

С. М. Афонин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц., eduems@mail.ru,  
Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

## Структурные схемы и структурно-параметрические модели электроупругих актюаторов для наномехатронных систем

*Получены параметрические структурные схемы, структурно-параметрические модели и передаточные функции электроупругих актюаторов для наномехатронных систем. Передаточные функции пьезоактюатора определены при обобщенном пьезоэлектрическом эффекте. Изменения упругой податливости и жесткости пьезоактюатора найдены с учетом типа управления. Получены решение волнового уравнения и структурно-параметрические модели электроупругих актюаторов. Определено влияние геометрических и физических параметров электроупругого актюатора и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики. Получены в общем виде параметрические структурные схемы электроупругих актюаторов для наномехатронных систем. Выведены передаточные функции пьезоактюатора при обобщенном пьезоэффекте. Для расчета систем автоматического управления нанометрическим движением с электроупругим актюатором получены параметрические структурные схемы и передаточные функции электроупругих актюаторов. Определены статические и динамические характеристики электроупругих актюаторов. Применение электроупругих актюаторов решает задачи точного совмещения в микроэлектронике и нанотехнологии, компенсации температурных и гравитационных деформаций, атмосферной турбулентности путем коррекции волнового фронта. На основе решения волнового уравнения с учетом соответствующих уравнений пьезоэффекта, граничных условий на нагруженных рабочих поверхностях электроупругого актюатора, деформаций вдоль координатных осей построена структурно-параметрическая модель электроупругого актюатора. Передаточные функции и параметрические структурные схемы электроупругого актюатора выведены из уравнений, описывающих соответствующие структурно-параметрические модели и учитывающих противоэлектродвижущую силу электроупругого актюатора для наномехатронных систем.*

**Ключевые слова:** параметрическая структурная схема, электроупругий актюатор, пьезоактюатор, структурно-параметрическая модель, передаточная функция

### Введение

Электроупругие актюаторы на основе пьезоэлектрических и электрострикционных эффектов используются для наномехатронных систем в нанотехнологии, микроэлектронике, нанобиологии, энергетике и астрономии. Пьезоактюатор является пьезомеханическим устройством, предназначенным для приведения в действие механизмов, систем или управления ими с использованием пьезоэффекта. Нанометрическая точность наномехатронных систем обеспечивается электроупругими актюаторами. Для совмещения в наномехатронных системах применяются клеточные структуры с использованием пьезоактюаторов [1–8].

Наномехатронные системы с пьезоактюаторами используются в нанотехнологии, фотонике, адаптивной оптике при юстировке зеркал лазерных кольцевых гироскопов, совмещении и сканировании в электронных, зондовых, атомно-силовых микроскопах, при передаче информации и энергии в лазерных системах [1–12].

Структурно-параметрическая модель электроупругого актюатора представляет систему уравнений преобразований Лапласа для пере-

мещений торцов актюатора, которая с учетом электромеханических параметров актюатора и соответствующих сил на торцах актюатора описывает его структуру и преобразование электрической энергии в механическую энергию.

В работе задача получения структурной схемы и соответствующей структурно-параметрической модели электроупругого актюатора для наномехатронных систем решается методами математической физики, находится решение волнового уравнения с учетом граничных условий. С помощью преобразования Лапласа задача нахождения решения для волнового уравнения с частными производными гиперболического типа сводится к задаче для линейного обыкновенного дифференциального уравнения. Полученная в данной работе параметрическая структурная схема электроупругого актюатора отображает преобразование электрической энергии в механическую энергию в отличие от электрической эквивалентной схемы пьезопреобразователя, пьезоизлучателя или пьезовибратора [2, 8].

В работе учитывается влияние прямого пьезоэффекта на действующее напряжение на обкладках электроупругого актюатора, нахо-

дится изменение упругой податливости из-за прямого пьезоэффекта, определяется структурно-параметрическая модель электроупругого актюатора с обратными связями для наномехатронных систем, рассматриваются следующие варианты построения структурных схем и структурно-параметрических моделей электроупругого актюатора: с учетом обратного пьезоэффекта и постоянных упругой податливости и жесткости актюатора; с учетом обратного, прямого пьезоэффектов и переменных упругой податливости и жесткости актюатора; с учетом обратного, прямого пьезоэффектов и переменных упругой податливости и жесткости актюатора, влияния противоэлектродвижущей силы, зависящей от скорости перемещения торца актюатора.

