

6. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.

7. Пат. 2149396 РФ. Бакиров М. Б. Способ акустическо-эмиссионного определения момента возникновения начальной пластической деформации. 2000.

8. Качанов В. К., Карташов В. Г., Соколов И. В. Ультразвуковая помехоустойчивая дефектоскопия. М.: Издательский дом МЭИ. 2008.

9. Семашко Н. А., Шпорт В. И., Марьин Б. М., Пекарш А. И., Муравьев В. И., Евстигнеев А. И. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002.

10. Мерсон Д. Л. Применение метода акустической эмиссии в физическом материаловедении. В кн.: Перспективные материалы. Структура и методы исследования. ТГУ, МИСиС, 2006.

11. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Materials Research. 1992. V. 7. No. 6. P. 1564–1583.

12. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твёрдости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний.

13. Jonnson B., Hogmark S. Hardness measurements of thin films // Thin films. 1984. V. 114. No. 3. P. 257–269.

14. Федосов С. А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2004.

15. Матюнин В. М. Размерный эффект и его влияние на механические свойства материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 2. С. 64–68.

Дата принятия: 23.08.2016.

681.586 (075)

Совмещение функций измерения и управления в структуре многослойного пьезоэлектрического актюатора нано- и микроперемещений

В. А. БАРДИН, В. А. ВАСИЛЬЕВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: opto@bk.ru

Исследованы принципы создания прецизионных устройств позиционирования на основе пьезоэлектрического эффекта. Выделено перспективное научное направление в развитии пьезоактюаторов – создание саморегулируемых устройств, одновременно выполняющих функции исполнительного механизма (актюатора) и первичного измерительного преобразователя (датчика обратной связи). Разработана оригинальная структура алаптивного многослойного пьезоэлектрического актюатора нано- и микроперемещений. Приведена его структурная схема и показаны её достоинства.

Ключевые слова: пьезоэлектрический актюатор, саморегулируемый актюатор, многослойная структура, управление, нано- и микроперемещение, прецизионное позиционирование.

The principles of creation precision positioning devices which based on piezoelectric effect were studied. A promising scientific direction in the development of piezo actuators – self-sensing actuators, which simultaneously perform two functions: actuating mechanism (actuator) and the primary measuring transducer (sensor feedback), was selected. An original structure of the self-sensing multilayer piezoelectric actuator of nano- and micromovings is suggested. It was given a structural variant of the control circuit of the self-sensing multilayer piezoelectric actuator, in which the integrating scanning frequency converter used as the measuring transducer. The advantages of such a structural control scheme are shown.

Key words: piezoelectric actuator, self-sensing actuator, multilayer structure, control, nano- and micromoving, precision positioning.

Для позиционирования объектов с нано- и микрометровой точностью требуются различные датчики нано- и микроперемещений, с помощью которых получают сигнал обратной связи об ошибке позиционирования и корректируют управляющий сигнал, подаваемый на исполнительный механизм [1, 2]. В качестве первичных измерительных преобразователей нано- и микроперемещений применяют датчики тензо- и пьезорезистивного, ёмкостного, пьезоэлектрического, оптического (интерферометры, энкодеры) и других типов.

В качестве исполнительного механизма достаточно перспективно использование пьезоэлектрических актюаторов – пьезоактюаторов. Для обеспечения высокой точности и эффективности работы этих приборов необходимо корректировать управляющий сигнал в зависимости от отклонения реального перемещения относительно заданного. Расхождение реального и заданного перемещений без корректировки может составлять 5–15 %, что является проявлением свойств пьезоэлектрических материалов [3–7].

Схемы управления пьезоактюатором или пьезодвигателем подразделяются на схемы с разомкнутой и замкнутой цепями обратной связи. В схемах с разомкнутой цепью применяются вычислительные методы компенсации гистерезиса пьезоактюатора, основанные на различных математических моделях (Прейсака, Прандтл–Ишлинского, Максвелла) [8], а также схемы контроля его заряда [9]. Недостатком вычислительных методов является невысокая точность прогнозирования перемещения пьезоактюатора при воздействии внешних факторов, а слабой стороной метода компенсации гистерезиса пьезоактюатора – сложность схемотехнической реализации с учётом влияния помех. В схемах управления пьезоактюатором или пьезодвигателем с замкнутой цепью обратной связи используются внешние датчики перемещения [10, 11]. Однако такие технические решения усложняют конструкцию и увеличивают габаритные размеры пьезоактюатора или пьезодвигателя.

