

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, С. Н. МАТВИЕНКО, А. М. ВУЙЦИК,
А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
24.05 2006 г.

Оппонент к. т. н. А. А. НИКОЛЕНКО
(ОНПУ, г. Одесса)

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИЯ–ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Система для измерения усилия–перемещения с цифровой обработкой сигнала осуществляет усиление, дискретизацию, усреднение сигнала и передачу данных на персональный компьютер.

В последнее время значительно расширилась номенклатура и область использования приборов сенсорной электроники, а также повысилась их точность измерения. Этому способствовало развитие элементной базы электронной аппаратуры, предназначение которой — обработка информации, которая поступает с первичных преобразователей — сенсоров [1]. В то же время номенклатура, габаритные размеры и точность измерения сенсоров прогрессируют медленней. В этой связи постоянно возрастает потребность в высокочувствительных быстродействующих многофункциональных сенсорах, работоспособных в сложных условиях эксплуатации — в расширенном температурном интервале, в частности при криогенных температурах, в сильных магнитных полях, а также в условиях циклических, ударных и вибрационных нагрузок [2].

Существенным достижением в сфере сенсорной техники был переход от аналоговых измерений к цифровым, вследствие чего исчезает потребность в сложных аналоговых схемах, которые являются непросмыми в наладке.

Целью настоящей работы является создание универсальной измерительной системы, которая сопряжена с компьютером и дает возможность снимать зависимости одного электрического сигнала от другого или независимые сигналы с различных первичных источников (сенсоров). В частности, данная система должна удовлетворять требованиям исследований механики разрушений легких и сверхтвердых бетонов. Основной особенностью таких измерений является наличие сильных вибраций и электромагнитных помех при работе оборудования. Поэтому система должна удовлетворять требованиям электромагнитной помехоустойчивости и измерять полезные сигналы при наличии значительных шумов.

В данной измерительной системе использовано основное преимущество цифровой техники в процессе обработки данных — это сравнительно простая реализация операций высокого уровня, которые тяжело осуществляются посредством аналоговых устройств.

К таким операциям относятся подавление шумов, усиление, цифровая фильтрация и нелинейная обработка сигнала. При этом функциональная нагрузка на чувствительный элемент сенсора уменьшается и снижаются требования к характеристикам элемента. Кроме того, благодаря цифровой обработке становится возможным измерение достаточно малых величин.

Основной особенностью измерительной системы усилия–перемещения является решение задачи прецизионного измерения полезного сигнала при наличии электромагнитных помех на основе возбуждения мостовой схемы сенсора усилия прямоугольными импульсами и детектировании их с помощью синхронного детектора. Кроме того, использование инструментального усилителя дополнительно уменьшает уровень шумов на входе синхронного детектора.

Одной из составных частей измерительной системы является сенсор усилия на основе нитевидных кристаллов кремния, общий вид и конструкция которого изображены на рис. 1. Тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния отличаются от известных дискретных кремниевых тензорезисторов уникальными механическими свойствами, которые позволяют измерять статические и динамические деформации в широком амплитудном диапазоне и в диапазоне рабочих температур от криогенных до +450°C. Гибкая технология их изготовления отличается минимальными отходами полупроводникового материала.

Проведенные механические испытания разработанных кремниевых тензорезисторов показали, что они

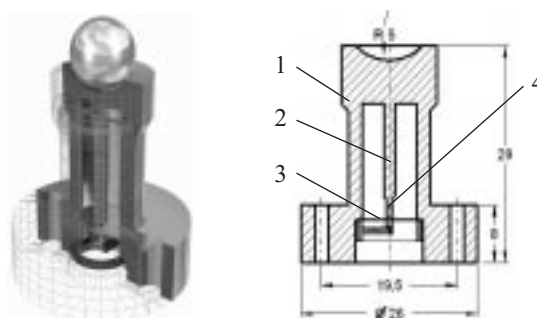


Рис. 1. Общий вид и элементы конструкции сенсора усилия:

1 — упругий элемент; 2 — шток; 3 — тензомодуль; 4 — консольная балка

выдерживают более чем 10^7 циклов нагрузки-разгрузки при уровне деформации не менее $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. без поломок и образования трещин. Тензорезисторы на основе НК кремния выдерживают деформации растяжения-сжатия $\epsilon = \pm 5 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (0,5%), а тензорезисторы с НК толщиной 10 мкм выдерживают деформации до 1%. Они работоспособны при воздействии больших центробежных ускорений, хорошо переносят перегрузки, вибрации, ударные ускорения, и т. п.

Тензорезисторы на основе НК кремния *p*-типа с концентрацией бора $(1 \dots 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ имеют наиболее оптимальные характеристики в диапазоне температур $+20 \dots +450^\circ\text{C}$. При 20°C их коэффициент тензочувствительности равен $K=100 \dots 140$, а температурный коэффициент сопротивления (ТКС) равен $(0,08 \dots 0,12)\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ [3, 4].

