

* * *

Электричество, 2016, № 1 с. 49–55.

Исследование динамических характеристик многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений

АФОНИН С.М.

Статья посвящена анализу перемещения пьезоэлектрических преобразователей. Интерес к использованию пьезоэлектрических преобразователей в электротехнике возрастает по причине их возможного применения во всевозможных датчиках вибраций для детектирования и предотвращения аварийных ситуаций. Особенно это касается электротехнического и энергетического оборудования подстанций, генерирующих станций малой мощности и др. Для диагностики оборудования важно иметь представление о модели распространения волн как в самой среде, так и в датчике. Рассматривается модель пьезоэлектрического преобразователя с точки зрения усилия и формируемой ЭДС. Определены динамические характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений с параллельным и кодовым управлением. Получены передаточные функции многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах с параллельным и кодовым управлением.

Ключевые слова: многослойный пьезоактюатор, нано- и микроперемещения, деформация, динамические характеристики, параллельное и кодовое управление, передаточные функции

Применение пьезоактюаторов (пьезодвигателей, пьезопреобразователей) для нано- и микроперемещений перспективно в оборудовании нанотехнологии, нанобиологии, фотоники, энергетики, микроэлектроники и астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций. Увеличение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается использованием многослойного (составного, пакетного, блочного) пьезоактюатора (ПА), являющегося одним из наиболее перспективных электромагнитноупругих актюаторов нано- и микроперемещений, который обеспечивает нанометрическую точность в диапазоне десятков микрометров. В фотонике используются ПА для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при применении оптических методов передачи информации и энергии. Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений применяются для юстировки зеркал лазерных кольцевых

гироскопов, для совмещения и сканирования в электронных, зондовых, атомно-силовых микроскопах [1–9].

Актуальным является обеспечение высокой точности систем управления деформацией многослойного ПА нано- и микроперемещений при кодовом управлении. Применение многослойного ПА с кодовым управлением позволяет эффективно использовать электромеханическое цифроаналоговое преобразование для нано- и микроперемещений.

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений обеспечивают пространственное прецизионное позиционирование объектов в оборудовании нанотехнологии, микроэлектронике, фотонике. Применяемые для приводов нано- и микроперемещений ПА имеют: диапазон перемещения – от нескольких нанометров до сотен микрометров; чувствительность – менее 1 нм/В; нагрузочную способность – до 10000 Н; мощность на выходном валу – до 100 Вт;

полосу пропускания – порядка 100 герц; диапазон перемещений – от единиц нанометров до сотен микрометров.

Использование многослойных ПА для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами решает задачи точного совмещения [1–9]. В отличие от простого многослойный ПА имеет в статике без нагрузки увеличенный в n раз диапазон перемещения, что соответствует числу (n) пьезослоев ПА. 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 толсто- или тонкопленочной технологии.

Широкое применение многослойных ПА обусловлено одновременно большими значениями диапазона перемещений (до 200 мкм) и нагрузочной способности (до 10000 Н) по сравнению с простыми ПА (пьезопластинами). Для изготовления ПА используется пьезоэлектрическая керамика на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или PZT [1, 2 и 5]. Многослойные ПА производства ОАО ЭЛПА различного конструктивного исполнения обеспечивают следующие технические характеристики: многослойный пьезоэлектрический микроактюатор МПМА-1/90 – амплитуда перемещения 60 мкм, блокирующее усилие 1200 Н; многослойный пьезоактюатор АПМ-2-22 – амплитуда перемещения 44 мкм, блокирующее усилие 1200 Н; многослойный преобразователь МПП 6'6'40 – амплитуда перемещения 48 мкм, блокирующее усилие 1500 Н; армированный актюатор продольного типа ППУ-8 – амплитуда перемещения 40 мкм, усилие размыкания 2500 Н [4–6].

