

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Негушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Гиллемин Э.А. Синтез пассивных цепей. — М.: Связь, 1970.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, т. 1. — М.; Л.: Энергия, 1966.
4. Передельский Г.И., Диденко Ю.В., Афонин Е.Л. Частотно-независимые двухполюсники на основе четырехплечих мостовых цепей. — Электричество, 1998, № 1.
5. Передельский Г.И. О свойстве потенциально частотно-независимых двухполюсников. — Электричество, 2000, № 11.
6. Карандеев К.Б. Специальные методы электрических измерений. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

7. Передельский Г.И., Сатаров В.В. Определение эквивалентности двухполюсников на основе мостовых цепей с импульсным питанием. — Электричество, 1996, № 9.

[07.09.10]

Автор: Передельский Геннадий Иванович окончил в 1960 г. радиотехнический факультет Томского политехнического института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по теории мостовых цепей с питанием импульсами сложной формы для измерения параметров двухполюсников. Профессор кафедры электротехники, электроники и автоматики Юго-Западного государственного университета (Курск).

* * *

Исследование статических характеристик простых и многослойных пьезоактюаторов

АФОНИН С.М.

Определены механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при параллельном и кодовом управлении. Рассчитаны характеристики простых и многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах с параллельным и кодовым управлением.

Ключевые слова: пьезоактюаторы, нано- и микроперемещения, деформация, механические и регулировочные характеристики, параллельное и кодовое управление

Использование пьезоактюаторов (пьезодвигателей) для нано- и микроперемещений перспективно в нанотехнологии и нанобиологии, микроэлектронике и астрономии для прецизионного совмещения деталей, компенсации температурных и гравитационных деформаций. Расширение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается благодаря использованию многослойного (составного, пакетного, блочного) пьезоактюатора (ПА), который обеспечивает точность в диапазоне десятков микрометров и полосу пропускания частот порядка 100 Гц [1–3 и др.]. Такие ПА работают на основе обратного пьезоэффекта: перемещение достигается в результате деформации ПА при приложении внешнего электрического напряжения. В системе управления нано- и микрометрической деформацией многослойного ПА предъявляются жесткие требования к диапазону перемещений, жесткости и точности ПА нано- и микроперемещений. Актуальным является обеспечение точ-

The mechanical and adjustment characteristics of a multilayer motor for nano- and microdisplacements in the cases of using parallel and code control are determined. The characteristics of simple and multilayer piezomotors for nano- and microdisplacements are calculated for longitudinal and transverse piezoeffects in the cases of parallel and code control.

Key words: piezomotors, nano- and microdisplacements, deformation, mechanical and adjustment characteristics, parallel and code control

ности систем управления деформацией многослойного ПА нано- и микроперемещений при параллельном и кодовом управлении, для которого требуется определение соответствующих механических характеристик ПА. Применение многослойного ПА с кодовым управлением позволяет эффективно использовать электромеханическое цифроаналоговое преобразование для нано- и микроперемещений, пропорциональных управляющему коду.

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений обеспечивают пространственное прецизионное позиционирование объектов в нанотехнологическом оборудовании и микроэлектронике. Применяемые для приводов нано- и микроперемещений ПА характеризуются диапазоном перемещения от нескольких нанометров до десятков микрометров; чувствительностью менее 1 нм/В; нагрузочной способностью до 1000 Н; мощностью на выходном валу до 100 Вт; их полоса пропускания — порядка нескольких десятков герц; диапазон перемещений

– от единиц нанометров до десятков микрометров. Применение простых и многослойных ПА для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами позволяет решать задачи точного совмещения в микроэлектронике, нанотехнологии, астрономии и адаптивной оптике [5–7 и др.]. В отличие от простого многослойный пьезоактюатор с n пьезослоями имеет в статическом режиме без нагрузки увеличенный в n раз диапазон перемещения. Конструктивно многослойный ПА в зависимости от технологии изготовления может быть выполнен: в виде составного пьезопреобразователя из отдельных упруго поджатых пьезопластин; пакетного или блочного пьезопреобразователя из пьезопластин, спеченных с применением серебряной пасты; составного пьезопреобразователя из пьезопакетов с упругим армированием; склеенного многослойного пьезопреобразователя из пьезопластин; многослойного пьезопреобразователя со слоями, нанесенными по толстопленочной или тонкопленочной технологии.

