DOI: 10.17117/na.2015.10.03.043

Поступила (Received): 24.10.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.10.03.043.pdf>

Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К. Построение цифровых систем управления прецизионных пьезоэлектрических приводов

Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., Mansurova O.K.
**Construction of digital control systems of precision
piezoelectric actuators**

Анализ технических требований и основных проблем, возникающих при реализации прецизионных устройств линейных перемещений, показал, что решение задачи прецизионного позиционирования может быть выполнено только с использованием микроконтроллерных систем управления (МКСУ). В такой технике осуществляется программно-аппаратное управление с помощью программируемых микроконтроллеров, что дает возможность организовать гибкое управление пьезоактюатором и позволяет реализовать сложные законы управления путем соответствующего программирования МКСУ с компенсацией внешних возмущающих воздействий и нелинейностей, присущих устройствам данного типа. В статье рассматриваются различные варианты построения таких систем

Ключевые слова: пьезопровод, микроконтроллер, система управления

Analysis of technical requirements and the main problems encountered in the implementation of precision linear motion, showed that the solution of the problem of precision positioning can be performed only with the use of microcontroller control systems (MCCS). In this technique, through software and hardware control with programmable microcontroller, which gives the opportunity to organize flexible control of piezoelectric actuators and it allows you to implement complex control laws by appropriate programming MCCS with compensation of external disturbances and nonlinearities inherent in devices of this type. The article discusses the various options for building such systems

Key words: piezoelectric actuator, microcontroller, control system

Бойков Владимир Иванович

Кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики информационных
технологий, механики и оптики
г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Boikov Vladimir Ivanovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
St. Petersburg national research university of
information technologies, mechanics and optics,
information technologies, mechanics and optics
St. Petersburg, Kronverksky ave., 49

Быстров Сергей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики информационных
технологий, механики и оптики
г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Bystrov Sergey Vladimirovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
St. Petersburg national research university of
information technologies, mechanics and optics,
information technologies, mechanics and optics
St. Petersburg, Kronverksky ave., 49

Григорьев Валерий Владимирович

Доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики информационных
технологий, механики и оптики
г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Grigoriev Valeriy Vladimirovich

Doctor of Engineering Sciences, Professor
St. Petersburg national research university of
information technologies, mechanics and optics,
information technologies, mechanics and optics
St. Petersburg, Kronverksky ave., 49

Мансурова Ольга Карибековна

Кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет минерально-
сырьевых ресурсов «Горный»
г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21
линия, 2

Mansurova Olga Karibekovna

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
St. Petersburg National mineral resources university
St. Petersburg, Vasilevsky Island, 21 line, 2

Анализ технических требований и основных проблем, возникающих при реализации прецизионных устройств линейных перемещений, показал, что решение задачи прецизионного позиционирования может быть выполнено только с использованием микроконтроллерных систем управления (МКСУ). В такой технике осуществляется программно-аппаратное управление с помощью программируемых микроконтроллеров, что дает возможность организовать гибкое управление пьезоактюатором и позволяет реализовать сложные законы управления путем соответствующего программирования МКСУ с компенсацией внешних возмущающих воздействий и нелинейностей, присущих устройствам данного типа [1]. Возможность цифровой связи устройства управления с задающей ЭВМ верхнего уровня существенно повышает гибкость использования оборудования, расширяет область его применения.

Совершенствование современной элементной базы оптико-механических и фотоэлектрических приборов и систем направлено на повышение их статических, динамических и точностных характеристик, снижение массогабаритных показателей и улучшение эргономических характеристик. Аналоговое управление на сегодняшний день почти полностью себя исчерпало и представляет сдерживающий фактор развития в силу следующих недостатков:

- недостаточная стабильность параметров аналоговых устройств;
- сложность комплексного управления несколькими объектами;
- сложность серийного производства аналоговых систем управления;
- сложность реализации современных (например, адаптивных) законов управления.

Применение цифровых систем позволяет устранить основные недостатки аналоговых систем управления. Кроме того, им присущи такие неоспоримые преимущества как

- наличие унифицированной аппаратуры;
- отсутствие дрейфа параметров;
- высокое быстродействие;
- гибкость, легкость настройки параметров регуляторов, реорганизации структуры управления;
- возможность реализации сложных законов управления;

– возможность введения в закон управления режимов адаптации и обучения.

Указанные преимущества объясняют широкое внедрение микроконтроллерной техники в прецизионный пьезоэлектрический привод и системы на его основе. Важным является и то, что математическое описание и анализ большинства современных цифровых систем управления во многом базируется на методах анализа аналоговых систем.

