

Параметрические структурные схемы многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при поперечном пьезоэффекте

АФОНИН С.М.

Применение прецизионного пьезопривода нано- и микроперемещений перспективно в оборудовании нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники и астрономии. Пьезокерамический актюатор (пьезоактюатор) или пьезодвигатель такого пьезопривода работает на основе обратного пьезоэффекта. Перемещение достигается за счет деформации пьезоактюатора в диапазоне от единиц нанометров до десятков микрометров с точностью до десятых долей нанометров при приложении электрического напряжения. Диапазон перемещения пьезопривода до сотен микрометров увеличивается при использовании многослойного (составного) пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте. Полученные в статье структурно-параметрическая модель, параметрические структурные схемы и передаточные функции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте позволяют описывать его динамические и статические свойства с учетом физических параметров, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

Ключевые слова: многослойный пьезоактюатор, поперечный пьезоэффект, нано- и микроперемещения, деформация, параметрические структурные схемы, передаточные функции

Прецизионный пьезопривод нано- и микроперемещений применяется в нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектронике и астрономии. Пьезокерамический актюатор (пьезоактюатор) или пьезодвигатель такого пьезопривода работает на основе обратного пьезоэффекта, перемещение достигается за счет деформации пьезоактюатора в диапазоне от единиц нанометров до десятков микрометров с точностью до десятых долей нанометров при приложении электрического напряжения [1].

Увеличение диапазона перемещения пьезопривода до сотен микрометров обеспечивается при использовании многослойного (составного) пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте [1–9]. Однокоординатный пьезоактюатор при поперечном пьезоэффекте выполняется в виде пьезопластины, пьезотрубки или их набора, многослойного пьезоактюатора или секционного пьезопреобразователя (рис. 1,а). Кинематическая схема двухкоординатного пьезоактюатора с отдельными пьезоприводами по координатным осям приведена на рис. 1,б.

На нано- и микроуровне пьезоматериалы и пьезоактюаторы используются в линейных нано- и микроприводах и микронасосах. Пьезоактюаторы обеспечивают большие усилия и высокие скорости работы и возвращаются в исходное положение при отключении, имеют очень малые значения перемещения/хода – менее 1%. Пьезоактюаторы при поперечном пьезоэффекте используются в большинстве наноманипуляторов для сканирующих туннельных и силовых, а также атомно-силовых микроскопов. Наноробототехнические манипуляторы с пьезоактюаторами нано- и микроперемещений при поперечном пьезоэффекте (рис. 1) являются цен-

тральным компонентом наноробототехнических систем нано- и микроперемещений. Главные требования, предъявляемые к ним, заключаются в наноразмерном позиционировании в диапазоне десятков микрометров. Система манипулирования предназначена не только для наноманипулирования, но и для наносборки, наноизмерений и наноизготовления [2].

Пьезоэлектрические наноманипуляторы и нанороботы при поперечном пьезоэффекте применяются для сканирования исследуемых образцов в атомно-силовых микроскопах и сканирующих туннельных микроскопах [3].

В фотонике используются пьезоактюаторы при поперечном пьезоэффекте для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при применении оптических методов передачи информации и энергии, для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов, систем адаптивной оптики, контррефлектора космического радиотелескопа [4].

Конструкция цилиндрического пьезокерамического актюатора при поперечном пьезоэффекте состоит из одной или нескольких пьезотрубок армированных сборной стяжкой с усилием порядка 50 Н. Пьезоактюаторы цилиндрические армированного типа с использованием поперечного пьезоэффекта для нано- и микроперемещений работают в диапазоне от ± 3 до ± 12 мкм. Пьезоактюаторы при поперечном пьезоэффекте применяются в фото- и рентгенолитографии для точного совмещения шаблонов, в медицинской аппаратуре для точной подачи инструмента при микрохирургических и глазных операциях, в оптической и электронной микроскопии для нано- и микроперемещений пред-

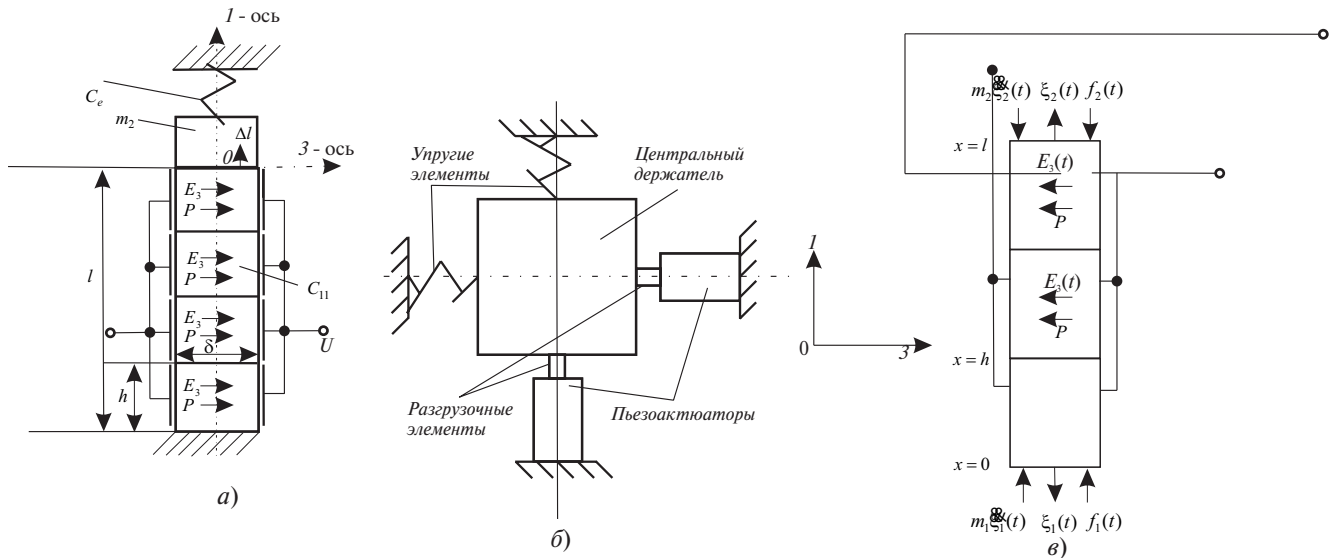


Рис. 1

метного столика, в лазерной технике, устройствах волоконной оптики для управления лучом и юстировки волоконно-оптических систем передачи и приема информации, в оптических фазовых модуляторах, в системах адаптивной оптики, адаптивных телескопах, для автоматической подстройки квантовых генераторов, в системах автоюстировки и настройки лазеров и интерферометров, в оптических фазовых модуляторах [5, 6].