Основным параметром внешней нагрузки ПА является её жесткость, т.е. отношение силы упругой реакции нагрузки к её деформации. В зависи-

мости от жесткости нагрузки выбирают конструктивные параметры простого ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах (рис. 1, *a* и *б*). Для практического использования многослойных ПА необходимо знать их основные характеристики: пьезомодули, упругие податливости, пределы временного сопротивления на сжатие. Статические характеристики ПА определяются с учетом уравнения обратного пьезоэффекта и механической нагрузки [4–6].

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики простых и многослойных ПА. В классическом электроприводе рассматриваются следующие статические характеристики двигателя в установившихся режимах работы: механические $\omega(M)$ и регулировочные $\omega(U)$, где ω – угловая скорость вала; M – момент нагрузки; U – управляющее напряжение. Аналогично для ПА нано- и микроперемещений статические характеристики вида $S(T)$ или $Dl(F)$ будем называть механическими характеристиками, где S – относительная деформация; T – механическое напряжение; Dl – относительное перемещение; F – внешняя сила, а характеристики вида $S(E)$ или $Dl(U)$ – регулировочными

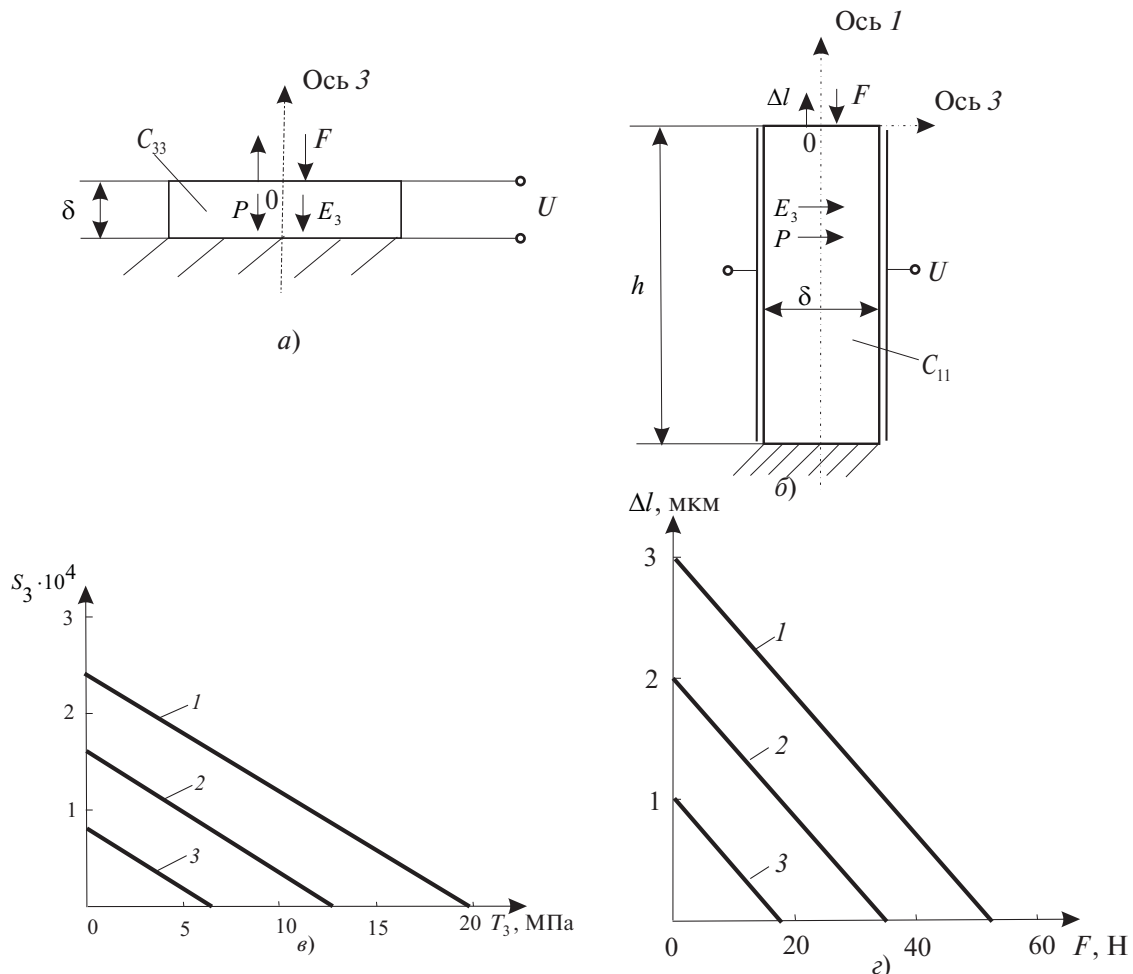


Рис. 1. Кинематические схемы при продольном (*a*) и поперечном (*б*) пьезоэффектах, его механические характеристики при продольном (*в*) и поперечном (*г*) пьезоэффектах