Пьезоэлектрический привод с регулированием по положению

В связи с наличием большой номенклатуры микроконтроллеров от простейших PIC и AVR контроллеров до сравнительно сложных однокристальных микро-ЭВМ и сигнальных процессоров STM и TI, они находят применение как в системах с простой, так и с достаточно сложной архитектурой.

Применение цифровых средств, в сочетании с аналоговыми устройствами старого поколения, может усилить недостатки последних из-за сложности согласования усилительных устройств пьезопривода с микроконтроллерными устройствами. Для широкого использования пьезопривода в технических системах необходимо повышение энергетической эффективности высоковольтных электронных устройств управления, обеспечение их устойчивости и упрощение связи с микроконтроллерными устройствами. Все поставленные задачи решаются применением устройств управления пьезоактюаторами с выходными каскадами на высоковольтных транзисторах, работающих в ключевом режиме.

Рис. 1. Обобщенная функциональная схема цифрового пьезопривода
 (ЭВМ ВУ – вычислительная машина верхнего уровня; МК – управляющий микроконтроллер, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СП – силовой преобразователь, ПД – пьезодвигатель; ДП – датчик положения)

Импульсные устройства просты, экономичны, надежны, устойчивы к самовозбуждению, имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению с аналоговыми. Создаются серии драйверов для пьезоэлектрических исполнительных устройств, обеспечивающих наиболее оптимальные режимы для их работы и удобства согласования с управляющими микропроцессорными устройствами. На рис.1 показана обобщенная функциональная схема цифрового пьезоэлектрического привода, представляющего собой одноконтурную систему регулирования по положению. В ней можно выделить две части: цифро-

вую и аналоговую. В цифровую входят микроконтроллер (МК), устройства связи с микроконтроллером: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и вычислительная машина верхнего уровня (ЭВМ ВУ). Аналоговая часть включает в себя силовой преобразователь (СП), пьезоактюатор (ПА) и датчик положения (ДП).

ЭВМ ВУ служит для формирования сигнала задания и программирования МК. Связь между ЭВМ ВУ и МК организуется по стандартной линии связи (USB, RS-232, RS-485, Ethernet и др.).

МК формирует сигнал управления по заданному алгоритму, принимает и обрабатывает информацию от ДП и ЭВМ ВУ. В современных прецизионных электромеханических системах используют одноплатные и однокристальные микроконтроллеры, в частности, микроконверторы семейства MCS-51 – ADuC831 и 841 фирмы Analog Devices или контроллеры с ядром Cortex M3 или M4 фирмы ST Microelectronics, имеющие развитую периферию, необходимую для управления пьезоэлектрическими исполнительными устройствами. Чипы ADuC831 и ADuC841 отличается то, что ядро первого имеет максимальную тактовую частоту 16 МГц, в то время как ADuC841 способен работать на частоте до 16 МГц при напряжении 3 В и на частоте до 25 МГц при напряжении 5. Но особенно важно то, что они имеют встроенные достаточно стабильные и скоростные 12-разрядные ЦАП и АЦП. Подобные преобразователи содержат также и кристаллы STM Cortex M3 и M4, при этом обладая более развитой 32-битовой архитектурой.

АЦП и ЦАП – осуществляют аналого-цифровое преобразование и дискретизацию по времени с заданным периодом квантования, они могут представлять самостоятельные устройства или быть встроенными, как в случае с ADuC831 и ADuC841, что значительно повышает помехозащищенность и надежность работы всего устройства. Выбор периода квантования зависит от требований к динамическим свойствам привода в целом и быстродействия цифровой части в частности. Обычно в электромеханических системах период квантования составляет от десятых долей до единиц миллисекунд (0,1-5 мс), что предъявляет достаточно высокие требования к производительности МК.

СП – преобразует сигнал управления по форме и величине, необходимых для работы пьезоактюатора. В качестве СП могут быть использованы линейные усилители, специализированные драйверы, каскады высоковольтных транзисторов, работающих в ключевом режиме.

ДП – формирует сигнал обратной связи по положению. В современных системах для этих целей используются емкостные, индуктивные, тензорезистивные и оптико-электронные преобразователи.

ПА – как исполнительное устройство перемещает некоторый объект на заданную величину. Это может быть любое из ранее рассмотренных устройств.

