

---

---

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАТИКИ

---

---

УДК 62.83

В. И. БОЙКОВ, С. В. БЫСТРОВ, В. В. ГРИГОРЬЕВ, Д. Е. ОБЕРТОВ

## ПЬЕЗОПРИВОД НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ

Рассматриваются проблемы создания математической модели пьезопривода на основе тонкопленочной многослойной пьезокерамики и способы оценки ее основных характеристик.

*Ключевые слова:* пьезоактюатор, математическая модель пьезопривода, параметры пьезокерамики.

**Введение.** С интенсивным развитием микроэлектроники и нанотехнологий возрастает актуальность создания высокоточных миниатюрных исполнительных устройств линейных микроперемещений. В полной мере названным требованиям удовлетворяют пьезоэлектрические исполнительные приводы. Такие устройства обладают уникальной совокупностью положительных свойств: высокая разрешающая способность, малые размеры, большие выходные усилия, широкий диапазон рабочих частот, отсутствие внешнего электромагнитного поля, широкий рабочий температурный диапазон, высокая надежность и даже возможность работы в вакууме. К числу новых отечественных разработок в этой области относятся многослойные тонкопленочные актюаторы производства фирмы „Элпа“.

**Свойства актюаторов.** Для изготовления новых многослойных (толщина слоя  $\cong 25$  мкм) актюаторов разработан специальный пьезокерамический материал ЦТС-46 с низкой температурой спекания. Кроме того, вместо дорогих электродных материалов (платина—палладий) используются относительно дешевые (палладий—серебро). Многослойные элементы имеют преимущества перед пакетными керамическими пластинами, обладая возможностью производить смещение при низких напряжениях, они компактны. Применение актюаторов, изготовленных из материала ЦТС-46, в качестве активных элементов пьезоэлектрических приводов позволит решить многие задачи в различных областях науки и техники.

Для более эффективного использования новых актюаторов необходимо их экспериментально и теоретически исследовать как элементы систем автоматического управления, а также провести математическое и физическое моделирование пьезопроводов на их основе. Для проведения экспериментальных исследований был создан специализированный измерительный комплекс [1, 2], позволяющий снимать статические и динамические характеристики как отдельных актюаторов, так и приводов и систем на их основе. Предварительные результаты экспериментальных исследований тонкопленочных актюаторов [3] позволили всесторонне объективно оценить их возможности, достоинства и недостатки. Полученные количественные характеристики позволяют скорректировать существующие математические модели пьезоэлектрических устройств для условий применения новых пьезоактивных элементов.

В настоящей работе предпринята попытка создать линейную модель пьезопривода на основе многослойного тонкопленочного пьезоактюатора.

**Математическое моделирование** проводилось на основе технических характеристик многослойного пьезоактюатора типа АПМ (см. таблицу).

Наименование	Обозначение	Величина
Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	$L \times h \times d$	$70 \times 7,4 \times 7,2$
Площадь сечения, м <sup>2</sup>	$S_0$	$53,28 \cdot 10^{-6}$
Емкость электрическая, мкФ	$C_0$	11,7
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\text{tg } \delta$	0,02
Пьезомодуль, Кл/Н	$d_{33}$	$450 \cdot 10^{-12}$
Модуль Юнга, Н/м <sup>2</sup>	$Y_{33}$	$10 \cdot 10^{10}$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	7800

На рис. 1 представлена базовая модель пьезоэлектрических исполнительных устройств пакетного типа [4]. Здесь  $U_{\text{вх}}$  — входное напряжение,  $K_{\text{п}}$  — коэффициент прямого пьезоэффекта,  $R_{\text{вх}}$  — выходное сопротивление усилителя,  $K_u$  — коэффициент усиления,  $p$  — оператор Лапласа,  $K_o$  — коэффициент обратного пьезоэффекта,  $F_c$  — статическое усилие, действующее на пьезоактюатор,  $F_y$  — сила упругости,  $F_d$  — динамическая сила,  $K_d$  — коэффициент внутреннего демпфирования,  $m_{\Sigma}$  — эффективная масса,  $V$  — линейная скорость перемещения,  $\Delta$  — линейное перемещение.

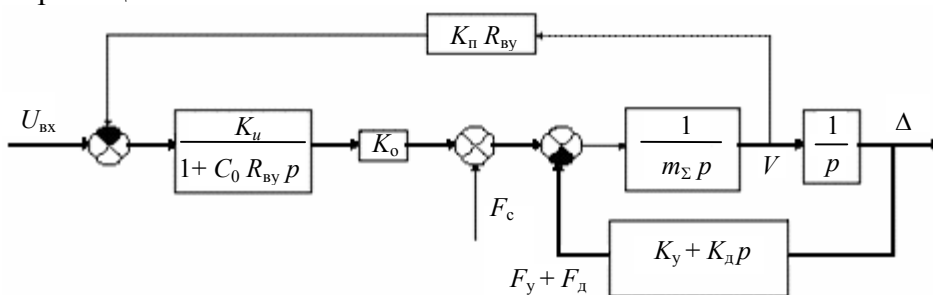


Рис. 1

Данная модель с высокой степенью достоверности отражает процессы, происходящие в пьезоэлектрическом устройстве пакетного типа. Отличие многослойного актюатора от последнего заключается лишь в большом количестве (до 1100) очень тонких (25 мкм) слоев, что, безусловно, нужно учесть при моделировании:

- жесткость, собственная частота, развиваемая сила многослойного актюатора могут быть рассчитаны как для сплошного пьезоэлемента с теми же геометрическими характеристиками;

- резонансная частота самого актюатора находится в диапазоне частот выше 10 кГц, что при полосе пропускания пьезоприводов в 100—200 Гц позволяет их не учитывать при моделировании;

- следует учитывать большую электрическую емкость актюатора, которая при выходном сопротивлении устройства управления в 100 Ом увеличивает электростатическую постоянную времени  $T_3$  до значений, существенно превышающих постоянную времени самого пьезодвигателя;

- обратным влиянием прямого пьезоэффекта можно пренебречь при организации специальных быстродействующих контуров регулирования управляющего поля;

- возможность пренебречь влиянием внутреннего демпфирования, т.е.  $K_d=0$ .