характеристиками, где E – напряженность электрического поля. Измерения проводились на прессе УММ-5 в диапазоне рабочих нагрузок при механических напряжениях в ПА до 50 МПа.

Статическая механическая характеристика ПА описывается уравнением обратного пьезоэффекта [4–6, 8] при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению:

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3, \quad (1)$$

где $S_3 = x/l$ – относительная деформация пьезоактюатора по оси 3 (см. рис. 1,а), где x – перемещение; $l = nd$ – длина многослойного ПА; n – число пьезопластин; d_{33} – пьезомодуль; $E_3 = U/d$ – напряженность электрического поля по оси 3 (U – напряжение на электродах ПА); $s_{33}^E = 1/E_{33u}$ – упругая податливость по оси 3 при $E = \text{const}$ и управлении от источника напряжения (E_{33u} – модуль Юнга пьезоэлектрической керамики при $E = \text{const}$); $T_3 = -F/S_0$ – механическое напряжение в ПА по оси 3 (F – внешняя сила; S_0 – площадь сечения ПД).

В статическом режиме максимальное перемещение $Dl_{3\text{max}}$ по оси 3 простого ПА при силе $F=0$ описывается зависимостью

$$Dl_{3\text{max}} = d_{33}U.$$

Соответственно максимальное рабочее усилие $F_{3\text{max}}$ по оси 3 простого ПА при $Dl=0$ определяется выражением

$$F_{3\text{max}} = Dl_{3\text{max}} S_0 / (s_{33}^E d) = d_{33}US_0 / (s_{33}^E d).$$

Рассмотрим простой ПА (пьезопластину) при продольном пьезоэффекте (см. рис. 1,а) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-4}$ м/В, напряжением питания $U = 300$ В, толщиной пьезопластины $d = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{33}^E = 1,25 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, радиусом $R_{\text{п}} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м, площадью сечения $S_0 = 1,77 \cdot 10^{-4}$ м². При таких данных $Dl_{3\text{max}} = 120$ нм, $F_{3\text{max}} = 2,83$ кН и статические механические характеристики $S_3(T_3)$ будут иметь вид, приведенный на рис. 1,в при значении E_3 , равном 60 (1), 400 (2), 200 кВ/м (3).

Из равенства (1) получаем уравнение статической механической характеристики простого ПА при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению в виде:

$$Dl = d_{33}U - s_{33}^E Fd / S_0 = d_{33}U - F / C_{33}$$

или

$$Dl = Dl_{3\text{max}} (1 - F / F_{3\text{max}}),$$

где d – толщина ПА; $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E d)$ – его жесткость.

Соответственно при $U = \text{const}$ получим уравнение механической характеристики $Dl(F)$, а при $F = \text{const}$ – уравнение регулировочной характеристики $Dl(U)$.

Статическая механическая характеристика ПА – уравнение обратного пьезоэффекта [4–6, 8] при поперечном пьезоэффекте с управлением по напряжению – имеет вид

$$S_1 = d_{31}E_3 + s_{11}^E T_1. \quad (2)$$

Для нахождения в статическом режиме максимального перемещения $Dl_{1\text{max}}$ по оси 1 (см. 1,з) простого ПА при $F=0$ воспользуемся зависимостью

$$Dl_{1\text{max}} = d_{31}Uh / d.$$

Максимальное рабочее усилие по оси 1 простого ПА при $Dl=0$ найдем из выражения

$$F_{1\text{max}} = d_{31}US_0 / (s_{11}^E d).$$

Рассмотрим простой ПА при поперечном пьезоэффекте (см. рис. 1,б), когда напряженность электрического поля направлена по оси 3, а деформация – по оси 1, с пьезомодулем $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м, напряжением питания $U = 300$ В, толщиной пьезопластины $d = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{11}^E = 1,15 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, высотой $h = 3 \cdot 10^{-2}$ м, шириной $b = 10^{-2}$ м; площадью сечения $S_0 = 6 \cdot 10^{-6}$ м². При таких данных имеем (см. рис. 1,з): $Dl_{1\text{max}} = 3$ мкм; $F_{1\text{max}} = 52$ Н и механические характеристики вида $Dl(F)$, приведенные на рис. 1,з при $U = 300$ (1), 200 (2), 100 В (3). Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 5%.