Так как предельные разрушающие механические напряжения сжатия в пьезокерамике промышленных марок ЦТС или PZT в среднем в 10 раз превышают предельные разрушающие напряжения растяжения, то для повышения прочности целесообразно предварительное поджатие многослойного ПА с помощью пружины или мембраны. Усилие предварительного поджатия должно превышать максимальную растягивающую нагрузку, что обеспечивает гарантированное рабочее сжатие многослойного ПА. При сборке многослойного ПА нано- и микроперемещений предварительно сжатый для выбора зазоров между пьезопластинами многослойный пьезопреобразователь стягивается предварительно деформированным упругим элементом (шпилька, пружина или мембрана) [7, 8].

Основным параметром внешней нагрузки ПА является её жесткость, т.е. отношение силы упругой реакции нагрузки к её деформации. В зависимости от жесткости нагрузки выбирают конструктивные параметры ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах. Для практического использования многослойных ПА необходимо знание их основных характеристик: пьезомодулей, упругих податливостей, пределов временного сопротивления на сжатие. Статические характеристики ПА определяются с учетом уравнения обратного пьезоэффекта и механической нагрузки [3, 7]. Пьезоактюатор нано- и микроперемещений работает на основе обратного пьезоэффекта: перемещение достигается в результате деформации ПА при приложении внешнего электрического напряжения.

В системе автоматического управления нано- и микроманипуляторами с цифроаналоговым преобразованием 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 (пьезослои) в каждой секции соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

Рассмотрим параллельное управление многослойных ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах и кодовое управление с электромеханическим цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) многослойными секционными ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах, обеспечивающее нано- и микроперемещения, пропорциональные управляющему коду.

Уравнение обратного продольного пьезоэффекта:

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

где $S_3 = x/l$ – относительная деформация ПА при продольном пьезоэффекте по оси 3, направление оси поляризации P является направлением оси 3, взаимно перпендикулярные оси 1 и 2 перпендикулярны оси 3; x – деформация (перемещение); $l = nd$ – длина многослойного ПА; n – число пьезослоев; d – толщина пьезослоя (пьезопластины); d_{33} – пьезомодуль при продольном пьезоэффекте; $E_3 = U/d$ – напряженность электрического поля в ПА; U – напряжение на электродах ПА; s_{33}^E – упругая податливость по оси 3 ПА при $E = \text{const}$; $T_3 = -F/S_0$ – механическое напряжение в ПА; $F = F_0 + C_a x + C_l x$ – внешняя сила; $F_0 = s_a S_0$ – сила первоначального поджатия упругим элементом; s_a – механическое напряжение первоначального ар-

мирования; S_0 – площадь ПА; C_a – жесткость армирующего элемента; C_l – жесткость нагрузки; $C_e = C_a + C_l$ – суммарная жесткость нагрузки.

Динамические характеристики многослойного ПА (рис. 1,а) можно рассчитать на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях. При расчете многослойного ПА используется волновое уравнение [3, 7], описывающее распространение волны с затуханием без искажений:

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{2a}{c^E} \frac{\partial x}{\partial t} + a^2 x = \frac{\partial^2 x}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $x(x,t)$ – смещение сечения ПА; x – координата; t – время; c^E – скорость звука при $E = \text{const}$; a – коэффициент затухания.

При одном закрепленном торце многослойного ПА, например при $x=0$, получим $x(x,t)=0$, а при упругоинерционной нагрузке на ПА при $x=l$ получим $x(l,t)=x(t)$ и с учетом граничных условий уравнение сил, действующих на другом его торце:

$$T_3(t)S_0|_{x=l} = -M \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} - C_e x(t). \quad (3)$$

Для многослойного ПА при продольном пьезоэффекте (рис. 1,а) из уравнения обратного пьезоэффекта (1) с учетом волнового уравнения (2) и действующих сил (3) на торец ПА при управлении по напряжению записываем выражение:

$$\frac{dX(x,p)}{dx} \Big|_{x=l} = d_{33}E_3(p) - \frac{s_{33}^E M p^2 X(p)}{S_0} - \frac{s_{33}^E C_e X(p)}{S_0}, \quad (4)$$

причем

$$X(x,p) = L\{x(x,t)\} = \int_0^\infty \dot{x}(x,t) e^{-pt} dt,$$

где $X(x,p)$ – преобразование Лапласа деформации (перемещения) ПА; p – параметр преобразования.