Элементы конструкции датчика усилия были рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить оптимальный рабочий диапазон деформаций тензорезисторов. Усилие воспринимается цилиндрическим упругим элементом 1, что превращает прилагаемое усилие в перемещение, которое посредством штока 2 передается на тензомодуль 3. Основу тензомодуля составляет консольная балка 4 с закрепленными на ней кремниевыми тензорезисторами. Для получения двух знаков деформации (растяжения и сжатия) тензорезисторы закреплялись на верхней и нижней сторонах балки.

Выходные характеристики разработанного сенсора усилия на основе нитевидных полупроводниковых микрокристаллов кремния изображены на **рис. 2**.

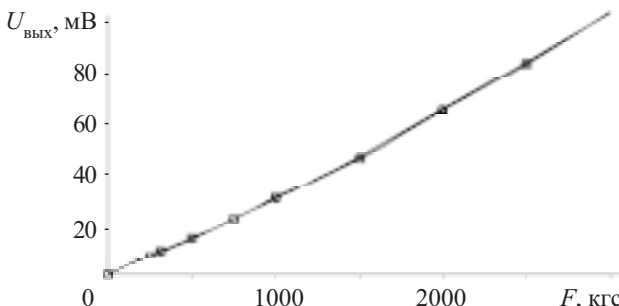


Рис. 2. Выходные характеристики сенсора усилия

Устройство (**рис. 3**) обеспечивает одновременное измерение дифференциального напряжения с полумостовой схемы включения тензорезисторов на основе нитевидных кристаллов кремния и напряжения с другого источника сигнала (в нашем случае сенсора усилия и перемещения — индуктивного сенсора). Это устройство осуществляет усиление, дискретизацию входного сигнала, усреднение сигнала с помощью нерекурсивного усредняющего цифрового фильтра 8-го порядка и передачу данных на персональный компьютер через интерфейс RS232.

Интерфейсная плата исполнена как отдельный блок, где используется микроконтроллер, который соединяется с персональным компьютером и имеет встроенные цифровые и аналоговые блоки. Питание схемы осуществляется от отдельного блока, который обеспечивает постоянное напряжение в диапазоне 7—15 В.

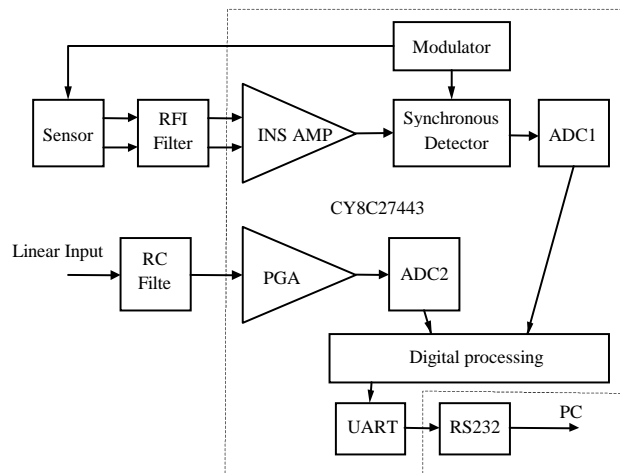


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы: RFI Filter — фильтр промышленных шумов; INS AMP — дифференциальный усилитель; Synchronous detector — синхронный детектор; Modulator — модулятор; ADC1 и ADC2 — 1-й и 2-й АЦП (сдвоенный АЦП); Digital processing — блок цифровой обработки сигнала; UART — модуль асинхронного передатчика; RS232 — блок согласования TTL-уровней с уровнями RS232

Интерфейсная плата практически полностью реализована на микроконтроллере фирмы CYPRESS типа CY8C27443 [5], что изображено на **рис. 4**. Сенсор усилия подключается к системе посредством разъема J1 типа PS/2, на который подается импульсное напряжение прямоугольной формы с частотой 4166,6 Гц и амплитудой 5 В, что необходимо для питания мостовой схемы сенсора усилия при реализации синхронной детектирования. Частота импульсов задается с помощью встроенного в микроконтроллер U1 делителя частоты. Использование такой схемы питания тензорезистивного моста позволяет уменьшить суммарное тепловыделение по сравнению с обычными методами подачи питания. Соответственно мы можем, таким образом, повысить чувствительность моста путем увеличения амплитуды питающих импульсов.