Из равенства (2) получаем уравнение статической механической характеристики простого ПА при поперечном пьезоэффекте с управлением по напряжению в виде:

$$Dl = d_{31}Uh / d - s_{11}^E Fh / S_0 = d_{31}Uh / d - F / C_{11}$$

или

$$Dl = Dl_{1\text{max}} (1 - F / F_{1\text{max}}),$$

где h – длина простого ПА (пьезопластины); $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E h)$ – его жесткость.

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных ПА с параллельным

управлением по напряжению при продольном и поперечном пьезоэффектах. Из диаграмм сжатия в области рабочих усилий для ПА разных конструктивных исполнений следует, что независимо от конструкции и вида управления многослойного ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах (рис. 2,а и б) для увеличения его жесткости необходимо предварительное поджатие с удельным давлением, превышающим механическое напряжение для выбора зазоров и смятия микронеровностей.

В статическом режиме максимальное перемещение по оси 3 многослойного ПА (рис. 2,а) при $F=0$ описывается зависимостью $Dl_{3\max} = d_{33}nU$, а его максимальное рабочее усилие по оси 3 при $Dl=0$ имеет вид:

$$F_{3\max} = Dl_{3\max} S_0 / (s_{33}^E l) = d_{33}US_0 / (s_{33}^E d).$$

Следовательно, из равенства (1) получаем уравнение статической механической характеристики многослойного ПА при продольном пьезоэффекте

с параллельным управлением по напряжению в виде:

$$Dl = d_{33}nU - s_{33}^E Fl / S_0 = d_{33}nU - F / C_{33} \quad (3)$$

или

$$Dl = Dl_{3\max} (1 - F / F_{3\max}),$$

где $F_{3\max} = d_{33}US_0 / (s_{33}^E d)$; $l = nd$ – длина многослойного ПА (n – число его пьезопластин); $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$ – жесткость ПА.

Таким образом, при $U = \text{const}$ имеем уравнение механической характеристики $Dl(F)$, а при $F = \text{const}$ – уравнение регулировочной характеристики $Dl(U)$ этого ПА.

Рассмотрим многослойный ПА, спеченный из пьезопластин, при продольном пьезоэффекте (см. рис. 2,а) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, напряжением питания $U = 300$ В, упругой податливо-