Учитывая, что один торец многослойного ПА жестко закреплен при $x=0$ и $X(0,p)=0$, получаем при $x=l$ выражения:

$$X(x,p) = \frac{X(p) \text{sh}(xg)}{\text{sh}(lg)}, \quad \frac{dX(x,p)}{dx} \Big|_{x=l} = \frac{X(p)g}{\text{th}(lg)}, \quad (5)$$

$$g = \frac{p}{c^E} + a,$$

где g – коэффициент распространения; c^E – скорость звука при $E = \text{const}$; a – коэффициент затухания. Следовательно, можно записать выражение, которое соответствует параметрической структурной схеме многослойного ПА, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте, па-

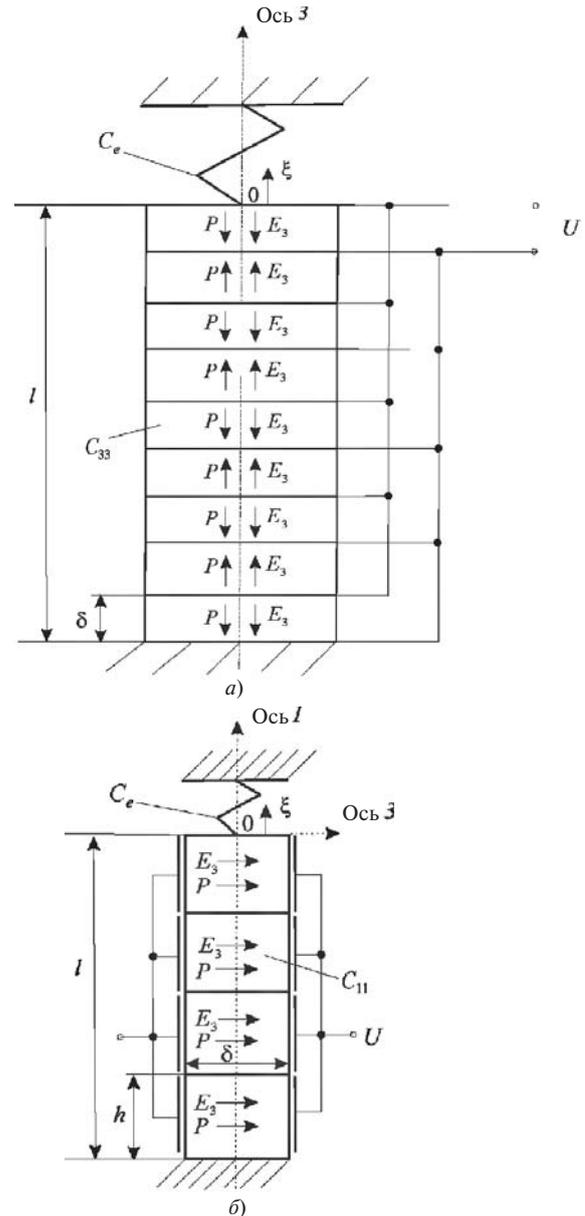


Рис. 1. Многослойный пьезоактюатор нано- и микро-перемещений с упругой нагрузкой при параллельном управлении и продольном (а) и поперечном (б) пьезоэффектах

раллельном управлении и упругоинерционной нагрузке:

$$\frac{X(p)g}{\text{th}(lg)} + \frac{X(p)s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{X(p)s_{33}^E C_e}{S_0} = d_{33}E_3. \quad (6)$$

Из (5) определяем передаточную функцию многослойного ПА в виде

$$W_1(p) = \frac{X(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{\frac{s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{g}{\text{th}(lg)} + \frac{s_{33}^E C_e}{S_0}}. \quad (7)$$

Из (7) получим передаточную функцию многослойного ПА при продольном пьезоэффекте, параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке как электромеханической системы с распределенными параметрами:

$$W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{Mp^2 / C_{33} + l \operatorname{cth}(lg) + C_e / C_{33}}, \quad (8)$$

где $X(p)$ – преобразование Лапласа перемещения торца многослойного ПА по оси 3; $U(p)$ – преобразование Лапласа напряжения на обкладках многослойного ПА при нулевых начальных условиях; $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$ – жесткость многослойного ПА при продольном пьезоэффекте.