В результате совместного решения системы уравнений эквивалентного механического четырехполюсника многослойного пьезоактюатора, соответствующих уравнений пьезоэффекта и граничных условий на двух нагруженных рабочих поверхностях пьезоактюатора определяется его структурно-параметрическая модель. Из полученной модели при поперечном пьезоэффекте рассчитываются передаточные функции пьезоактюатора.

В расчетах по аналогии с электроприводом требуется учет противоЭДС пьезоактюатора, соответствующей противоЭДС якоря двигателя постоянного тока. Для этого в структурно-параметрических моделях и параметрических структурных схемах многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте вводятся отрицательные обратные связи, учитывающие прямой пьезоэффект в многослойном пьезоактюаторе. В статье рассматривается влияние в статике и динамике противоЭДС на свойства пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте.

В отличие от работ [10, 11], в которых рассматриваются пьезопреобразователи с фиксированной упругой податливостью для акустических и радиотехнических устройств, в настоящей статье рассчитывается влияние вида управления пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте от источника напряжения или тока на упругую податливость и же-

сткость пьезоактюатора для устройств нано- и микроперемещений оборудования нанотехнологий.

Уравнения поперечного пьезоэффекта [10] имеют вид:

$$S_1 = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_1; \quad (1)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + e_{33}^T E_3. \quad (2)$$

Здесь первое уравнение описывает обратный пьезоэффект, а второе – прямой; $S_1(x,t) = \frac{\partial x(x,t)}{\partial x}$ – относительное смещение сечения пьезопластины по оси I (рис. 1); x – координата; t – время; d_{31} – пьезомодуль при поперечном пьезоэффекте; $E_3(t) = u(t)/d$ – напряженность электрического поля по оси 3 ; $u(t)$ – напряжение на электродах пластины; d – толщина пьезопластины; s_{11}^E – упругая податливость по оси I при $E = \text{const}$; $T_1(x,t)$ – механическое напряжение по оси I ; $D_3(t)$ – электрическая индукция по оси 3 ; e_{33}^T – диэлектрическая проницаемость по оси 3 при $T = \text{const}$.

Рассмотрим многослойный пьезоактюатор при поперечном пьезоэффекте (рис. 1, в), состоящий из пьезопластин, соединенных электрически параллельно, а механически – последовательно. Многослойный пьезоактюатор при поперечном пьезоэффекте имеет длину l , а каждая из составляющих его n пьезопластин (пьезослоев) имеет высоту h , толщину d , ширину b и площадь поперечного сечения S_0 . Электроды нанесены на грани пьезопластин, перпендикулярные оси 3 , причем поперечное сечение пьезопластины площадью S_0 перпендикулярно оси I , сечение пьезопластины площадью S_p перпендикулярно оси 3 , площадь конденсатора многослойного пьезоактюатора nS_p .

Найдем систему уравнений эквивалентного механического четырехполюсника многослойного пьезоактюатора из матричных уравнений. Эквивалентный механический четырехполюсник пьезопластины, имеющей порядковый номер k в многослойном пьезоактюаторе, составлен исходя из уравнения колебаний и уравнения сил, действующих на гранях пьезопластины [8, 9]. Система уравнений, соответствующая четырехполюснику пьезопластины, имеет вид:

$$-\frac{S_k(p)S_0g}{s_{11}}\dot{y} + \frac{1}{sh(hg)}\ddot{y} + \frac{S_{k+1}(p)S_0g}{s_{11}sh(hg)}y = F_k(p); \tag{3}$$

$$-\frac{S_k(p)S_0g}{s_{11}sh(hg)} + \frac{S_{k+1}(p)S_0g}{s_{11}}\dot{y} + \frac{1}{sh(hg)}\ddot{y} = F_{k+1}(p),$$

где $g = p/c + a$ – коэффициент распространения; p – параметр преобразования; c – скорость звука; a – коэффициент затухания; s_{11} – упругая податливость; S_0 – площадь поперечного сечения пьезопластины.

Из (3) получаем:

$$F_k(p) = -(Z_{111} + Z_{211})S_k(p) + Z_{211}S_{k+1}(p);$$

$$-F_{k+1}(p) = -Z_{211}S_k(p) + (Z_{111} + Z_{211})S_{k+1}(p),$$

где $Z_{111} = \frac{S_0gth(hg)}{s_{11}}$; $Z_{211} = \frac{S_0g}{s_{11}sh(hg)}$.

Из этих уравнений получаем систему:

$$-F_k = \frac{Z_{111}}{Z_{211}}\dot{F}_{k+1} + Z_{111}\ddot{F}_{k+1} + \frac{Z_{111}}{Z_{211}}\dot{S}_{k+1}; \tag{4}$$

$$S_k = \frac{1}{Z_{211}}F_{k+1} + \frac{Z_{111}}{Z_{211}}\dot{S}_{k+1},$$

которая эквивалентна матричному уравнению

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_k \\ \dot{S}_k \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} \dot{F}_{k+1} \\ \dot{S}_{k+1} \end{pmatrix} \tag{5}$$

Матрица записывается в виде

$$[M] = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_{111}}{Z_{211}} & \frac{Z_{111}}{Z_{211}} \\ \frac{1}{Z_{211}} & 1 + \frac{Z_{111}}{Z_{211}} \end{pmatrix}$$