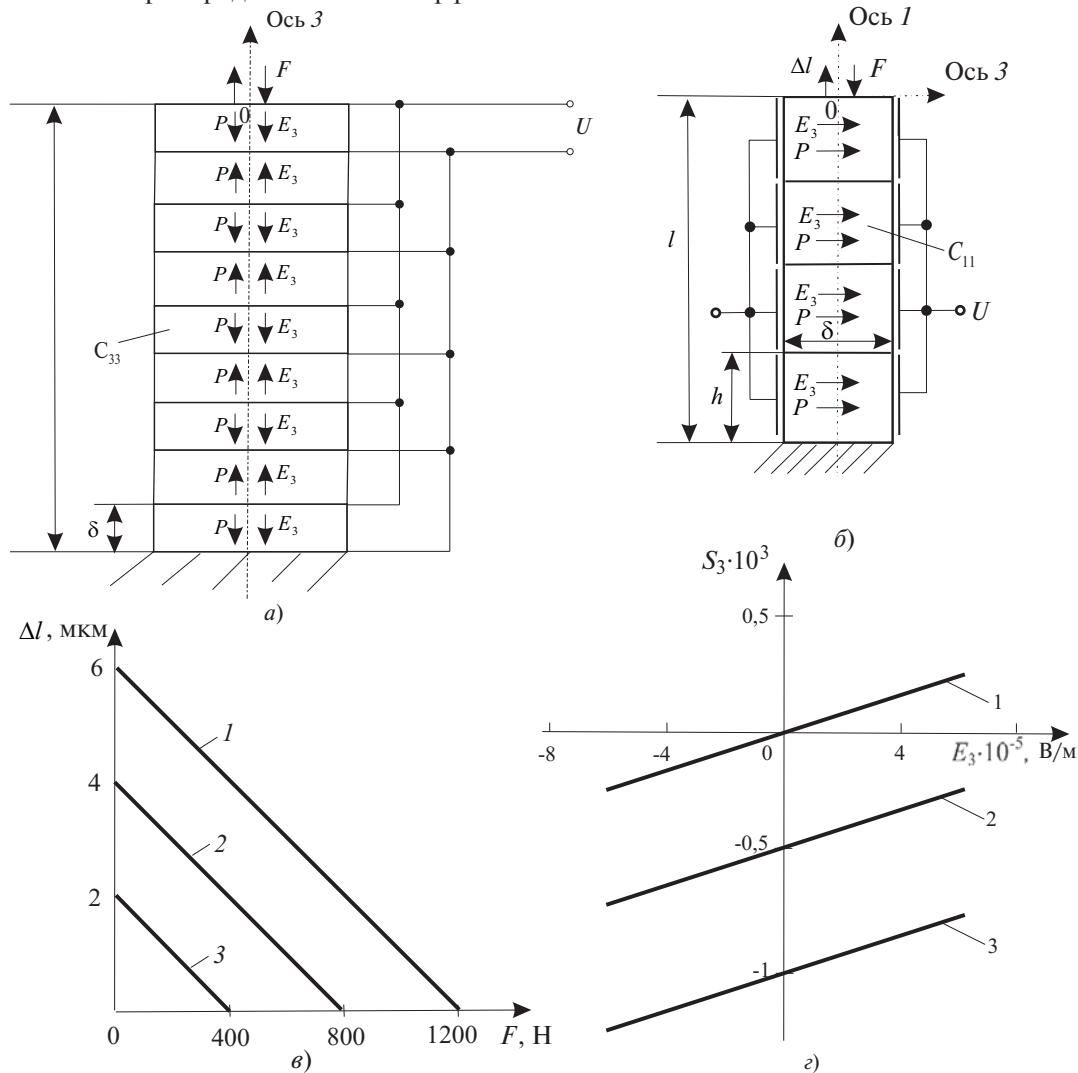


Рис. 2. Кинематические схемы многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений с параллельным управлением при продольном (а), поперечном (б) пьезоэффектах, его механические характеристики при продольном пьезоэффекте (в), регулировочные характеристики при продольном пьезоэффекте (г)

стью $s_{33}^E = 3 \times 10^{-11}$ м²/Н, толщиной пьезопластин $d = 0,6 \times 10^{-3}$ м, диаметром пьезопластин $D = 15 \times 10^{-3}$ м, числом пьезопластин $n = 50$ при параллельном управлении, когда пьезопластины механически соединены последовательно, а электрически – параллельно. Механическая характеристика 1 такого многослойного ПА соответствует характеристике 1 на рис. 2, в с $D/l_{3\max} = 6$ мкм, $F_{3\max} = 1,18$ кН.

Уравнение обратного пьезоэффекта при $T = \text{const}$ позволяет рассчитать регулировочные характеристики (рис. 2, з) многослойного ПА с параллельным управлением по напряжению при продольном пьезоэффекте, выполненного в виде составного пьезопреобразователя с пьезомодулем $d_{33} = 4 \times 10^{-10}$ м/В и упругой податливостью $s_{33}^E = 7,5 \times 10^{-11}$ м²/Н, составленного из восьми пьезопакетов П-3, при механических напряжениях T_3 ,

T_3 , равных 0 (1), 6,7 (2), 13,4 МПа (3). Погрешность расчетных характеристик многослойных ПА относительно экспериментальных составляет 5%.

В системе автоматического управления нано- и микроманипуляторами с цифроаналоговым преобразованием [6] используется многослойный секционный ПА при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением секциями. Многослойный ПА делится на N секций с числом n_k пьезопластин в k -й секции. Секции механически соединены последовательно и изолированы. Соответственно пьезопластины (пьезослой) в каждой секции соединены электрически параллельно, а механически – последовательно. Рассмотрим кодовое управление с электромеханическим ЦАП пьезоэлектрическими многослойными секционными ПА при продольном (рис. 3, а) и поперечном (рис. 3, б) пьезоэффектах, обеспечивающее нано- и микроперемещения, пропорциональные управляющему коду. Проведем мо-