Перспективным направлением в развитии пьезоактюаторов и пьезодвигателей является создание саморегулируемых, т. е. самонастраивающихся адаптивных пьезоактюаторов (self-sensing actuators), одновременно выполняющих функции исполнительного механизма (актюатора) и датчика обратной связи [12]. Такие пьезоэлектрические актюаторы одновременно могут быть датчиками перемещения, вибраций, скорости и др. [13, 14.]. Некоторые исследователи к адаптивным пьезоактюаторам относят и системы управления с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором (ПИД-регулятором), основанные на математических моделях с цифровой обработкой сигнала [9, 13, 15].

Известные принципы построения саморегулируемых пьезоактюаторов и пьезодвигателей, как правило, имеют эксплуатационные ограничения и требуют сложных дорогостоящих управляющих схем и программной обработки. Поэтому актуальна разработка новых, более совершенных, недорогих пьезоактюаторов с улучшенными техническими характеристиками и массогабаритными показателями, уменьшенной трудоёмкостью изготовления и относительно простой конструкцией.

На рис. 1 показана схема подключения разработанного авторами многослойного пьезоэлектрического актюатора к управляющей и мостовой измерительной цепям. Данный прибор состоит из пьезокерамических секций с входными электродами $Vx.Э1$, $Vx.Э2$, предназначенными для подключения к источнику питания (электрическому напряжению $U_{упр}$), и выходными электродами $Вых.Э1$, $Вых.Э2$, присоединёнными к формирователю электрического сигнала, который включает в себя измерительный преобразователь ёмкостного типа и блок установки и саморегулирования управляющего напряжения.

Каждая пьезокерамическая секция – это пара механически скреплённых пьезоэлементов. На одной плоской поверхности грани пьезоэлементов выполнены по одному плоскому электроду, а на противоположной поверхности – по два. При этом пьезоэлементы установлены так, что два плоских электрода одного пьезоэлемента обращены к двум электродам другого и имеют электрическое соединение внутри пьезокерамической секции. То есть смежные электроды внутри секции соединены электрически и являются выходными измерительными электродами, подключёнными к измерительному преобразователю ёмкостного типа.

Измерительный преобразователь ёмкостного типа последовательно соединен с блоком установки и саморегулирования управляющего напряжения. На управляющий вход этого блока подаётся сигнал управления. При этом входными управляющими электродами пьезокерамической секции являются одиночный плоский электрод одного пьезоэлемента и такой же электрод другого пьезоэлемента, а именно $Vx.Э1$, $Vx.Э2$, расположенные снаружи подобной секции. Они подключены к выходу блока установки и саморегулирования управляющего напряжения. Выходные электроды формирователя электрического сигнала (выход блока установки и саморегулирования управляющего напряжения) для подачи электрического напряжения $U_{упр}$ присоединены к входным плоским электродам пьезокерамической секции, т. е. к паре пьезоэлементов со стороны их плоской поверхности.

В одной секции пьезоэлементы расположены так, что их измерительные плоские электроды совмещены и образуют электрическое соединение – $Вых.Э1$, $Вых.Э2$ (см. рис. 1). Управляющие плоские электроды двух соседних секций так же создают электрическое соединение – $Vx.Э2$. С помощью измерительных плоских электродов в каждой секции сформированы четыре конденсатора C_I , C_{II} , C_{III} , C_{IV} , последовательно соединённых через управляющие электроды. Ёмкость этих конденсаторов изменяется от расширения или сжатия пьезоэлементов при подаче напряжения $U_{упр}$ на их управляющие электроды. При использовании двух секций (см. рис. 1) измерительные плоские электроды первой секции, образующие первые четыре