где

$$m_{11} = m_{22} = 1 + \frac{Z_{111}}{Z_{211}} = ch(hg);$$

$$m_{12} = Z_{111}\dot{F}_{k+1} + \frac{Z_{111}}{Z_{211}}\ddot{F}_{k+1} = Z_{011}sh(hg);$$

$$m_{21} = \frac{1}{Z_{211}} = \frac{sh(hg)}{Z_{011}}; \quad Z_{011} = \frac{S_0g}{s_{11}}.$$

Входные параметры для многослойного пьезоактюатора: $x_k(t)$, $f_k(t)$ – смещение и сила на входной грани k -й пластины. Выходные параметры: $x_{k+1}(t)$, $f_{k+1}(t)$ – смещение и сила на выходной грани k -й пластины, являющиеся входным смещением и силой для входной грани $(k+1)$ -й пластины. Сила на выходной грани k -й пластины равна по значению и противоположна по направлению силе на входной грани $(k+1)$ -й пластины:

$$f_{kout} = -f_{(k+1)inp}.$$

Из (5) определяем матричное уравнение

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_{(k+1)inp} \\ \dot{S}_{k+1} \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} \dot{F}_{(k+1)out} \\ \dot{S}_{k+2} \end{pmatrix} \tag{6}$$

из которого

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_{kinp} \\ \dot{S}_{kinp} \end{pmatrix} = [M][M] \begin{pmatrix} \dot{F}_{(k+2)out} \\ \dot{S}_{(k+2)out} \end{pmatrix} = [M]^2 \begin{pmatrix} \dot{F}_{(k+2)out} \\ \dot{S}_{(k+2)out} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_{1inp} \\ \dot{S}_1 \end{pmatrix} = [M]^n \begin{pmatrix} \dot{F}_{nout} \\ \dot{S}_n \end{pmatrix} \tag{7}$$

Методом математической индукции находим

$$[M]^n = \begin{pmatrix} ch(nhg) & Z_0sh(nhg) \\ \frac{sh(nhg)}{Z_{011}} & ch(nhg) \end{pmatrix} \tag{8}$$

Матричному уравнению для многослойного пьезоактюатора с учетом входящего в него выражения для матрицы $[M]^n$ соответствует эквивалентный механический четырехполюсник многослойного пьезоактюатора, описываемый системой уравнений:

$$\frac{S_0g}{s_{11}sh(lg)}\{S_1(p)ch(lg) + S_n(p)\} = F_1(p); \tag{9}$$

$$\frac{S_0g}{s_{11}sh(lg)}\{S_1(p) + S_n(p)ch(lg)\} = -F_n(p),$$

где $l = nh$ – длина многослойного пьезоактюатора, причем упругая податливость $s = s_{11}^E$ при управлении по напряжению при $E = const$; E – напряженность электрического поля, а упругая податливость $s = s_{11}^D$ при управлении по току при $D = const$; D – электрическая индукция [10, 11].

Уравнения сил, действующих на гранях многослойного пьезоактюатора:

при $x = 0$

$$T_1(0, p)S_0 = F_1(p) + m_1 p^2 S_1(p); \quad (10)$$

при $x = 1$

$$T_1(l, p)S_0 = -F_2(p) - m_2 p^2 S_2(p), \quad (11)$$

где принимаем $S_n(p) = S_2(p)$; $F_n(p) = F_2(p)$.

Сила, возбуждающая колебания многослойного пьезоактюатора, определяется из уравнения обратного пьезоэффекта (1) при поперечном пьезоэффекте:

$$F(p) = \frac{d_{31} S_0 E_3(p)}{s_{11}^E}. \quad (12)$$

Рассмотрение системы уравнений (9), уравнений сил (10), (11), а также уравнения (12) позволяет записать уравнения для $x = 0$ и $x = 1$, совместное решение которых дает систему уравнений, описывающую структурно-параметрическую модель многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте с управлением по напряжению:

$$S_1(p) = \frac{1}{m_1 p^2} F_1(p) + \frac{S_0}{s_{11}^E},$$

$$\frac{d}{dt} d_{31} E_3(p) - \frac{g}{\text{sh}(lg)} [\text{ch}(lg) S_1(p) - S_2(p)] \ddot{y};$$

$$S_2(p) = \frac{1}{m_2 p^2} F_2(p) + \frac{S_0}{s_{11}^E},$$

$$\frac{d}{dt} d_{31} E_3(p) - \frac{g}{\text{sh}(lg)} [\text{ch}(lg) S_2(p) - S_1(p)] \ddot{y}. \quad (13)$$

Система дополняется уравнением внешней цепи

$$U(p) = U_0(p) \frac{1}{RC_n p + 1}, \quad (14)$$

где $U_0(p)$ – напряжение источника; R – сопротивление внешней цепи; $C_n = C_0 n$ – емкость многослойного пьезоактюатора; C_0 – емкость пьезопластины; n – число пьезопластин в многослойном пьезоактюаторе.

Для учета влияния реакции многослойного пьезоактюатора за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта (2) при поперечном пьезоэффекте и управлении от источника тока необходимо дополнить структурно-параметрическую модель (13) и параметрическую структурную схему многослойного пьезоактюатора (рис. 2,а) с учетом прямого пьезоэффекта обратными связями, соответствующими уравнениям:

$$U_i(p) = \frac{1}{S_0} d_{31} n S_p \frac{1}{C_n} F_i(p) = \frac{(nh/d) d_{31}}{C_n} F_i(p);$$

$$C_n = \frac{e_{33}^T n S_p}{d}; \quad S_0 = bd; \quad S_p = bh, \quad (15)$$

где $i = 1, 2$ – номер торца многослойного пьезоактюатора; $U_i(p)$ – изображение Лапласа противоЭДС (напряжения обратной связи).

При управлении многослойного пьезоактюатора от источника питания с конечным сопротивлением получаем выражения для обратных связей:

$$U_i(p) = \frac{1}{S_0} d_{31} n S_p \frac{1}{C_n} k_u F_i(p) = \frac{(nh/d) d_{31}}{C_n} k_u F_i(p), \quad (16)$$

k_u – коэффициент управления от электрического источника питания.