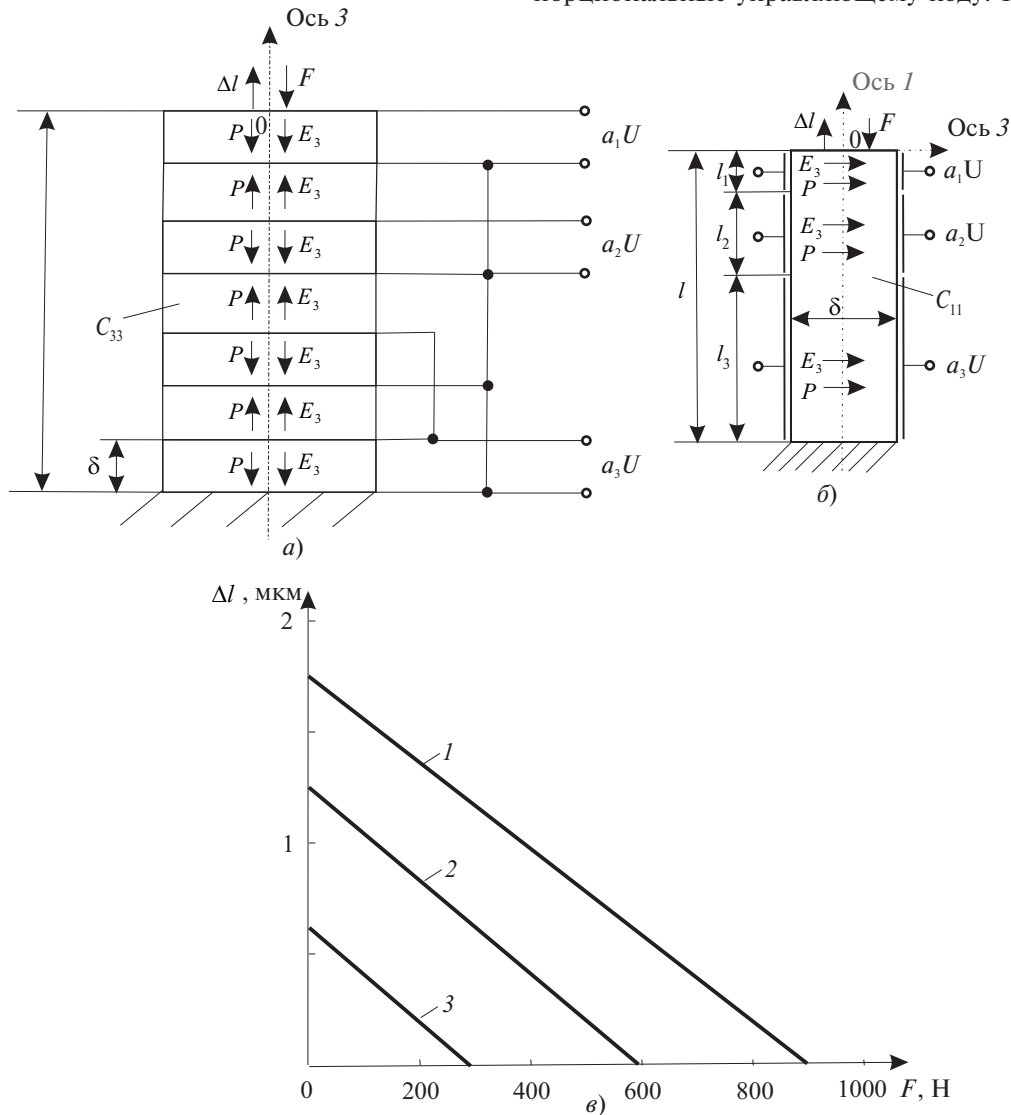


Рис. 3. Кинематические схемы многослойного секционного пьезоактуатора нано- и микроперемещений с кодовым управлением при продольном (а), поперечном (б) пьезоэффектах, его механические характеристики при продольном пьезоэффекте (в)

делирование статических и динамических характеристик многослойного секционного ПА как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами при малом сопротивлении $R \ll 0$.

При продольном пьезоэффекте получим: число пьезопластин в секции $n_k = 2^{k-1}$; длина k -й секции $l_k = 2^{k-1}d$, где $k = 1, 2, \dots, N$ (N — число секций).