При расчете параметров наномехатронной системы с электроупругим актюатором решаем совместно уравнение электроупругости и волновое уравнение при соответствующих граничных условиях и строим структурно-параметрическую модель актюатора, находим его передаточные функции в различных частотных диапазонах работы. Из-за реакции пьезоактюатора с учетом прямого пьезоэффекта в зависимости от вида управления по напряжению или току изменяются упругая податливость и жесткость пьезоактюатора, которые наряду с пьезомодулем являются основными параметрами пьезоактюатора. При высокой скорости перемещения торца пьезоактюатора учитываем влияние скорости пьезоактюатора на ток через пьезоактюатор и на действующее напряжение на его обкладках из-за прямого пьезоэффекта.

Параметрические структурные схемы с обратными связями и структурно-параметрическая модель пьезоактюаторов для наномехатронных систем, полученные в настоящей работе, отображают взаимную зависимость электромеханических параметров пьезоактюатора и преобразование пьезоактюатором электрической энергии в механическую энергию при перемещении его нагрузки.

### **Структурная схема, структурно-параметрическая модель и передаточные функции электроупругого актюатора**

Рассмотрим деформацию электроупругого актюатора, которая соответствует его напряженному состоянию. Если в пьезоактюаторе

создать напряженность электрического поля  $E$ , то в нем возникнет деформация  $S$  и механическое напряжение  $T$ . Соответственно, если в пьезоактюаторе создать механическое напряжение  $T$ , то возникнет электрическая индукция  $D$  и электрический заряд на обкладках пьезоактюатора.

Уравнения электроупругости актюатора для наномехатронных систем в общем виде для обратного и прямого пьезоэффекта [6–8] имеют вид

$$S_i = d_{mi} E_m + s_{ij}^E T_j; \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^E E_k, \quad (2)$$

где  $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ,  $m, k = 1, 2, 3$  — индексы;  $l = (\delta, h, b)$  — обобщенная рабочая длина электроупругого актюатора по оси  $i$ , которая равна для продольного, поперечного или сдвигового пьезоэффекта соответственно толщине  $\delta$ , высоте  $h$  или ширине  $b$  электроупругого актюатора;  $S_i$  — относительное смещение сечения актюатора по оси  $i$ ;  $d_{mi}$  — пьезомодуль при обобщенном пьезоэффекте;  $E_m(t) = u(t)/\delta$  — напряженность электрического поля по оси  $m$ ;  $u(t)$  — напряжение на обкладках актюатора;  $s_{ij}^E$  — упругая податливость при  $E = \text{const}$ ;  $T_j$  — механическое напряжение по оси  $j$ ;  $\delta$  — толщина актюатора;  $D_m(t)$  — электрическая индукция по оси  $m$ ;  $\varepsilon_{mk}^E$  — диэлектрическая проницаемость при  $T = \text{const}$ .

Из уравнения (1) в статике получаем установившееся перемещение  $\xi_0$  электроупругого актюатора для наномехатронной системы в виде

$$\xi_0 = d_{mi}(l/\delta)u_0, \quad (3)$$

где  $u_0$  — амплитуда напряжения на обкладках актюатора.

Уравнение сил, действующих на электроупругий актюатор, имеет вид

$$TS_0 = F + M \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где  $F$  — внешняя сила, приложенная к актюатору;  $M$  — перемещаемая масса.

Для составления структурно-параметрической модели пьезоактюатора для наномехатронных систем с управлением по напряжению решим совместно волновое уравнение, уравнение обратного пьезоэффекта и уравнения сил на его торцах.

При расчете электроупругого актюатора для наномехатронных систем применяется волновое уравнение, описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений [6–8, 11, 12]:

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} + \alpha^2 \xi(x, t) = \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $c^E$  — скорость звука в актюаторе при  $E = \text{const}$ ;  $\alpha$  — коэффициент затухания, учитывающий затухание колебаний вследствие рассеивания энергии при распространении волны на тепловые потери. С использованием преобразования Лапласа исходная задача для волнового уравнения с частными производными гиперболического типа (5) сводится к более простой задаче для линейного обыкновенного дифференциального уравнения с параметром  $p$ , где  $p$  — оператор Лапласа [9–12]. Применяв к волновому уравнению (5) преобразование Лапласа [9]

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^\infty \xi(x, t) e^{-pt} dt \quad (6)$$

и полагая начальные условия нулевыми  $\xi(x, t)|_{t=0} = 0$ ,  $\frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t}|_{t=0} = 0$ , получим линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка в виде

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \gamma^2 \Xi(x, p) = 0, \quad (7)$$

решением которого будет функция

$$\Xi(x, p) = C e^{-x\gamma} + B e^{x\gamma}, \quad (8)$$

где  $\Xi(x, p)$  — преобразование Лапласа смещения сечения электроупругого актюатора;  $\gamma = p/c^E + \alpha$  — коэффициент распространения.