Рассмотрим влияние реакции пьезоактюатора (рис. 1,б) при поперечном пьезоэффекте на создание противоЭДС за счет прямого пьезоэффекта при его статической деформации. В статическом режиме при зажатом пьезоактюаторе его деформация равна нулю, а развиваемая им сила максимальна.

Максимальное усилие f_{\max} и механическое напряжение $T_{1\max}$ многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и питании от источника с бесконечно малым сопротивлением:

$$f_{\max} = E_3 d_{31} S_0 / s_{11}^E; \quad (17)$$

$$T_{1\max} = E_3 d_{31} / s_{11}^E. \quad (18)$$

Запишем выражения для f_{\max} (рис. 2,б) и $T_{1\max}$ пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте с учетом прямого пьезоэффекта (2) и питания от источника тока, т.е. при бесконечно большом сопротивлении источника питания, когда обкладки пьезоактюатора разомкнуты:

$$f_{\max} = E_3 d_{31} S_0 / (s_{11}^E k_s) = E_3 d_{31} S_0 / s_{11}^D; \quad (19)$$

$$T_{1\max} = E_3 d_{31} / s_{11}^D. \quad (20)$$

Упругие податливости пьезоактюаторов $s_{11}^E > s_{11}^D$, причем $s_{11}^E / s_{11}^D \approx 1,2$. Индекс E соответствует измерениям при постоянной напряженности электрического поля в пьезоактюаторе или измерениям с замкнутыми электродами, индекс D – измерениям при постоянной индукции и управлении от источника тока или при измерениях с разомкнутыми электродами многослойного пьезоактюатора. Измерения проводились на прессе УММ-5. Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19 упругие податливости составили $s_{11}^E = 12,5 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$; $s_{11}^D = 11 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$; $s_{11}^E / s_{11}^D = 1,14$, т.е. отклонение расчетных характеристик от экспериментальных не превышает 5%.

Аналогично при управлении многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте от

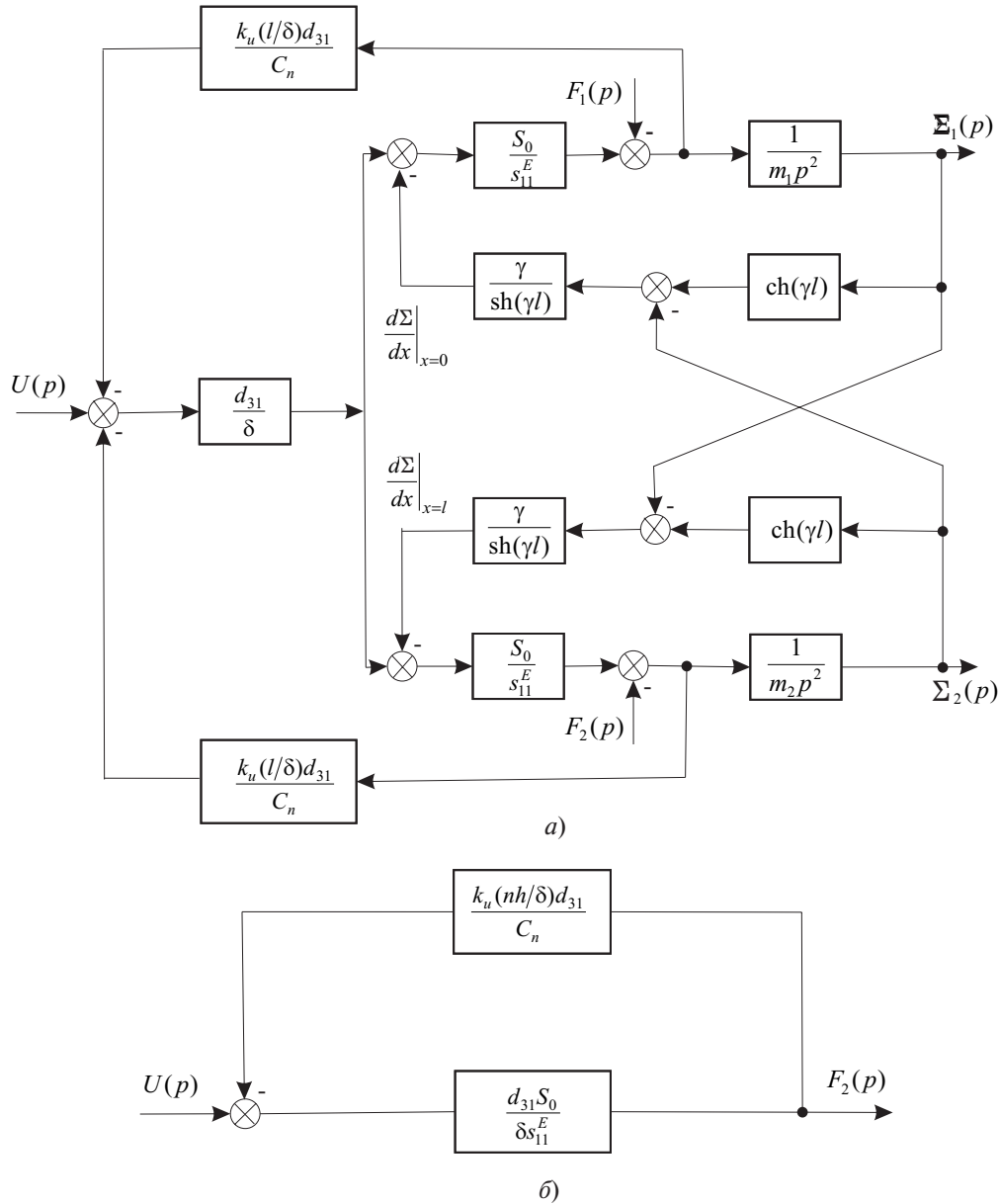


Рис. 2

источника питания с конечным сопротивлением с учетом прямого пьезоэффекта (2) получаем (структурная схема на рис. 2,б):

$$f_{\max} = u \frac{1}{d} d_{31} \frac{S_0}{s_{11}^E} + f_{\max} \frac{1}{S_0} d_{31} n S_p \frac{1}{n e_{33}^T S_p / d} k_u \frac{1}{d} d_{31} \frac{S_0}{s_{11}^E}, \quad (20)$$

откуда

$$\frac{f_{\max}}{S_0} s_{11}^E \frac{\partial}{\partial u} = \frac{d_{31}^2 k_u}{e_{33}^T s_{11}^E} = E_3 d_{31};$$

$$T_{1\max} (1 - k_{31}^2 k_u) s_{11}^E = E_3 d_{31}, \quad (21)$$

где k_u – коэффициент управления от электрического источника питания $0 \leq k_u \leq 1$.