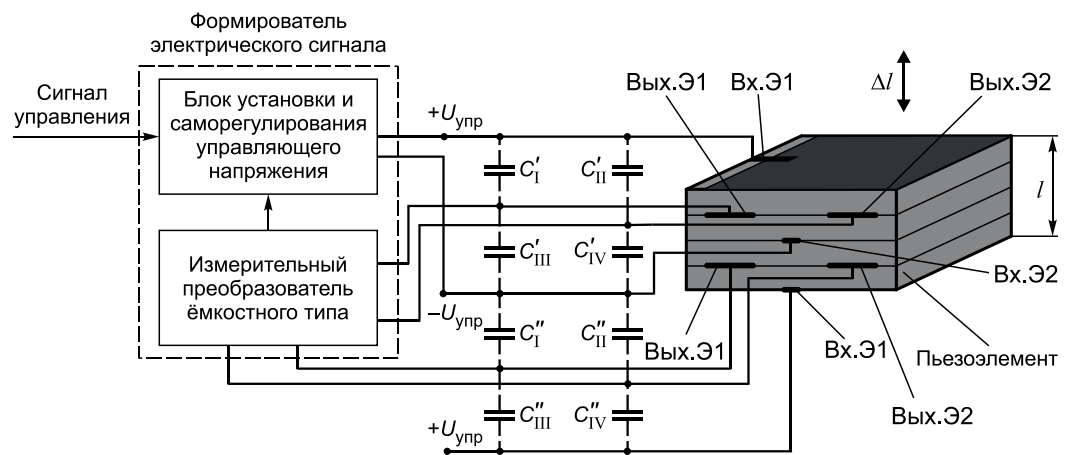


Рис. 1. Схема подключения саморегулируемого многослойного пьезоэлектрического актюатора: $Vx.Э1$, $Vx.Э2$ – входные электроды, предназначенные для подключения к источнику питания $U_{упр}$; $Вых.Э1$, $Вых.Э2$ – выходные электроды, присоединённые к формирователю электрического сигнала

конденсатора $C'_{I'}$, $C'_{II'}$, $C'_{III'}$, $C'_{IV'}$ подключены к одному плечу мостовой измерительной цепи, а измерительные плоские электроды второй секции, составляющие конденсаторы $C''_{I'}$, $C''_{II'}$, $C''_{III'}$, $C''_{IV'}$ – к противоположному плечу этой цепи. Управляющие плоские электроды пьезоэлементов имеют параллельное соединение, причём электроды одинаковой полярности выходят на поверхность пьезоактюатора с одной стороны, а противоположной полярности – с другой. Измерительные плоские электроды пьезоэлементов также соединены параллельно так, чтобы получились два одинаковых измерительных конденсатора.

Принцип действия саморегулируемого адаптивного многослойного пьезоактюатора основан на том, что при подаче к рабочим обкладкам пьезоактюатора управляющего напряжения он удлинится в этом же направлении на $\Delta h = d_{33} U_{упр}$, где d_{33} – пьезомодуль [4].

Соответственно изменяется и расстояние между электродами (обкладками) измерительных конденсаторов на поверхности пьезоактюатора, а также их ёмкость. Ёмкость C между двумя параллельными поверхностями пропорциональна площади области между поверхностями и обратно пропорциональна расстоянию между поверхностями, что следует из формулы плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / h, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная в вакууме; ε_r – относительная диэлектрическая постоянная диэлектрика; A – площадь области между поверхностями; h – расстояние между поверхностями.

Так как пьезокерамика является диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью, то электроды (обкладки) на противоположных сторонах пьезокерамических пластин образуют конденсаторы с достаточно большой ёмкостью – от единиц пикофарад до сотен нанофарад.