Коэффициенты  $C$  и  $B$  для решения линейного обыкновенного дифференциального уравнения определим в виде

$$\Xi(0, p) = \Xi_1(p) \text{ при } x = 0;$$

$$\Xi(l, p) = \Xi_2(p) \text{ при } x = l.$$

Следовательно, получаем

$$C = (\Xi_1 e^{l\gamma} - \Xi_2) / [2 \text{sh}(l\gamma)];$$

$$B = (\Xi_2 - \Xi_1 e^{-l\gamma}) / [2 \text{sh}(l\gamma)].$$

Решение линейного обыкновенного дифференциального уравнения имеет вид

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p) \text{sh}[(l-x)\gamma] + \Xi_2(p) \text{sh}(x\gamma)\} / \text{sh}(l\gamma). \quad (9)$$

Уравнения для сил, действующих на торцах электроупругого актюатора, будут иметь вид

$$\begin{aligned} T_j(0, p) S_0 &= F_1(p) + M_1 p^2 \Xi_1(p) \text{ при } x = 0; \\ T_j(l, p) S_0 &= -F_2(p) - M_2 p^2 \Xi_2(p) \text{ при } x = l. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем систему уравнений для механических напряжений на торцах электроупругого актюатора при  $x = 0$  и  $x = l$  в виде

$$\begin{aligned} T_j(0, p) &= \frac{1}{s_{ij}^E} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{d_{mi}}{s_{ij}^E} E_m(p); \\ T_j(l, p) &= \frac{1}{s_{ij}^E} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=l} - \frac{d_{mi}}{s_{ij}^E} E_m(p). \end{aligned} \quad (11)$$

Из системы (11) получаем следующую систему уравнений для структурно-параметрической модели электроупругого актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте с управлением по напряжению и для параметрической структурной схемы (рис. 1):

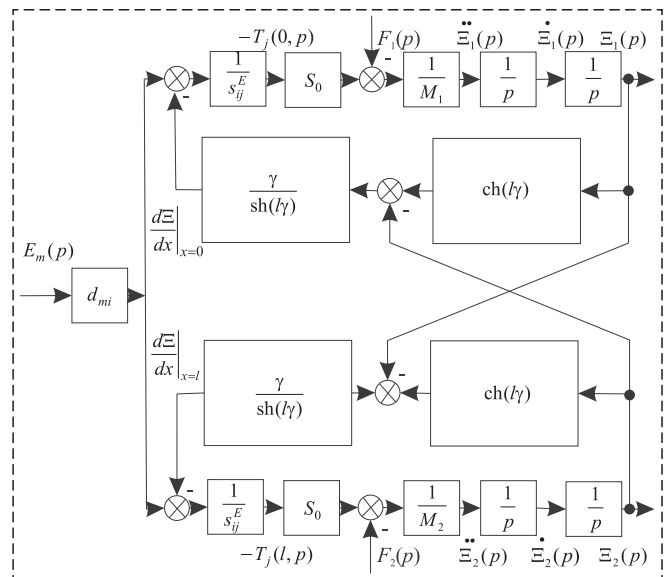


Рис. 1. Параметрическая структурная схема электроупругого актюатора с управлением по напряжению при нулевом сопротивлении источника

Fig. 1. Parametric structural scheme of electroelastic actuator with voltage control at zero source resistance

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1/\chi_{ij}^E)[d_{mi}E_m(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1/\chi_{ij}^E)[d_{mi}E_m(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]\},\end{aligned}\quad (12)$$

причем  $\chi_{ij}^E = s_{ij}^E/S_0$ .