Следовательно, при управлении от источника тока

$$k_u|_{R \neq \infty} = 1;$$

при управлении от источника напряжения

$$k_u|_{R \neq 0} = 0,$$

причем (k_s – коэффициент изменения упругой податливости):

$$s_{11} = (1 - k_{31}^2 k_u) s_{11}^E = k_s s_{11}^E; \quad (22)$$

$$k_s = 1 - k_{31}^2 k_u, \quad k_s > 0;$$

$$(1 - k_{31}^2)|_{R \neq \infty} \leq k_s \leq 1|_{R \neq 0};$$

$$k_s|_{R \neq \infty} = 1 - k_{31}^2; \quad k_s|_{R \neq 0} = 1.$$

Рассмотрим различные режимы работы многослойного пьезоактюатора. Если за входную величину

ну принять напряжение источника $U_0(t)$, то с учетом внешней цепи передаточные функции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте необходимо умножить на выражение

$$W_0(p) = \frac{E_3(p)}{U_0(p)} = \frac{1}{d(RnC_p + 1)} = \frac{1}{d(RC_n p + 1)}$$

Если одна из граней многослойного пьезоактюатора жестко закреплена, например при $x=0$, это соответствует $m_1 \rightarrow \infty$, причем $S_1(p) = 0$. Тогда из (13) выводим выражение структурно-параметрической модели многослойного пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, с управлением по напряжению:

$$S_2(p) = \frac{1}{m_2 p^2} \left[F_2(p) + \frac{S_0}{s_{11}^E} d_{31} E_3(p) - \frac{S_2(p) g}{\text{th}(\gamma l)} \right] \quad (23)$$

Уравнениям (23) и (16) соответствует параметрическая структурная схема (рис. 3,а) многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте с учетом противоЭДС и управления от электрического источника питания пьезоактюатора. Сле-

довательно, с учетом $F_2(p) = 0$ получаем выражение, которое соответствует параметрической структурной схеме пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению и инерционной нагрузке:

$$\frac{S_2(p)g}{\text{th}(\gamma l)} + \frac{S_2(p)s_{11}^E p^2}{S_0} = d_{31} E_3, \quad (24)$$

а также можем найти передаточные функции при питании многослойного пьезоактюатора от источника напряжения с бесконечно малым сопротивлением при $k_u = 0$ (рис. 3,а).

В громоздких выражениях для передаточных функций $C_{11}^E = \frac{S_0}{s_{11}^E l} = \frac{m_n c^2}{l^2}$ – жесткость многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте. Например, для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19 при $s_{11}^E = 12,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $S_0 = 10^{-5} \text{ м}^2$, $l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ получаем $C_{11}^E = 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$. Отклонение расчетных характеристик от экспериментальных не превышает 5%.