Отсюда получим выражение для статического перемещения $D_l = x(\infty)$ армированного n -слойного ПА в установившемся режиме при подаче напряжения $U(t) = U_0 l(t)$ в случае упругоинерционной нагрузки:

$$\begin{aligned} x(\infty) &= \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pW(p) \frac{U_0}{p} = \\ &= \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ a \rightarrow 0}} \frac{d_{33}nU_0}{l(p/c^E + a) / \operatorname{th}[(p/c^E + a)l] + C_e / C_{33}} = \\ &= \frac{d_{33}nU_0}{1 + C_e / C_{33}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда можем записать передаточную функцию (7) многослойного ПА (см. рис. 1,а) после разложения в ряд гиперболического котангенса (учитываем два члена ряда) на рабочих частотах при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M$ (где m – масса многослойного ПА) в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01c^E l$ как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами:

$$W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{(1 + C_e / C_{33})(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}x_{33}p + 1)}, \quad (10)$$

где $T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33}}}$; $x_{33} = \frac{al^2 C_{33}}{3c^E \sqrt{M^* C_e + C_{33}}}$ – по-

стоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного ПА при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Соответственно, с учетом сопротивления R внешней цепи и емкости C_0 пьезопластины (пьезослоя) многослойного секционного ПА получим его передаточную функцию при продольном пьезоэффекте и параллельном управлении:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{X(p)}{U(p)} = \\ &= \frac{d_{33}n}{(1 + C_e / C_{33})(Rn C_0 p + 1)(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}x_{33}p + 1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично передаточная функция многослойного ПА (рис. 1,б) при поперечном пьезоэффекте, параллельном управлении и упругоинерционной

нагрузке при $m \ll M$ в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01c^E l$ как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами имеет вид

$$W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}l/d}{(1 + C_e / C_{11})(T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}x_{11}p + 1)}, \quad (12)$$

где d_{31} – пьезомодуль при поперечном пьезоэффекте; $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E l)$ – жесткость многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте; s_{11}^E – упругая податливость по оси 1 ПА при $E = \text{const}$;

$T_{11} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{11}}}$; $x_{11} = \frac{al^2 C_{11}}{3c^E \sqrt{C_e + C_{11}}}$ – постоянная

времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

В динамике переходная характеристика многослойного ПА при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке и подаче на его вход ступенчатого напряжения $U_0 \chi(t)$ имеет вид

$$x(t) = x_0 \left(1 - \frac{e^{-\frac{t}{T_{33(11)}}} \sin(\omega_{33(11)} t + j_{33(11)})}{\sqrt{1 - x_{33(11)}^2}} \right) \quad (13)$$

где $T_{33(11)} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33(11)}}}$;

$x_{33(11)} = \frac{al^2 C_{33(11)}}{3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33(11)})}}$; $\omega_{33(11)} = \frac{\sqrt{1 - x_{33(11)}^2}}{T_{33(11)}}$;

$j_{33(11)} = \arctg \frac{\sqrt{1 - x_{33(11)}^2}}{x_{33(11)}}$; x_0 – установившееся

значение перемещения многослойного ПА:

$$x_0 = \begin{cases} \frac{d_{33}nU_0}{1 + C_e / C_{33}} & \text{при продольном пьезоэффекте;} \\ \frac{d_{31}(l/d)U_0}{1 + C_e / C_{11}} & \text{при поперечном пьезоэффекте.} \end{cases}$$

Здесь индексы 33 и 11 относятся, соответственно, к параметрам многослойного ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах.