В результате преобразований получаем следующую систему уравнений структурно-параметрической модели электроупругого актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте с управлением по напряжению:

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/M_1 p^2] \{-F_1(p) + (1/\chi_{ij}^E)[d_{mi}E_m(p) - \\ &- \gamma\Xi_1(p)/\text{th}(l\gamma) + \gamma\Xi_2(p)/\text{sh}(l\gamma)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/M_2 p^2] \{-F_2(p) + (1/\chi_{ij}^E)[d_{mi}E_m(p) - \\ &- \gamma\Xi_2(p)/\text{th}(l\gamma) + \gamma\Xi_1(p)/\text{sh}(l\gamma)]\}.\end{aligned}\quad (13)$$

Уравнения (12) для структурно-параметрической модели электроупругого актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте с управлением по напряжению преобразуются к виду

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + C_{ij}^E l[d_{mi}E_m(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + C_{ij}^E l[d_{mi}E_m(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]\},\end{aligned}\quad (14)$$

где  $C_{ij}^E = S_0/(s_{ij}^E l) = 1/(\chi_{ij}^E l)$  — жесткость актюатора при обобщенном пьезоэффекте с управлением по напряжению.

Структурно-параметрическая модель электроупругого актюатора при обобщенном пьезоэффекте для наномехатронных систем позволяет получить его передаточные функции. Совместное решение уравнений (12) для перемещений двух граней электроупругого актюатора при обобщенном пьезоэффекте с управлением по напряжению дает систему

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= W_{11}(p)E_m(p) + \\ &+ W_{12}(p)F_1(p) + W_{13}(p)F_2(p); \\ \Xi_2(p) &= W_{21}(p)E_m(p) + \\ &+ W_{22}(p)F_1(p) + W_{23}(p)F_2(p)\end{aligned}\quad (15)$$

и матричное уравнение вида

$$\begin{pmatrix} \Xi_1(p) \\ \Xi_2(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_m(p) \\ F_1(p) \\ F_2(p) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где обобщенные передаточные функции имеют вид

$$\begin{aligned}W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/E_m(p) = \\ &= d_{mi}[M_2 \chi_{ij}^E p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij}, \chi_{ij}^E = s_{ij}^E/S_0; \\ A_{ij} &= M_1 M_2 (\chi_{ij}^E)^2 p^4 + \\ &+ \{(M_1 + M_2)\chi_{ij}^E/[c^E \text{th}(l\gamma)]\}p^3 + \\ &+ [(M_1 + M_2)\chi_{ij}^E \alpha/\text{th}(l\gamma) + 1/(c^E)^2]p^2 + \\ &+ 2\alpha p/c^E + \alpha^2; \\ W_{21}(p) &= \Xi_2(p)/E_m(p) = \\ &= d_{mi}[M_1 \chi_{ij}^E p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij}; \\ W_{12}(p) &= \Xi_1(p)/F_1(p) = \\ &= -\chi_{ij}^E [M_2 \chi_{ij}^E p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}; \\ W_{13}(p) &= \Xi_1(p)/F_2(p) = \\ &= W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) = [\chi_{ij}^E \gamma/\text{sh}(l\gamma)]/A_{ij}; \\ W_{23}(p) &= \Xi_2(p)/F_2(p) = \\ &= -\chi_{ij}^E [M_1 \chi_{ij}^E p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}.\end{aligned}$$

Рассмотрим влияние реакции электроупругого актюатора из-за создания актюатором противоэлектродвижущей силы за счет прямого обобщенного пьезоэффекта при статической деформации актюатора. Максимальные усилие  $F_{\max}$  и механическое напряжение  $T_{j\max}$ , которые развивает пьезоактюатор при обобщенном пьезоэффекте при питании от источника напряжения, равны

$$\begin{aligned}F_{\max} &= U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E}; \quad \frac{F_{\max}}{S_0} s_{ij}^E = E_m d_{mi}; \\ T_{j\max} s_{ij}^E &= E_m d_{mi}.\end{aligned}$$

Следовательно,

$$T_{j\max} = E_m d_{mi}/s_{ij}^E; \quad F_{\max} = E_m d_{mi} S_0/s_{ij}^E. \quad (17)$$