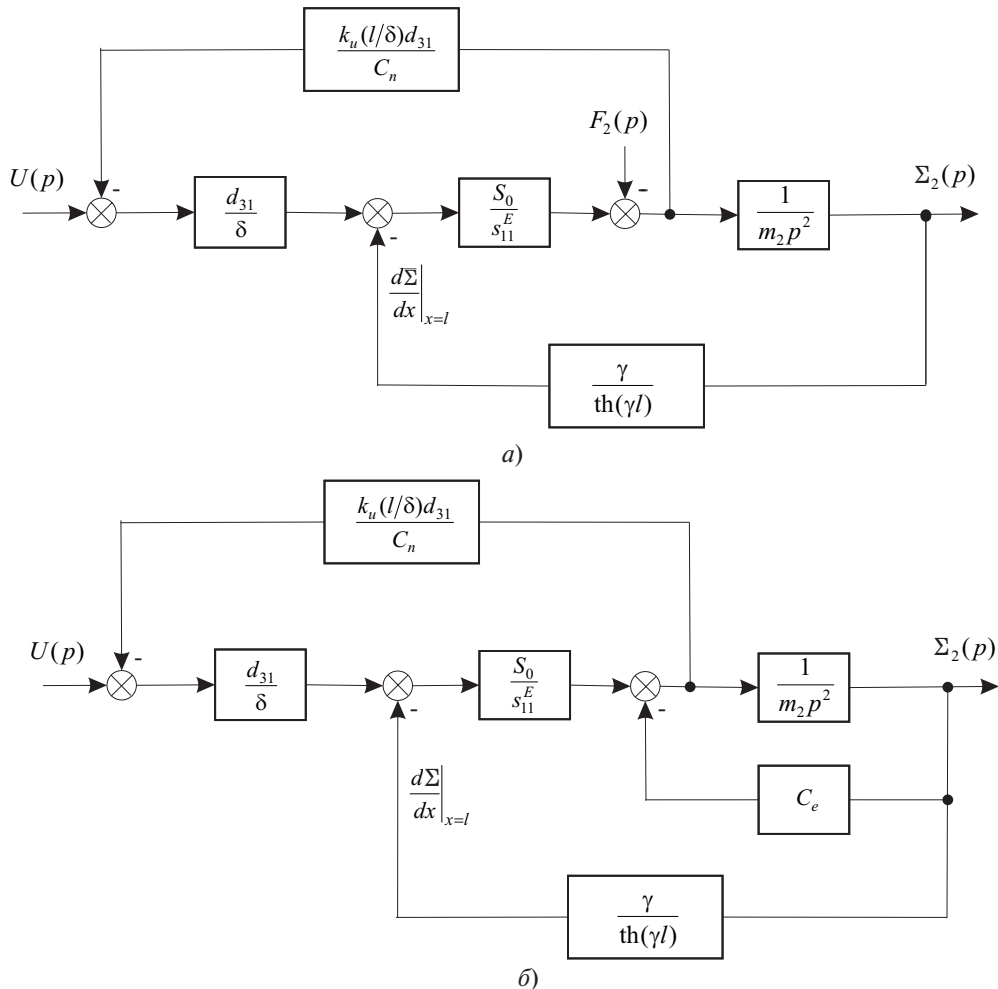


Рис. 3

Если за входную величину принять изображение Лапласа напряжения $U(p)$, то

$$W_2(p) = \frac{S_2(p)}{U(p)} = \frac{(l/d)d_{31}}{\frac{m_2}{C_{11}^E}p^2 + \text{lgcth}(lg)}. \quad (25)$$

При жестко закрепленной одной грани многослойного пьезоактюатора определим смещение другой его грани $x_2(\text{ж})$ в установившемся режиме при $U(t) = U_0 \text{ж}(t)$ и $F_2(t) = 0$:

$$\begin{aligned} x_2(\text{ж}) &= \lim_{t \rightarrow \infty} x_2(\text{ж}) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_2(p) \frac{U_0}{p} = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} (nh/d)d_{31}U_0 = (l/d)d_{31}U_0. \end{aligned} \quad (26)$$

Следовательно, в статике диапазон перемещения многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте

$$Dl = (l/d)d_{31}U. \quad (27)$$

Диапазон перемещения многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте из пьезокерамики ЦТС-19 при $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м/В, $n = 4$, $h = 10^{-2}$ м, $d = 10^{-3}$ м, $U = \pm 400$ В составляет $Dl = \pm 3,2$ мкм. Измеренное значение диапазона перемещения многослойного пьезоактюатора совпадает с расчетным с погрешностью 5%.

Используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда $\text{ctg}(g) = 1/(g) + g/3$, в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c/l$ при $m_2/m_n \gg 1$ можем записать выражения передаточных функций пьезоактюатора при управлении по напряжению и инерционной нагрузке и питании от источника напряжения с бесконечно малым сопротивлением.

Соответственно, для учета влияния реакции многослойного пьезоактюатора при управлении от источника питания с конечным сопротивлением источника за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта необходимо дополнить параметрическую структурную схему многослойного пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при $M_1 \text{ж}$ при поперечном пьезоэффекте обратной связью (рис. 3,а), описываемой уравнением

$$U_2(p) = \frac{1}{S_0} d_{31} n S_p \frac{1}{C_n} k_u F_2(p) = \frac{(nh/d)d_{31}}{C_n} k_u F_2(p). \quad (28)$$

Тогда при поперечном пьезоэффекте получаем передаточные функции пьезоактюатора с инерционной нагрузкой и питании многослойного пьезодвигателя от источника с бесконечно большим со-

противлением при $k_u = 1$ (рис. 3,а), т.е. при питании от источника тока.

Жесткость многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте при управлении по току

$$C_{11}^D = \frac{S_0}{s_{11}^D l} = \frac{S_0}{s_{11}^E (1 - k_{31}^2) l} = \frac{m_n c^2}{l^2 (1 - k_{31}^2)}.$$

Например, для пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте из пьезокерамики ЦТС-19 при $s_{11}^D = 11 \cdot 10^{-12}$ м²/Н, $S_0 = 10^{-5}$ м², $l = 2 \cdot 10^{-2}$ м получаем $C_{11}^D = 4,5 \cdot 10^7$ Н/м; отклонение расчетных характеристик от экспериментальных не превышает 5%.

С использованием аппроксимации гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c/l$ при инерционной нагрузке $m_2/m_n \gg 1$ были получены выражения передаточных функций с учетом реакции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и управлении от источника с бесконечно большим сопротивлением, а также с конечным значением его сопротивления ($k_u \neq 0$, рис. 3,а) с учетом противоЭДС.

Если за входную величину принять изображение Лапласа напряжения $U(p)$, то

$$\begin{aligned} W_2(p) &= \frac{S_2(p)}{U(p)} = \frac{(l/d)d_{31} \text{th}(lg)}{\frac{m_2 l^2 (1 - k_{31}^2 k_u)}{m_n c^2} \text{th}(lg) p^2 + \text{lg}} = \\ &= \frac{(l/d)d_{31}}{\frac{m_2}{C_{11}} p^2 + \text{lgcth}(lg)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Применяя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c/l$ при инерционной нагрузке $m_2/m_n \gg 1$, были получены выражения передаточных функций с учетом реакции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и его управления от источника питания с конечным сопротивлением.

Аналогично из (23) при $F_2(p) = C_e S_2(p)$ получаем выражение, которое соответствует параметрической структурной схеме пьезоактюатора (рис. 3,б), закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению от источника напряжения с бесконечно малым сопротивлением и упругоинерционной нагрузке:

$$\frac{S_2(p)g}{\text{th}(lg)} + \frac{S_2(p)s_{11}^E m_2 p^2}{S_0} + \frac{S_2(p)s_{11}^E C_e}{S_0} = d_{31} E_3, \quad (30)$$

где C_e – жесткость нагрузки.

Из (30) определяем передаточную функцию пьезоактюатора (рис. 1,а), а также передаточные функции многослойного пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке при $k_u = 0$ (рис. 3,б). После аппроксимации гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда можно получить выражение для передаточной функции многослойного пьезоактюатора с управлением по напряжению для упругоинерционной нагрузки при $m_2 / m_n > 1$ в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c/l$.