Пьезоэлектрический привод с подчиненным регулированием

В ряде случаев весьма положительный результат в цифровом пьезоприводе дает применение принципа подчиненного регулирования. Рассмотрим пьезопривод с актюатором на многослойной керамике. На рис. 2 представлена его функциональная схема.

Рис. 2. Функциональная схема пьезопривода с подчиненным регулированием

Схема построена по принципу систем с обратной связью и содержит три контура регулирования. Самый быстрый контур – контур управления напряжением. Частота квантования сигналов (информации) в контуре составляет 5 кГц. Этот контур обеспечивает эффективную работу высоковольтного усилителя, включая режим энергосбережения. Следующим является контур управления током, протекающим через пьезоактюатор. Этот контур также является быстродействующим, частота квантования информации в нем составляет 5 кГц, однако контур тока является дополнительным к контуру управления напряжением. Основная задача контура тока – повысить быстродействие привода. Главная обратная связь образует контур регулирования перемещения исполнительного органа. Этот контур для большинства приложений может иметь частоту квантования информации, равную 1 КГц.

Контур регулирования перемещения определяет точностные показатели привода. В особо точных приложениях контур выполняется с очень низкой частотой квантования информации, равной 90 Гц. В контуре осуществляется сравнение величин заданного перемещения объекта и достигнутого. Регуляторы перемещения, тока и напряжения реализованы в виде программы работы микроконтроллера, учитывая это и конкретизируя другие устройства привода можно функциональную схему представить, как это показано на рис. 3.

Ядром привода может служить микроконтроллер STM32F407 фирмы ST Microelectronics. Требуемая величина микроперемещения задается дистанционно по цифровой линии связи RS-485 или по более скоростной -Ethernet. Согласование с линией выполнено на специальной микросхеме приемопередатчика с использованием внешних элементов гальванической развязки.

Управление пьезоактюатором осуществляется через высоковольтный усилитель. Величина напряжения, подаваемого на пьезоактюатор, контролируется датчиком напряжения. За счет этого в приводе добавлен режим подкачки заряда, повышающий КПД работы усилителя. Величина микроперемещения контролируется специальным емкостным датчиком, встроенным в конструктив пьезопривода.

Рис. 3. Функциональная схема привода на основе многослойной тонкопленочной керамики

Для преобразования величины емкости, пропорциональной величине микроперемещения, в цифровой код использована микросхема AD7745 фирмы Analog Devices [2]. Для улучшения динамических свойств электропривода используется дополнительная обратная связь по току пьезоактюатора.

Для реализации цифрового устройства управления пьезоактюатором целесообразно применить схему многоконтурного управления, включающую контуры управления по напряжению и току питания пьезоактюатора, а также контур главной обратной связи, работающий по перемещению объекта. Выбор такой схемы позволяет не только применить современные методы коррекции динамики привода, но и обеспечить прогрессивные способы формирования управляющего сигнала – способ управления зарядом на пьезоактюаторе и способ широтно-импульсного формирования управления [3].

В качестве вычислительного ядра устройства необходим микроконтроллер со встроенным высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем [4] и выходным широтно-импульсным преобразователем [5]. Аналого-цифровой преобразователь должен обеспечивать разрешение не менее 12 бит для обеспечения требуемого динамического диапазона работы измерительных средств. В качестве микроконтроллера могут быть использованы либо классические микроконвертеры ADuC841 (ADuC831) фирмы Analog Devices, либо современные кристаллы STM32F407 на базе вычислительного ядра Cortex M4.

Список используемых источников:

1. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Бушуев А.Б., Григорьев В.В. Патент на полезную модель № 87043 от 20.09. 2009 г. «Пьезоэлектрический привод».
2. Быстров С.В., Григорьев В.В. Выбор датчика для высокоточной микрометрической подвижки // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург: Импекс, 2013. № 5. С. 67-70.
3. Бойков В.И., Быстров С.В., Королёв А.Ю. Динамика пьезопривода с управлением от широтно-импульсного модулятора с тремя состояниями // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 81-85.
4. Бойков В.И., Быстров С.В., Волков И.С., Коровьяков А.Н. Экспериментальная оценка показателей аналогоцифровых преобразователей микроконтроллеров // Известия вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. №11. С. 73-76.

5. Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Королев А.Ю. Широтно-импульсное управление пьезоактюатором // Системный синтез и прикладная синергетика. 2013. Т. 3. С. 24-30.

© 2015, Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К.

Построение цифровых систем управления
прецизионных пьезоэлектрических приводов

© 2015, Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., Mansurova O.K.

Construction of digital control systems of precision
piezoelectric actuators