Оценим максимальное усилие  $F_{\max}$  и максимальное механическое напряжение  $T_{j\max}$ , которые развивает пьезоактюатор при питании от источника тока и обобщенном пьезоэффекте, с учетом положительной обратной связи по усилию из-за прямого пьезоэффекта:

$$\begin{aligned}F_{\max} &= U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E} + \\ &+ F_{\max} \frac{1}{S_0} d_{mi} S_p \frac{1}{\varepsilon_{mk}^T S_p / \delta} \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E};\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{F_{\max}}{S_0} s_{ij}^E \left( 1 - \frac{d_{mi}^2}{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E} \right) &= E_m d_{mi}; \\ T_{j\max} (1 - k_{mi}^2) s_{ij}^E &= E_m d_{mi}; \\ k_{mi} &= d_{mi} / \sqrt{s_{ij}^E \varepsilon_{mk}^T}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $k_{mi}$  — обобщенный коэффициент электро-механической связи; для поперечного, продольного и сдвигового пьезоэффектов для пьезокерамики марок ЦТС или PZT  $i = j$ ,  $m = k$ , поэтому  $k_{mi} = d_{mi} / \sqrt{s_{ii}^E \varepsilon_{mm}^T}$  — коэффициент электро-механической связи.

Следовательно,

$$\begin{aligned} T_{j\max} s_{ij}^D &= E_m d_{mi}; s_{ij}^D = (1 - k_{mi}^2) s_{ij}^E = k_s s_{ij}^E; \\ k_s &= 1 - k_{mi}^2 = s_{ij}^D / s_{ij}^E, k_s > 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $k_s$  — коэффициент изменения упругой податливости.

Таким образом,

$$\begin{aligned} F_{\max} &= E_m d_{mi} S_0 / (s_{ij}^E k_s) = E_m d_{mi} S_0 / s_{ij}^D; \\ T_{j\max} &= E_m d_{mi} / s_{ij}^D. \end{aligned} \quad (21)$$

Для упругих податливостей  $s_{ij}$  пьезоактюаторов справедливо  $s_{ij}^E > s_{ij} > s_{ij}^D$ , причем  $s_{ij}^E / s_{ij}^D \leq 1, 2$ . Соответственно, имеем  $C_{ij}^E = S_0 / (s_{ij}^E l)$  — жесткость пьезоактюатора с управлением по напряжению,  $C_{ij}^D = S_0 / (s_{ij}^D l)$  — жесткость пьезоактюатора с управлением по току, причем  $C_{ij}^E < C_{ij} < C_{ij}^D$ , где  $C_{ij} = S_0 / (s_{ij} l)$  — жесткость пьезоактюатора [10, 11]. При разомкнутых электродах жесткость пьезоактюатора возрастает по сравнению с его жесткостью при замкнутых электродах. Увеличение сопротивления источника питания и согласующих цепей приводит к уменьшению упругой податливости и увеличению жесткости пьезоактюатора для наномехатронных систем.

При управлении пьезоактюатора при обобщенном пьезоэффекте от источника питания с конечным сопротивлением источника с учетом положительной обратной связи по усилию из-за прямого пьезоэффекта получаем максимальное усилие пьезоактюатора

$$\begin{aligned} F_{\max} &= U \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E} + \\ &+ F_{\max} \frac{1}{S_0} d_{mi} S_p \frac{1}{\varepsilon_{mk}^T S_p / \delta} k_u \frac{1}{\delta} d_{mi} \frac{S_0}{s_{ij}^E}, \end{aligned} \quad (22)$$

откуда

$$\frac{F_{\max}}{S_0} s_{ij}^E \left( 1 - \frac{d_{mi}^2 k_u}{\varepsilon_{mk}^T s_{ij}^E} \right) = E_m d_{mi}; k_{mi} = d_{mi} / \sqrt{s_{ij}^E \varepsilon_{mk}^T},$$

причем для пьезокерамики марок ЦТС или PZT  $i = j$ ,  $m = k$ , поэтому  $k_{mi} = d_{mi} / \sqrt{s_{ii}^E \varepsilon_{mm}^T}$  — коэффициент электро-механической связи,

$$T_{j\max} (1 - k_{mi}^2 k_u) s_{ij}^E = E_m d_{mi}, 0 \leq k_u \leq 1, \quad (23)$$

где  $k_u$  — коэффициент управления от электрического источника питания.

При управлении пьезоактюатора от источника тока имеем  $k_u|_{R \rightarrow \infty} = 1$ , при управлении пьезоактюатора от источника напряжения получаем  $k_u|_{R \rightarrow 0} = 0$ , причем

$$\begin{aligned} s_{ij} &= (1 - k_{mi}^2 k_u) s_{ij}^E = k_s s_{ij}^E, k_s = 1 - k_{mi}^2 k_u, k_s > 0, \\ (1 - k_{mi}^2)|_{R \rightarrow \infty} &\leq k_s \leq 1|_{R \rightarrow 0}; \\ k_s|_{R \rightarrow \infty} &= 1 - k_{mi}^2; k_s|_{R \rightarrow 0} = 1, \end{aligned} \quad (24)$$

где  $k_s$  — коэффициент изменения упругой податливости.