Общая длина многослойного секционного ПА (рис. 3,а)

$$l = \sum_{k=1}^N l_k = (2^N - 1)d.$$

Максимальное перемещение многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте в статике имеет вид

$$Dl_{\max} = d_{33}(2^N - 1)U = d_{33}nU,$$

где $n = 2^N - 1$ — число пьезопластин в многослойном секционном ПА.

Соответствующее перемещение многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте в статике при подаче на вход двоичного кода

$$Dl = \sum_{k=1}^N a_k Dl_k,$$

где $a_k = 0; 1$ — разряды двоичного кода.

Следовательно, получим:

$$Dl = \sum_{k=1}^N a_k d_{33} 2^{k-1} U = d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}}.$$

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных ПА с кодовым управлением при продольном пьезоэффекте. В этом случае суммарная деформация многослойного ПА складывается из деформации отдельных секций пьезопластин при подаче на них напряжения и деформации всего многослойного ПА под воздействием внешней силы. Из равенства (3) получаем уравнение статической механической характеристики (рис. 3,б) многослойного ПА при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением по напряжению в виде

$$\begin{aligned} Dl &= d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}} - s_{33}^E Fl / S_0 = \\ &= d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}} - F / C_{33}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$, или в виде

$$Dl = Dl_{3\max} (1 - F / F_{3\max}),$$

$$\text{где } Dl_{3\max} = d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}};$$

$$F_{3\max} = d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}} S_0 / (s_{33}^E l)$$

$$\text{или } Dl_{3\max} = d_{33} n_s U; \quad F_{3\max} = d_{33} n_s U S_0 / (s_{33}^E l)$$

(здесь $n_s = \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}$ — число пьезослоев много-

слойного ПА, подключенных к источнику напряжения).

Механические характеристики (см. рис. 3,б) приведены для склеенного из 15 пьезопластин многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте с пьезомодулем $d_{33} = 4 \times 10^{-10}$ м/В, напряжением питания $U = 300$ В, упругой податливостью $s_{33}^E = 4 \times 10^{-11}$ м²/Н, с пьезопластинами толщиной $d = 0,6 \times 10^{-3}$ м, диаметром $D = 15 \times 10^{-3}$ м, с числом секций $N = 4$ с кодовым управлением при $a_1 = 1, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1$ (прямая 1); $a_1 = 0, a_2 = 1, a_3 = 0, a_4 = 1$ (прямая 2) и $a_1 = 1, a_2 = 0, a_3 = 1, a_4 = 0$ (прямая 3).

Из выражения (4) регулировочную характеристику — перемещение в статическом режиме многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте и упругой нагрузке — получим в виде

$$Dl = \frac{d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}}}{1 + (C_a + C_e) / C_{33}}.$$

Рассмотрим секционный ПА при поперечном пьезоэффекте; ПА выполняется в монолитном виде с отдельными секционными электродами или как многослойный секционный ПА с секциями длиной $l_k = 2^{k-1}l$, где $k = 1, 2, \dots, N$.

Соответственно регулировочная характеристика — перемещение в статическом режиме многослойного секционного ПА при поперечном пьезоэффекте и упругой нагрузке — представляется в виде

$$Dl = \frac{d_{31} l / d \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \frac{\ddot{U}}{\ddot{\vartheta}}}{1 + (C_a + C_e) / C_{11}}.$$

Полученные механические и регулировочные характеристики пьезоактюаторов при параллельном и кодовом управлении позволяют рассчитывать статические и динамические режимы работы простых и многослойных ПА в зависимости от

внешней нагрузки в нано- и микроманипуляторах и их физических и геометрических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копылов И.П.** Электромеханика – некоторые проблемы XXI века. – Изв. РАН. Энергетика, 2003, № 1.
2. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. – М.: Профессия, 2004.
3. **Ленк А.** Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. – М.: Мир, 1978.
4. **Афонин С.М.** Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений. – Приборы и системы управления, 1998, № 2.
5. **Афонин С.М.** О матричных уравнениях в задачах электроуругости // Электричество. 2006. № 3. С. 48–55.
6. **Афонин С.М.** Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений. – Электричество, 2009. № 9.
7. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004.
8. **Физическая акустика**, т. 1, ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований/Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966.

[25.06.12]

Автор: Афонин Сергей Михайлович окончил в 1976 г. факультет «Электронное машиностроение» Московского института электронной техники (МИЭТ). В 1982 г. в МИЭТ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование силовых пьезоэлектрических двигателей для прецизионных следящих систем». Доцент, старший научный сотрудник МИЭТ.