Были получены передаточные функции при управлении многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте по току от источника с бесконечно большим сопротивлением с учетом противоЭДС (28) при $k_u = 1$ (рис. 3,б), а после аппроксимации гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда – выражение для передаточной функции многослойного пьезоактюатора с управлением по току для упругоинерционной нагрузки при $m_2 / m_n > 1$ в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c/l$.

Аналогично при управлении от источника питания с конечным сопротивлением были получены передаточные функции пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке (рис. 3,б) с учетом противоЭДС (28):

$$W_{21}(p) = \frac{S_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{31}l}{\frac{m_2 p^2}{C_{11}} + \lg \operatorname{ctg}h(lg) + \frac{C_e}{C_{11}}}; \quad (31)$$

$$W_2(p) = \frac{S_2(p)}{U(p)} = \frac{(l/d)d_{31}}{\frac{m_2 p^2}{C_{11}} + \lg \operatorname{ctg}h(lg) + \frac{C_e}{C_{11}}}. \quad (32)$$

Следовательно, получаем частотную передаточную функцию пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и $a = 0$ в виде

$$W_{21}(j\omega) = \frac{S_2(j\omega)}{E_3(j\omega)} = \frac{d_{31}l}{\frac{m_2 (j\omega)^2}{C_{11}} + \frac{j\omega l}{c} \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c} + \frac{C_e}{C_{11}}}, \quad (33)$$

где ω – круговая частота; j – мнимая единица; $C_{11} = \frac{S_0}{s_{11}l} = \frac{1}{C_{11}l}$ – жесткость пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте.

С учетом жесткости пьезоактюатора C_{11} найдем резонансную частоту пьезоактюатора при $a = 0$. Приравнявая знаменатель выражения (33) нулю, получаем характеристическое частотное уравнение

$$-\frac{m_2 \omega^2}{C_{11}} + \frac{j\omega l}{c \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c}} + \frac{C_e}{C_{11}} = 0,$$

после преобразований получим:

$$\frac{\omega l}{c} \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c} = \frac{m_2 \omega^2}{C_{11}} - \frac{C_e}{C_{11}}. \quad (34)$$

Введем обозначения: $k = \omega/c$ – частотный коэффициент; $a = C_e/C_{11}$ – отношение суммарной жесткости упругого элемента нагрузки к жесткости пьезоактюатора; $b = m_2/m_n$ – отношение массы нагрузки к массе пьезоактюатора. С учетом обозначений получаем характеристическое уравнение

$$\operatorname{ctg}kl = -\frac{a}{kl} + bkl. \quad (35)$$

При упругой нагрузке и $M_2 = 0$ значение $b = 0$, поэтому

$$\operatorname{ctg}kl = -\frac{a}{kl}. \quad (36)$$

При $a = 0,2$ имеем первые три корня уравнения: $k_1 l = 1,69$; $k_2 l = 4,76$; $k_3 l = 7,88$. Графическое решение уравнения (36) приведено на рис. 4. При наличии упругого элемента резонансная частота пьезоактюатора возрастает (см. рис. 4). Обозначения функций на рис. 4: $y_1 = \operatorname{ctg}kl$; $y_2 = -\frac{a}{kl}$; $y_3 = bkl$;

$$y_4 = -\frac{a}{kl} + bkl.$$

При инерционной нагрузке и $C_e = 0$ значение $a = 0$ и характеристическое уравнение принимает вид:

$$\operatorname{ctg}kl = bkl. \quad (37).$$

При $b = 0,5$ корни уравнения: $k_1 l = 1,08$; $k_2 l = 3,64$; $k_3 l = 6,58$. Графическое решение характеристического уравнения (37) приведено на рис. 4. При наличии инерционной нагрузки резонансная частота уменьшается.

Изменение резонансных частот при упругоинерционной нагрузке с параметрами $a = 0,2$ и $b = 0,5$ также приведено на рис. 4.

При ненагруженном пьезоактюаторе с одним свободным торцом ($C_a = C_e = 0$ и $M = 0$) значения $a = 0$ и $b = 0$ и характеристическое уравнение

$$\operatorname{ctg}kl = 0, \quad (38)$$

его собственные значения $k_i l = \frac{\rho(2i-1)}{2}$, где $i = 1, 2, \dots$. Соответственно имеем первые три корня характеристического уравнения (38): $k_1 l = \rho/2 = 1,57$; $k_2 l = 3\rho/2 = 4,71$; $k_3 l = 5\rho/2 = 7,85$. Графическое решение уравнения (38) приведено на

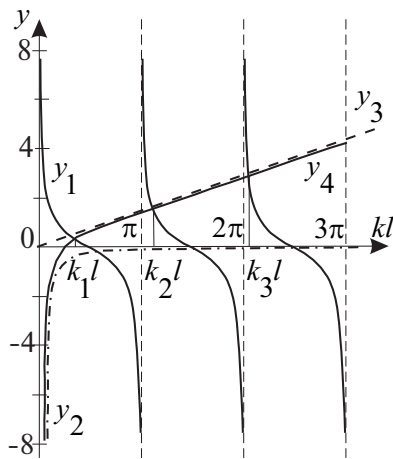


Рис. 4

рис. 4. Первая резонансная частота $f_1 = c / (4l)$. При $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $l = 40$ мм имеем $f_1 = 18,75$ кГц. Отклонение расчетных частотных характеристик от экспериментальных не превышает 5%.

Из (32), используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем выражение для передаточной функции многослойного пьезоактюатора при управлении от источника питания с конечным сопротивлением и упругоинерционной нагрузке при $m_2 / m_n \gg 1$ в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c / l$ в виде

$$W_2(p) = \frac{S_2(p)}{U(p)} = \frac{(l/d)d_{31}}{\frac{C_e}{C_{11}} + \frac{C_e}{C_{11}} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} T_{11ei}^2 p^2 + 2T_{11ei} x_{11ei} p + 1}, \quad (39)$$

где $T_{11ei} = \sqrt{\frac{m_2}{C_e + C_{11}}}$; $x_{11ei} = \frac{al^2 C_{11}}{3c\sqrt{m_2(C_e + C_{11})}}$ – по-

стоянная времени и коэффициент затухания пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте, управлении от источника питания с конечным сопротивлением источника и упругоинерционной нагрузке.