- в нашем случае объект не оказывает статического влияния на актюатор.

В результате можно получить модель пьезопривода на основе многослойного актюатора в виде, приведенном на рис. 2. Численные значения параметров модели привода определены с учетом характеристик актюатора (см. таблицу) и формул:

— для коэффициента упругости

$$K_y = \frac{S_0 Y_{33}}{L} = \frac{53,28 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{11}}{70 \cdot 10^{-3}} = 76,772 \cdot 10^6 \text{ Н/м},$$

— для коэффициента обратного пьезоэффекта

$$K_o = K_y \cdot d_{33} = 76,772 \cdot 10^6 \cdot 450 \cdot 10^{-12} = 38,386 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м},$$

— для эффективной массы

$$m_{\Sigma} = m_0 + 0,382m = 0,125 \text{ кг},$$

где  $m_0 = 0,114 \text{ кг}$  — масса присоединенных к актюатору элементов,  $m = S_0 l_0 \rho = 53,28 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 = 2,8842 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$  — масса самого пьезоэлемента,

— для электростатической постоянной времени

$$T_3 = C_0 R_{\text{вы}} = 0,0012 \text{ с}.$$

Коэффициент передачи устройства управления (усилителя)  $K_u = 140$ .

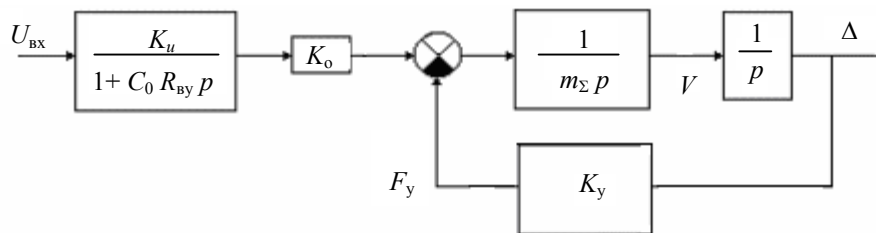


Рис. 2

Величину постоянной времени пьезопривода можно оценить по формуле:

$$T_M = \sqrt{\frac{m_{\Sigma}}{c_0}} = 0,000\,032 \text{ с},$$

где  $c_0$  — жесткость пьезоактюатора, определяемая из выражения

$$c_0 = \frac{S_0 c_{33}^D}{L} = 12,2 \cdot 10^7 \text{ Н/м},$$

$c_{33}^D$  — модуль упругости материала.

В результате моделирования в среде Simulink была получена переходная характеристика разомкнутого пьезопривода с многослойным пьезоактюатором (рис. 3), которая по своим показателям согласуется с результатами экспериментальных исследований.

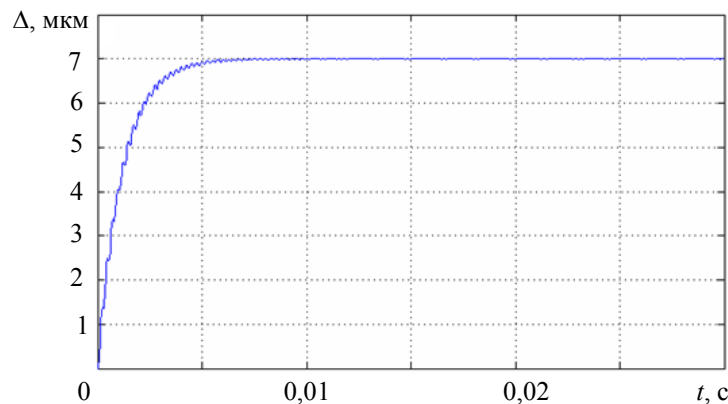


Рис. 3

Все исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-12085-офи, 09-08-00857-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Коровьяков А. Н. Комплекс для исследования адаптивного управления пьезоприводом // Сб. мат. 1-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. С. 308—313.
2. Пат. РФ № 76138. Устройство для испытания пьезоэлектрического привода и его элементов / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, А. Б. Бушуев, В. В. Григорьев. 2008.
3. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Разработка и исследование пьезопривода на основе многослойных тонкопленочных пьезоактюаторов // Сб. докл. 5-й Науч. конф. „Управление и информационные технологии“ (УИТ-2008). 2008. Т. 2. С.172—176.
4. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.

*Сведения об авторах*

- Владимир Иванович Бойков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: viboykov@mail.ru
- Сергей Владимирович Быстров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: sbystrov@mail.ru
- Валерий Владимирович Григорьев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: grigvv@yandex.ru
- Дмитрий Евгеньевич Обертон** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: dimondking@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
01.07.09 г.