Следовательно, для многослойного ПА получаем полосу пропускания, которая ограничена его резонансной частотой

$$\omega_c = \sqrt{(C_e + C_{33(11)}) / M}. \quad (14)$$

Экспериментальная зависимость полосы пропускания многослойного ПА (рис. 2,а) от массы нагрузки M определена для образцов из пьезокерамики ЦТС: $n=50$, $d_{33}=4\cdot 10^{-10}$ м/В, $C_{33}=6\cdot 10^7$ Н/м, $C_e=6\cdot 10^6$ Н/м. Полоса пропускания многослойного ПА (рис. 2,б) в зависимости от суммарной жесткости нагрузки C_e экспериментально определена для ПА из пьезокерамики ЦТС: $n=50$, $d_{33}=4\cdot 10^{-10}$ м/В, $C_{33}=6\cdot 10^7$ Н/м, $M=15$ кг. Отклонение расчетных характеристик от экспериментальных не превышает 5%.

При рассмотрении многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением (рис. 3,а) как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами [9–11] передаточная функция (10) многослойного секционного ПА для упругоинерционной нагрузки при $m \ll M$ преобразуется к виду

$$W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{(1 + C_e/C_{33})(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}x_{33}p + 1)}, \quad (15)$$

где C_e – суммарная жесткость нагрузки; $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$ – жесткость многослойного секци-

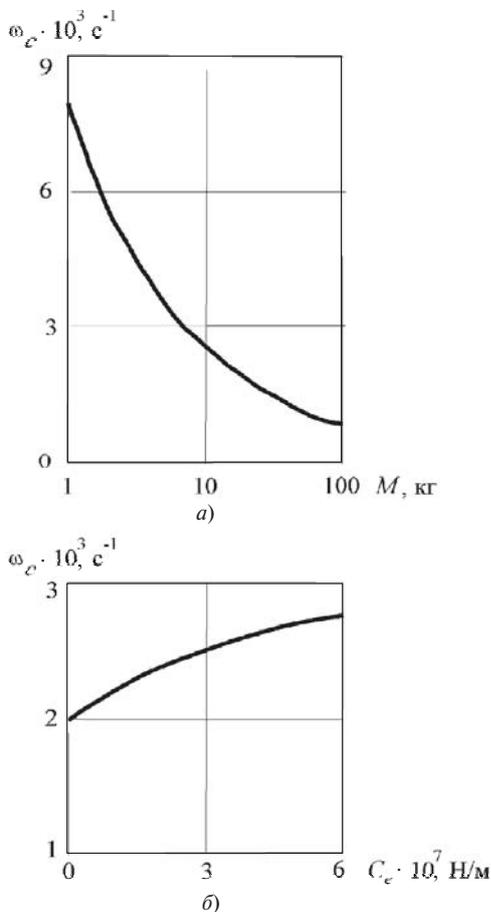


Рис. 2. Зависимость полосы пропускания многослойного пьезоактюатора: а – от массы нагрузки; б – от суммарной жесткости нагрузки