Диэлектрическая проницаемость пьезоматериала изменяется при его деформации. Зависимость диэлектрической проницаемости пьезопластины от её перемещения (деформации) носит линейный характер [16]. Для учёта особенностей разных видов пьезокерамики в формулу плоского конденсатора нужно ввести корректирующий коэффициент. Поэтому формулу (1) можно представить в следующем виде:

$$C = (1 + \Delta \varepsilon_r / \varepsilon_r) \varepsilon_0 \varepsilon_r A / (h + \Delta h), \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon_r / \varepsilon_r = k_\varepsilon \Delta h / h$ – относительное изменение диэлектрической проницаемости пьезокерамики; Δh – изменение расстояния между электродами плоских поверхностей пьезоэлемента; k_ε – корректирующий коэффициент, определяемый экспериментально для каждой партии пьезоактюаторов при приёмочных испытаниях

Проявлением свойств пьезоэлектрических материалов, влияющих на точность позиционирования пьезоактюаторов, являются гистерезис, ползучесть (сгееер) или последнее. Гистерезис в пьезоактюаторах проявляется в виде неоднозначной петлеобразной зависимости перемещения (рабочего органа пьезоэлектрического актюатора) от управляющего напряжения при его цикли-

ческом изменении. В пьезоэлектрических актюаторах гистерезис связан с нелинейностью обратного пьезоэлектрического эффекта. Реакция систем с гистерезисом зависит не только от текущего значения входного сигнала, но и от его значения в более ранние моменты времени. Ползучесть – запаздывание реакции (перемещения) на изменение управляющего напряжения.

Формула (2) позволяет вычислить ёмкость измерительного конденсатора, соответствующую перемещению пьезоактюатора. По изменению этой ёмкости можно определить реальное, а не заданное перемещение электропривода (без учёта гистерезиса, ползучести) и скорректировать управляющее напряжение. Если же перемещение невозможно контролировать, то необходимо учитывать гистерезис и ползучесть при указанном управляющем напряжении. Для этого используют модели Прейсака, Прандтль–Ишлинского, Максвелла и их модификации.

Саморегулируемый самонастраивающийся многослойный пьезоэлектрический актюатор может состоять из различного количества секций. В его многослойной структуре нано- и микроперемещений измерительные плоские электроды гальванически не связаны с управляющим высоковольтным напряжением. Достоинство такой структуры в том, что она позволяет подключать пьезоактюатор одновременно к высоковольтной управляющей и низковольтной измерительной цепям. В отличие от внешних ёмкостных датчиков в данной структуре практически отсутствует нелинейность, связанная с наклоном (угол между двумя параллельными пластинами) и прогибанием (глубина вогнутости или выпуклости) электродов пьезоэлементов.

Для перемещения пьезоэлектрического актюатора на требуемое расстояние блок установки и саморегулирования управляющего напряжения формирователя электрического сигнала в соответствии с заданным сигналом управления подаёт к управляющим плоским электродам (обкладкам) высоковольтный управляющий сигнал $U_{упр}$ (см. рис. 1). При этом пьезоэлементы деформируются, т. е. удлиняются или укорачиваются, пьезоактюатор перемещается и ёмкость конденсаторов, образованных измерительными плоскими электродами, изменяется. Полученная ёмкость с помощью измерительного преобразователя ёмкостного типа, состоящего, например, из мостовой измерительной цепи и частотного измерительного преобразователя, трансформируется в сигнал обратной связи. Этот сигнал поступает на корректирующий вход блока установки и саморегулирования управляющего напряжения, где определяется отклонение реального перемещения от заданного и производится соответствующая коррекция управляющего сигнала.

Вариант структурной схемы управления саморегулируемым адаптивным многослойным пьезоэлектрическим актюатором, в которой в качестве измерительного преобразователя ёмкостного типа использован частотный измерительный преобразователь, показан на рис. 2. Такой преобразователь представляет собой мостовую измерительную цепь с двумя рабочими плечами, образованными из конденсаторов пьезоэлектрического актюатора. Цепь подключена к частотному измерительному преобразователю, например частотному интегрирующему развёртывающему преобразователю [17]. Ёмкости пьезоактюатора посредством мостовой измерительной цепи преобразуются

