и его возможностях.

Создание принципиальной схемы устройства управления

Для того чтобы создать принципиальную схему устройства согласно структуре разрабатываемой системы, было определено несколько ключевых точек, относительно которых будет выбрана элементная база установки:

1. Возможность использования однополярного питания для упрощения схемотехнических решений.
2. Применение совместимых по напряжению питания электронных радиоэлементов.
3. Использование малощумящих ЭРЭ для улучшения соотношения сигнал/шум чувствительного измерительного блока.
4. Использование распространенных и доступных ЭРЭ для возможности оперативного ремонта устройства в случае поломки.

После изучения рынка компонентов, анализа их технических характеристик и про-

верки их доступности для приобретения был определен перечень элементной базы для реализации принципиальной структуры устройства.

Для усиления показаний с тензодатчика применен инструментальный усилитель AD623ARZ от компании Analog Devices. Дифференциальные входы оснащаются RC-фильтрами с частотой среза 200кГц для уменьшения шума. Для управления коэффициентом усиления данной ИМС необходим задающий резистор, который в данной реализации сделан переменным прецизионным на основе многооборотного потенциометра номиналом 1 кОм.

Для буферизации выхода инструментального усилителя, а также усиления управляющего напряжения ЦАП применен сдвоенный операционный усилитель LMC6482AIMX с полным размахом [5] выходного напряжения от компании Texas Instruments. Согласование уровней понадобилось из-за различных рабочих напряжений инструментального усилителя и контроллера.

Для включения и смены направления двигателя, а также для включения нагревателя применено электромагнитное реле NRP05-C-05D с переключающимся выходом от компании NCR. Их управляющие катушки требуют напряжения 5 В и максимальный допустимый ток составляет 5 А.

В качестве гальванической развязки сигналов микропроцессора от силовой части

установки использованы оптопары 4N25 от компании Fairchild.

Управление электромагнитным реле осуществляется с помощью биполярных транзисторов BD139. Каждое реле имеет подключенный параллельно управляющей катушке диод в обратном направлении, предотвращающий электромагнитные выбросы напряжения катушки при ее выключении.

Для связи микроконтроллера с ПК применен преобразователь USB-UART FT232RL от компании FTDI.

Сборка и тестирование прототипа устройства управления

Прототип устройства собран на печатной макетной плате. Использование макетной платы позволяет вносить изменения в её топологию, менять расположение компонентов, подключать измерительные приборы и дополнительные модули при изменении схемотехники установки.

В первую очередь, настройка устройства состоит в калибровке измерительного модуля. При отсутствии нагрузки на тензодатчике с помощью ЦАП настраивают такое смещение напряжения выхода измерительного усилителя, при котором напряжение на АЦП будет приближено к половине опорного (нулевая точка). На втором этапе настройки, используя калибровочный груз, масса которого соответствует максимальному весу, воспринимаемому тензодатчиком без нарушения его работоспособности, и при помощи регулировки коэффициента усиления добиваются

напряжения на входе АЦП, близкого к опорному. Далее, сняв нагрузку с датчика, производят повторную корректировку нулевой точки АЦП. После калибровки тензодатчика следует определить поправочный коэффициент преобразования, позволяющий переводить числовые значения с АЦП в любую удобную единицу измерения.

Тестирование прототипа осуществляется на рабочих нагрузках.

Выводы

Модернизация существующей установки для измерения адгезии стала возможной благодаря разработке новой системы управления лабораторным стендом.

Применение микроконтроллера на базе архитектуры ARM позволило решить ряд технических задач:

1. Повысилась точность и качество измерений.
2. Упростилась схема наладки установки. При небольшой доработке калибровка стенда может производиться в полностью автоматическом режиме.
3. Произведено взаимодействие установки с ПК, что упростило методику проведения экспериментов, а также позволило автоматизировать процесс измерений.
4. Увеличена надежность установки.

Данная разработка может быть внедрена в любые лабораторные стенды подобного типа, что говорит о ее универсальности и возможности широкого применения.

Список литературы

1. RM0313 Reference manual STM32F37xxx Rev 5 June 2016.
2. AN4550 Application note "Getting started with STM32F373/378CC/RC/VC SDADC" Rev 1. July 2015.
3. AN4207 Application note "Getting started with STM32F37x/38x SDADC" Rev 1. December 2012.
4. LMC 6482 CMOS Dual Rail-to-Rail Input and Output Operational Amplifier Datasheet.
5. Глазунов В.А., Духов А.В., Шептунов С.А. и др. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине // Качество. Инновации. Образование. - № 2. - М., 2016. - С. 84-88.

References

1. RM0313 Reference manual STM32F37xxx Rev 5 June 2016.
2. AN4550 Application note "Getting started with STM32F373 / 378CC / RC / VC SDADC" Rev 1. July 2015.
3. AN4207 Application note "Getting started with STM32F37x / 38x SDADC" Rev 1. December 2012.
4. LMC 6482 CMOS Dual Rail-to-Rail Input and Output Operational Amplifier Datasheet.
5. Glazunov V.A., Dukhov A.V., Sheptunov S.A. and other. Manipulation mechanisms of parallel structure and some of their applications in medicine // Quality. Innovation. Education. - № 2. - M., 2016. - P. 84-88.