На входе измерительной системы включен фильтр промышленных шумов (RFI-фильтр), который состоит из резисторов R2, R5 и конденсаторов C1, C3 и C5 [6]. Дифференциальный сигнал с RFI-фильтра подается на вход встроенного в микроконтроллер U1 инструментального усилителя и после усиления детектируется с помощью синхронного детектора, который тоже реализован в микроконтроллере (см. **рис. 3**). Сигнал из индуктивного датчика перемещения подается с помощью разъема J4 на линейный вход измерительной системы, который является универсальным и может измерять сигналы низкой частоты от любого источника сигнала в рабочем диапазоне входа, который приведен в **таблице**. Через RC-фильтр низкой частоты измерительный сигнал поступает на вход встроенного усилителя. Усиленные сигналы из дифференциального и линейного входов поступают на входы сдвоенного инкрементального АЦП для их дискретизации. Дискретизированные измерительные сигналы с помощью UART передаются на ПК.

Измерительная система гальванически развязана с ПК с помощью оптопары U2.

СЕНСОЭЛЕКТРОНИКА

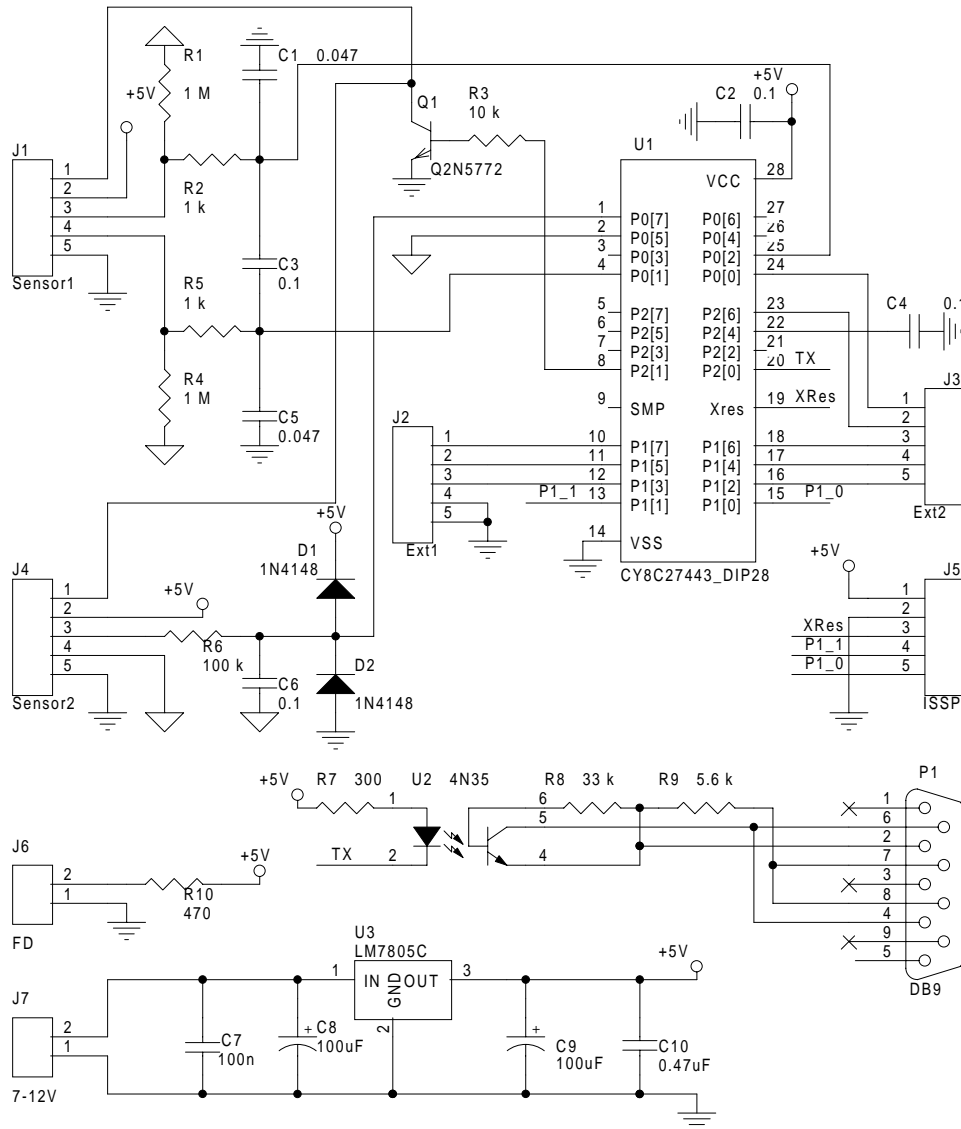


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная измерительной системы

Технические характеристики измерительной системы

Параметр	Значение	Примечание
Напряжение питания устройства	7...15 В	
Потребляемый ток	<70 мА	С подсоединенным сенсором
Максимальное входное напряжение дифференциального входа	±40 мВ	Напряжение на дифференциальном входе должно быть модулируемым с частотой 4166,6 Гц
Коэффициент усиления по дифференциальному входу	300	
Погрешность усиления по дифференциальному входу	не хуже 2%	
Разрядность АЦП дифференциального входа	13 бит	
Частота дискретизации АЦП дифференциального входа	10 с ⁻¹	
Максимальное входное напряжение линейного входа	±30 мВ	Линейный вход имеет защиту от перегрузок
Коэффициент усиления по линейному входу	16	
Погрешность усиления по линейному входу	не хуже 1,5%	
Разрядность АЦП линейного входа	13 бит	
Частота линейного входа	10 с ⁻¹	
Дифференциальная нелинейность функции превращения АЦП	2 LSB	Для обоих каналов
Погрешность смещения АЦП	9 мВ	Для обоих каналов
Диапазон частот измеряемых сигналов	0...5 Гц	Для обоих каналов
Скорость передачи данных на персональный компьютер	9600 бод	



Рис. 5. Общий вид основного окна программы обработки данных

Наличие всех необходимых блоков для усиления и превращения сигнала делает микроконтроллеры типа CYPRESS перспективными для использования в сенсорных устройствах.

Основные технические характеристики разработанной системы приведены в таблице.

Разработано программное обеспечение для персонального компьютера под операционную систему MS Windows, которое осуществляет дополнительную цифровую фильтрацию данных (при необходимости), отображение измерительных данных на дисплее путем построения графиков и записывания массивов данных в файл, что дает возможность дальнейшей компьютерной обработки полученных данных. Программа позволяет проводить коррекцию коэффициента усиления по двум каналам и устанавливать нуль, а также калибровать значения в нужных единицах измерения.