в напряжение, подаваемое на вход интегратора. На выходе компаратора генерируется сигнал прямоугольной формы типа «меандр» с частотой, пропорциональной перемещению пьезоактюатора. Сигнал управления пьезоактюатором поступает на него от блока установки и саморегулирования управляющего напряжения, состоящего из блока задания частоты, элемента сравнения, блока регулирования управляющего напряжения, блока формирования управляющего напряжения и усилителя напряжения. Изменение ёмкостей измерительных конденсаторов C_I , C_{II} , C_{III} , C_{IV} пьезоактюатора приводит к разбалансу мостовой измерительной цепи, в которую они включены. Питание этой цепи осуществляется двухполярным напряжением типа «меандр» с выхода компаратора. Разбаланс мостовой измерительной цепи вызывает изменение частоты сигнала на выходе компаратора, который далее поступает на усилитель тока, а затем на оптопару, которая служит для гальванической развязки. С выхода оптопары частотный сигнал попадает на блок задания частоты и элемент сравнения. Там этот сигнал сравнивается с частотой сигнала, поступающего с блока задания частоты.

Блок задания частоты имеет два входа. На первый вход подаётся внешний аналоговый или кодовый сигнал управления. На второй вход с выхода оптопары поступает частотный сигнал, применяемый для установки начальной частоты выходного частотного сигнала блока задания частоты. Такая установка сигналов происходит при включении питания, или же может быть осуществлена при каждом возврате пьезоактюатора в исходное состояние – нулевую точку или точку начала отсчёта. Таким образом, по сигналу с выхода оптопары начинается корректировка управляющего сигнала на выходе блока задания частоты, а именно – подстройка частоты начального управляющего сигнала с выхода блока задания частоты под начальную частоту сигнала с выхода интегратора. При последующем изменении управляющего сигнала на блоке задания частоты сигнал с выхода оптопары не используется. Элемент сравнения выделяет разностный сигнал между управляющим сигналом от блока задания частоты и сигналом обратной связи, поступающим от оптопары.

Далее разностный сигнал с элемента сравнения подаётся на блок регулирования управляющего напряжения. На этот же блок поступает сигнал с блока задания частоты. В блоке регулирования управляющего напряжения сигнал управления корректируется на величину, пропорциональную сигналу от элемента сравнения. Далее, с блока регулирования управляющего напряжения скорректированный сигнал поступает на блок формирования управляющего напряжения, который формирует аналоговый сигнал, поступающий на пьезоактюатор через усилитель напряжения (выход блока установки и саморегу-