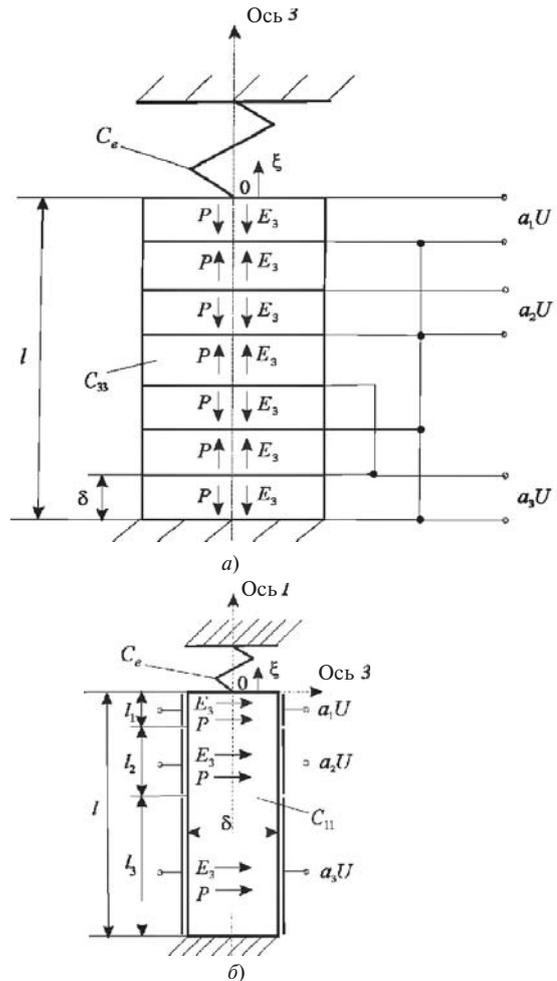


Рис. 3. Многослойный секционный пьезоактюатор нано- и микроперемещений с упругой нагрузкой при кодовом управлении и продольном (а) и поперечном (б) пьезоэффектах

онного ПА при продольном пьезоэффекте; $a_k = 0;1$ – разряды двоичного кода; k – номер секции; N – число секций.

С учетом (12) передаточная функция многослойного секционного ПА [9–11] при поперечном пьезоэффекте с кодовым управлением (рис. 3,б) записывается в виде

$$W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{d_{31} (l_1 / d) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{(1 + C_e/C_{11})(T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}x_{11}p + 1)}, \quad (16)$$

где $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E l)$ – жесткость многослойного секционного ПА при поперечном пьезоэффекте; l_1 – длина первой секции.

С учетом (15) и (16) в динамике переходную характеристику многослойного ПА с кодовым управлением при упругоинерционной нагрузке как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами при малом сопротивлении ($R \ll 0$) представим в виде

$$x(t) = k_c U_0 h(t) = x_0 h(t), \quad (17)$$

где $h(t)$ – нормированная переходная характеристика многослойного ПА; x_0 – установившееся значение его перемещения:

$$x_0 = \begin{cases} \frac{d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \ddot{U}_0}{1 + C_e/C_{33}} & \text{при продольном пьезоэффекте;} \\ \frac{d_{31} (l/d) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \ddot{U}_0}{1 + C_e/C_{11}} & \text{при поперечном пьезоэффекте.} \end{cases}$$

Нормированная переходная характеристика многослойного ПА

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{x_{33(11)} t}{T_{33(11)}}}}{\sqrt{1 - x_{33(11)}^2}} \sin(\omega_{33(11)} t + j_{33(11)}), \quad (18)$$

$$\text{где } T_{33(11)} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33(11)}}};$$

$$x_{33(11)} = \frac{a l^2 C_{33(11)}}{3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33(11)})}}; \quad \omega_{33(11)} = \frac{\sqrt{1 - x_{33(11)}^2}}{T_{33(11)}};$$

$$j_{33(11)} = \arctg \frac{\sum_{k=1}^N \sqrt{1 - x_{33(11)}^2} \frac{\ddot{U}_0}{\dot{e}}}{x_{33(11)} \frac{\ddot{U}_0}{\dot{e}}}$$

В зависимости от нагрузки многослойный ПА описывается как электромеханическая система с распределенными или сосредоточенными параметрами.

Выводы. 1. Полученные характеристики многослойных пьезоактюаторов с кодовым и параллельным управлением позволяют рассчитывать статические и динамические режимы работы многослойных ПА в зависимости от внешней нагрузки в нано- и микроманипуляторах и их физических и геометрических параметров.

2. Передаточные функции многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при про-