Программа обработки данных представляет собой исполнительный модуль с файлом конфигурации, позволяющим находить калибровочные коэффициенты Offset и Gain. Эти коэффициенты необходимы для калибрования устройства, и при каждом закрытии программы они автоматически сохраняются.

Калибрование устройства осуществляется в соответствии с формулой

$$U = \text{Gain} \cdot \text{ADC} + \text{Offset}, \quad (1)$$

где U — эталонное напряжение, ADC — код аналогово-цифрового преобразователя, который программно корректируется по формуле (1). Величины Offset и Gain можно легко определить из нескольких измерений.

На рис. 5 показан общий вид основного окна программы. Окно состоит из двух графиков — Signal #1 (сигнал по дифференциальному входу) и Signal #2 (сигнал по линейному входу). Значения измеряемой величины калибруются к нужным пользователю еди-

ницам измерения с помощью коэффициентов Offset и Gain, которые отображены на рис. 5 для каждого сигнала отдельно. Программа предусматривает возможность осуществления фильтрации данных с помощью цифровых нерекурсивных усредняющих фильтров восьмого порядка.

Измерительная система усиления–перемещения была апробирована при исследовании механики разрушений легких и сверхтвердых бетонов. Проведение измерений до полного разрушения бетонных конструкций из различных материалов осуществлялось в диапазоне от 0 до 3 тс. Разработанная измерительная система усиления–перемещения позволила значительно повысить точность измерений, а также автоматизировать процесс исследования.

Заключение

На базе микроконтроллера CY8C27443 разработана система обработки информации с использованием тензорезистивных сенсоров на основе нитевидных кристаллов кремния, что позволило существенно повысить разрешающую способность сенсоров с одновременным уменьшением рассеиваемой мощности чувствительных элементов по сравнению с традиционными методами превращения сигнала. Описаны основные особенности сопряжения сенсоров с микроконтроллерами и современные подходы относительно разработок сенсоров с цифровой обработкой информации. Показана перспективность использования микроконтроллеров CYPRESS для обработки информации в сенсорных устройствах.

Измерительная система усиления–перемещения была апробирована при исследовании механики разрушений легких и сверхтвердых бетонов. Несмотря на конкретное предназначение устройства, система универсальна.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тайманов Р. Е., Сапожникова К. В. Проблемы создания нового поколения интеллектуальных датчиков // Датчики и системы.— 2004.— №11.— С. 50—58.
2. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Khoverko Y. Laser recrystallized SOI layers for sensor applications at cryogenic temperatures // In book: Progress in SOI structures and devices operating at extreme conditions.— Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 2002.— P. 233—237.
3. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors // Sensors and Actuators.— 1992.— Vol. A30.— P. 27—33.
4. Maryamova I., Lavitska E., Tykhan M. et al. Semiconductor mechanical sensors for adverse and dynamic conditions // Proceedings IMEKO World Congress. Finland.— 1997.— Vol. IX A.— P. 99—103.
5. <http://www.cypress.com>.
6. Вуйцик В., Голяка Р., Калита В. та ін. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв.— Львів: “Львівська політехніка”, 1999.