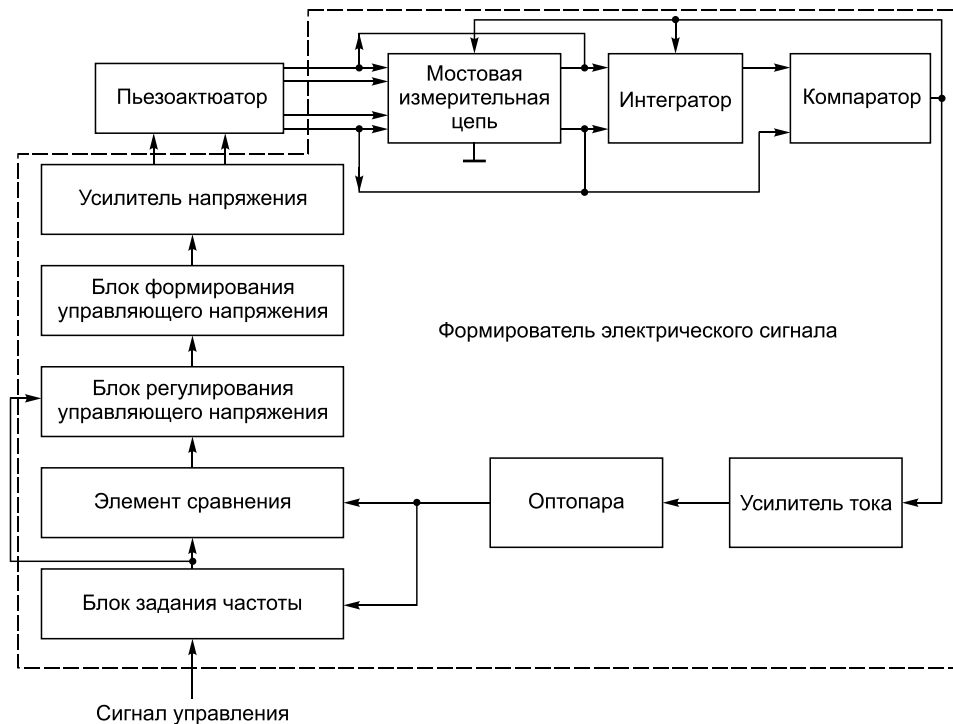


Рис. 2. Структурная схема управления саморегулируемым многослойным пьезоэлектрическим актюатором

лирования управляющего напряжения формирователя электрического сигнала).

В результате в саморегулируемом многослойном пьезоэлектрическом актюаторе нелинейность зависимости его перемещения от управляющего напряжения, возникающая из-за гистерезиса, ползучести и последействия, устраняется путём коррекции частотного сигнала, поступающего на блок регулирования управляющего напряжения. Данная нелинейность устраняется на величину фактического отклонения частоты сигнала с выхода интегратора от частоты сигнала управления с блока задания частоты.

При практическом применении предложенной структуры саморегулируемого многослойного пьезоэлектрического актюатора может возникнуть проблема, связанная с изменением со временем свойств этих приборов. Существует два способа решения данной проблемы: периодически выполнять тестовый прогон от нуля до максимума, после чего сравнивать фактическое перемещение с заданным, или же определить зависимость изменения параметров пьезоактюатора от времени, т. е. провести его ускоренное старение и ввести корректирующий коэффициент в систему управления прибором.

При исследованиях характеристик устройства управления многослойным саморегулируемым пьезоэлектрическим актюатором был взят пакет из четырёх секций (восьми пьезоэлементов). Данный пакет состоял из пьезоэлементов в форме диска размерами 15×0,5 мм. (рис. 3). Пьезоэлементы были изготовлены из пьезокерамики ЦТС-19. Для подключения управляющего напряжения на одну сторону пьезоэлементов нанесли серебряные электроды, а на противоположную сторону – те же электроды, но в виде двух половинных сегментов, образующих два конденсатора, у которых диэлектриком является пьезокерамика.

На рис. 4 показана зависимость ёмкости от перемещения пьезопластины, толщиной 0,5 мм. Электрическая ёмкость измерительных конденсаторов в состоянии покоя, т. е. когда управляющее напряжение равно нулю, составляла 2431 пкФ, а при подаче напряжения в интервале -300...300 В изменялась в диапазоне 2423–2439 пкФ. При этом диапазон перемещения пьезоактюатора был $(1,70 \pm 0,85)$ мкм, что составляет 0,3 % толщины пьезопластины.

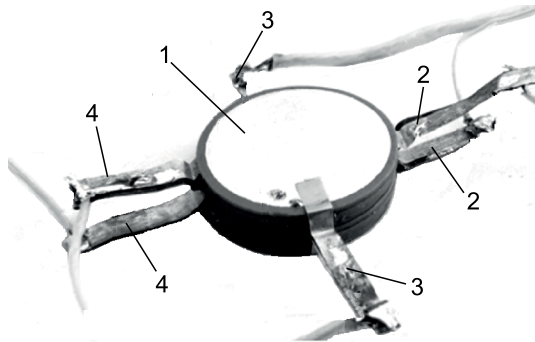


Рис. 3. Макетный образец разработанного четырёхсекционного саморегулируемого пьезоэлектрического актюатора:
1 – пьезоактюатор; 2, 4 – измерительные электроды;
3 – управляющие электроды

Следует отметить, что существуют многослойные пьезокерамические актюаторы со встроенными секциями для обратной связи, где используются отдельные встроенные секции (пьезопластины), позволяющие только косвенно (по перемещению и деформации) определять общее перемещение. Такое конструктивное решение значительно увеличивает габаритные размеры пьезоактюатора. Преимущество предложенной авторами структуры многослойного пакетного пьезоэлектрического актюатора заключается в том, что в данном приборе отсутствуют