должном и поперечном пьезоэффектах с параллельным и кодовым управлением определяют динамические характеристики систем управления деформацией многослойных пьезоактюаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электромеханика – некоторые проблемы XXI века. – Изв. РАН. Энергетика, 2003, № 1, с. 154 – 157.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004, 144 с.
3. Физическая акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований/Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966, 592 с.
4. Сафронов А.Я., Климашин В.М., Парфенов Б.Г., Ярошевич В.А., Никифоров В.Г. Пьезокерамические пакетные и моноблочные пьезоактюаторы. – Компоненты и технологии, 2002, № 6, с. 26 – 28.
5. Казаков В.К., Климашин В.М., Никифоров В.Г., Сафронов А.Я., Чернов В.А. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения. – Компоненты и технологии, 2007, № 6, с. 62 – 65.
6. Казаков В.К., Никифоров В.Г., Сафронов А.Я., Чернов В.А. Актюаторы для оптических затворов и методы измерений их характеристик. – Нано- и микросистемная техника, 2007, № 10, с. 52 – 55.
7. Афонин С.М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений. – Приборы и системы управления, 1998, № 2, с. 41, 42.
8. Афонин С.М. О матричных уравнениях в задачах электроупругости. – Электричество, 2006, № 3, с. 48–55.
9. Афонин С.М. Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений. – Электричество, 2009, № 9, с. 29–35.
10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Профессия, 2004, 752 с.
11. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. – М.: Мир, 1978, 284 с.

[14.09.15]

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

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 49–55.

Studying the Dynamic Characteristics of Multilayer Nano- and Microdisplacement Piezoactuators

AFONIN Sergei Mikhailovich (Moscow Electronic Technics Institute, Moscow, Russia) – Associate Professor, Senior Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

The displacements of piezoelectric transducers are analyzed. Interest in using piezoelectric transducers in electrical engineering is growing owing to the possibility of using them in a variety of vibration sensors for detecting and preventing emergency situations. This is especially the case for electrical and power

equipment of substations, small-capacity power-generating stations, and the like. For equipment diagnostic purposes it is important to have an idea about the model that describes wave propagation phenomena in the medium itself and in the sensor. A piezoelectric transducer model is considered from the viewpoint of applied forces and the EMF generated in the transducer. The dynamic characteristics of multilayer nano- and microdisplacement piezoactuators with parallel and code control are determined. The transfer functions of multilayer nano- and microdisplacement piezoactuators with parallel and code control are determined for the cases of longitudinal and transverse piezoeffect.

Key words: multilayer piezoactuator, nano- and microdisplacements, deformation, dynamic characteristics, parallel and code control, transfer functions

REFERENCES

1. **Kopylov I.P.** *Izv. RAN. Energetika – in Russ. (New of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2003, No. 1, pp. 154–157.
2. **Mironov V.L.** *Osnovy skaniruyushchei zondovoi mikroskopii (Principles of Scanning Probe Microscopy)*. Moscow, Publ., «Tekhnosfera», 2004, 144 p.
3. **Fizicheskaya akustika, t.1, chast' A. Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy/Pod red. U. Mezona (Physical Acoustics, vol. 1, part A. Ultrasonic Investigation Methods and Instruments/Edit. by U. Mezon)**. Moscow, Publ. «Mir»6 1966, 592 p.
4. **Safronov A.Ya., Klimashin V.M., Parfenov B.G., Yaroshevich V.A., Nikiforov V.G.** *Komponenty i tekhnologii – in Russ. (Components and Technologies)*, 2002, No. 6, pp. 26–28.
5. **Kazarov V.K., Klimashin V.M., Nikiforov V.G., Safronov A.Ya., Chernov V.A.** *Komponenty i tekhnologii – in Russ. (Components and Technologies)*, 2007, No. 6, pp. 62–65.
6. **Kazakov V.K., Nikiforov V.G., Safronov A.Ya., Chernov V.A.** *Nano- i mokrosistemnaya tekhnika – in Russ. (Nano and Mikrosystem Technology)*, 2007, No. 10, pp. 52–55.
7. **Afonin S.M.** *Pribory i sistemy upravleniya – in Russ. (Devices and Control Systems)*, 1998, No. 2, pp. 41–42.
8. **Afonin S.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 3, pp. 48–55.
9. **Afonin S.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 9, pp. 29–35.
10. **Besekerskii V.A., Popov E.P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya (The theory of automatic control systems)*. Moscow, Publ. «Professiya», 2004, 752 p.
11. **Lenk A.** *Elektromekhanicheskiye sistemy. Sistemy s sosredotochennymi parametrami (Electromechanical systems. Systems with lumped parameters)*. Moscow, Publ. «Mir», 1978, 284.