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

$$\omega_c = \sqrt{\frac{C_e + C_{11}}{m_2}}, \quad (40)$$

где ω_c – резонансная частота многослойного пьезоактюатора.

Экспериментальная зависимость полосы пропускания многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте (рис. 5,а) от массы нагрузки M определена для образцов из пьезокерамики ЦТС-19: $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м/В, $C_{11} = 2,3 \cdot 10^7$ Н/м, $C_e = 0,2 \cdot 10^7$ Н/м. Полоса пропускания многослой-

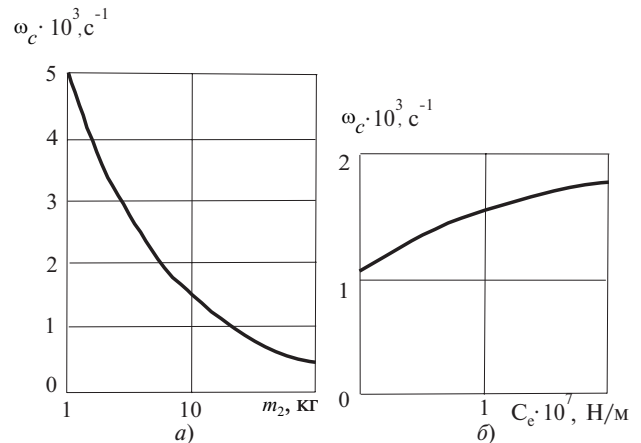


Рис. 5

ного пьезопреобразователя (рис. 5,б) в зависимости от жесткости нагрузки C_e экспериментально определена для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19: $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м/В, $C_{11} = 2,3 \cdot 10^7$ Н/м, $m_2 = 15$ кг; отклонение расчетных от экспериментальных характеристик не превышает 5%.

С учетом реакции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте из-за противоЭДС уменьшается его упругая податливость и повышается жесткость; увеличение сопротивления источника питания и согласующих цепей приводит к уменьшению упругой податливости многослойного пьезоактюатора.

Полученные структурно-параметрическая модель, параметрические структурные схемы и передаточные функции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте позволяют описывать его динамические и статические свойства с учетом физических параметров, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мионов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004, 144 с.
2. **Справочник Шпрингера по нанотехнологиям**, т. 3/Под ред. Б. Бхушана. – М.: Техносфера, 2010, 832 с.
3. **Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology**. V.7: Nano Me – T / Ed. H.S. Nalwa. – Los Angeles (California, USA): ASP, 2004, 942 p.
4. <http://www.newscatech.com/>
5. **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.
6. **Казakov 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.
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. **Физическая акустика**, т. 1, часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований/Под ред. У. Мэзона. — М.: Мир, 1966, 592 с.

11. **Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.** Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1974, 258 с.

А в т о р: 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.

[01.04.14]

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 11, pp. 37–46.

The Parametric Structural Diagrams of a Multilayer Piezoactuator of Nano- and Microdisplacements on the Basis of Transverse Piezoelectric Effect

S.M. AFONIN

Application of a high-precision piezoelectric drive of nano- and microdisplacements holds promise in the equipment of nanotechnology, nanobiology, microelectronics, and astronomy. The piezoceramic actuator (piezoactuator) or piezomotor of such piezodrive operates on the basis of inverse piezoelectric effect. Displacement is obtained as a result of piezoactuator deformation in the range from a few nanometers to several tens of micrometers with accuracy of a few tenths of nanometer when electric voltage is applied. The piezodrive displacement range can be increased to a few hundreds of micrometers through the use of a multilayer (composite) piezoactuator on the basis of transverse piezoelectric effect. By using the obtained structural-parametric model, the parametric structural diagrams, and transfer functions of a multilayer piezoactuator on the basis of transverse piezoelectric effect it is possible to describe its dynamic and static properties taking into account the physical parameters, external load, and resistance of matching electric circuits.

Key words: *multilayer piezoactuator, transverse piezoelectric effect, nano- and microdisplacements, deformation, parametric structural diagrams, transfer functions*

REFERENCES

1. **Mironov V.L.** *Osnovy skaniruyushchei zondovoi mikroskopii* (Principles of Scanning Probe Microscopy). Moscow. Publ. «Tekhnosfera», 2004, 144 p.
2. **Spravochnik Shpringera po nanotekhnologiyam.** Tom 3 / Pod red. B. Bkhushana (Springer Handbook of Nanotechnology / Edit. by B. Bkhushan). Moscow, Publ. «Tekhnosfera», 2010, 832 p.
3. **Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology.** V.7: Nano Me – T / Ed. H.S. Nalwa. — Los Angeles (California, USA): ASP, 2004, 942 p.
4. <http://www.newscatech.com>
5. **Safronov A.Ya., Klimashin V.M., Parfenov B.G., Yaroshevich V.A., Nikiforov V.G.** *Komponenty i tekhnologii* (Components and Technologies), 2002, No. 6, pp. 26–28.
6. **Kazakov V.K., Klimashin V.M., Nikiforov V.G., Safronov A.Ya., Chernov V.A.** *Komponenty i tekhnologii* (Components and Technologies), 2007, No. 6, pp. 62–65.

7. **Afonin S.M.** *Pribory i sistemy upravleniya* (Devices and Control Systems), 1998, No. 2, pp. 41–42.
8. **Afonin S.M.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2006, No. 3, pp. 48–55.
9. **Afonin S.M.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2009, No. 9, pp. 29–35.
10. **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», 1966, 592 p.
11. **Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Yu.** *Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoyelektricheskiye preobrazovateli* (Control and measuring Piezoelectric Converters). Vil'nyus. Publ. «Mintis», 1974, 258 p.

A u t h o r: Afonin Sergei Mikhailovich (Moscow, Russia) — Cand. Techn. Sci., Senior Lecturer, Senior Scientific Researcher; Moscow Electronic Technics Institute.