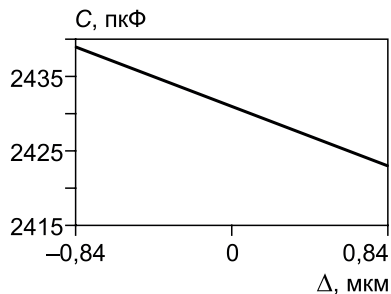


Рис. 4. Зависимость ёмкости измерительных конденсаторов от управляющего напряжения, подаваемого на пьезоактюатор

дополнительные измерительные пьезопластины, а для определения перемещения применяются те же рабочие пластины. При этом измеряется весь диапазон перемещения пьезоактюатора, а не только одной его секции.

Заключение. При использовании разработанной структуры

саморегулируемого самонастраивающегося адаптивного многослойного пьезоэлектрического актюатора не требуется отдельный датчик перемещения, так как для контроля перемещения или деформации прибора используется данный пьезоэлектрический актюатор. Таким образом, представленную многослойную структуру пьезоэлектрического актюатора одновременно можно применять для реализации функций измерения и управления.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (код проекта № 1267).

Литература

1. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. И. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: ИТМО, 2011.
2. Амельченко А. Г., Бардин В. А., Васильев В. А. Системы управления и элементы усиливающего пьезоэлектрического актюатора для прецизионного позиционирования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 3 (35). С. 106–119.
3. Mackeyville P. A. Piezoceramics Actuator: Principles and Applications. APC Int. Ltd, 2011.
4. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов на Дону: РГУ, 2008.
5. Roel J. E. Merry. Performance-driven control of nano-motion systems. Eindhoven University of Technology, 2009.
6. Henderson D. A. Novel piezo motor enables positive displacement micro fluidic pump. New Scale Technologies // NSTI Nanotech. 2007. P. 1–4.
7. Бардин В. А., Васильев В. А., Чернов П. С. Принципы построения и перспективы исследований пьезоактюаторов для нано- и микропозиционирования // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 1. С. 37–47.
8. Бардин В. А., Васильев В. А., Чернов П. С. Проблемы создания исполнительных механизмов и устройств для нано- и микроперемещений на основе пьезоэффекта // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 7. С. 6–12.
9. Yi K. A., Veillette R. J. A Charge Controller for Linear Operation of a Piezoelectric Stack Actuator // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. V. 13. No. 4.
10. Каталог. [Официальный сайт] <http://www.physikinstrumente.com> (дата обращения 20.08.2016 г.)
11. Каталог. [Официальный сайт] <http://www.cedrat-technologies.com>. (дата обращения 25.08.2016 г.)
12. Garnett E. Simmers J., Hodgkins J. R., Mascarenas D. D., Park G., Sohn, H. Improved piezoelectric self-sensing actuation // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2004. V. 15. P. 941–953.
13. Manning W. J., Plummer A. R., Levesley M. C. Vibration control of a flexible beam with integrated actuators and sensors. Smart Materials Structures. 2000. V. 9. P. 932–939.
14. Mahmood S. O. R., Moheimani K. Liu. Tracking Control of a Nanopositioner Using Complementary Sensor // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2009. V. 8. No. 1. P. 86.
15. Arnfinn A. E., Gravdahl J. T., Pettersen K. Y. Adaptive feed-forward hysteresis compensation for piezoelectric actuators // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 085001.
16. Kawamata A., Kadota Y., Hosaka H., Morita T. Self-Sensing Piezoelectric Actuator using Permittivity Detection // Ferroelectrics. 2008. V. 368. P. 194–201.
17. Бардин В. А., Васильев В. А., Громков Н. В. Частотные интегрирующие развёртывающие преобразователи и их применение для датчиков и актюаторов // Надёжность и качество: Тр. Междунар. симп. Пенза. 2015. Т. 2. С. 8–11.

Дата принятия: 26.10.2016.