При управлении пьезоактюатора с обобщенным пьезоэффектом от источника питания с конечным сопротивлением источника получаем выражения для положительных обратных связей по усилию в структурно-параметрической модели пьезоактюатора (рис. 2) в виде

$$U_{F\alpha}(p) = \frac{k_u(l/\delta)d_{mi}}{C_0} F_{\alpha}(p), \alpha = 1, 2, \quad (25)$$

причем при управлении по току от источника с бесконечно большим сопротивлением имеем  $k_u|_{R \rightarrow \infty} = 1$ .

После преобразований получаем структурно-параметрическую модель электроупругого актюатора при управлении по току и передаточные функции актюатора. При управлении по току получаем систему уравнений для механических напряжений в электроупругом актюаторе при  $x = 0$  и  $x = l$ :

$$\begin{aligned} T_j(0, p) &= \frac{1}{s_{ij}^D} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{g_{mi}^D}{s_{ij}^D} D_m(p); \\ T_j(l, p) &= \frac{1}{s_{ij}^D} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=l} - \frac{g_{mi}^D}{s_{ij}^D} D_m(p) \end{aligned} \quad (26)$$

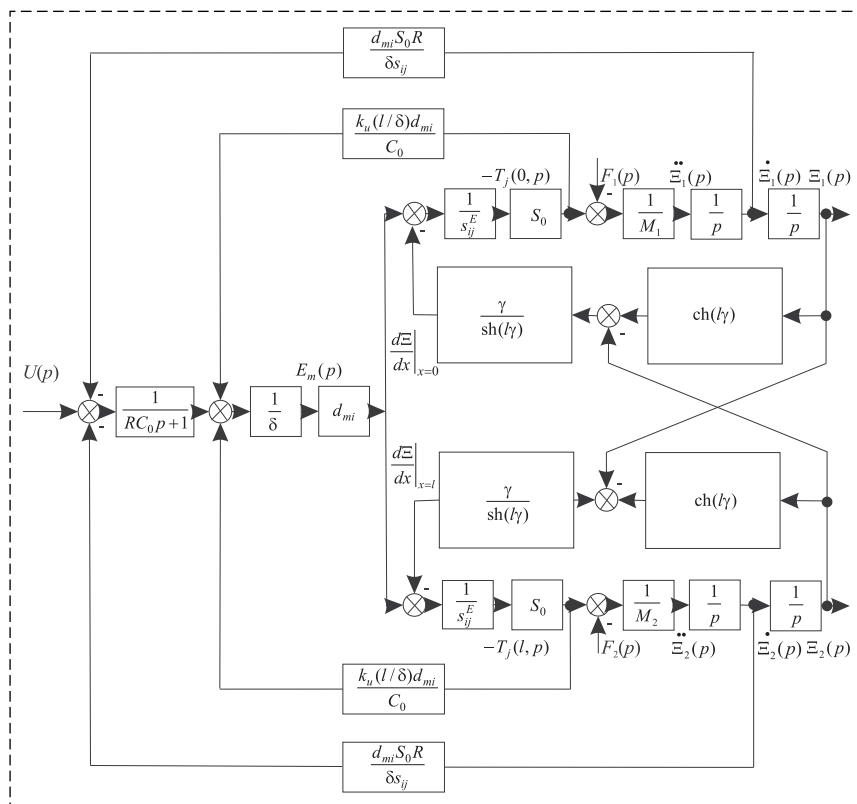


Рис. 2. Параметрическая структурная схема электроупругого актюатора с управлением по напряжению при конечном сопротивлении источника  
Fig. 2. Parametric structural scheme of electroelastic actuator with voltage control at finite source resistance

где передаточные функции имеют вид

$$\begin{aligned}
 W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/D_m(p) = \\
 &= g_{mi}[M_2\chi_{ij}^D p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij}, \\
 \chi_{ij}^D &= s_{ij}^D/S_0; \\
 A_{ij} &= M_1 M_2 (\chi_{ij}^D)^2 p^4 + \\
 &+ \{(M_1 + M_2)\chi_{ij}^D/[c^D \text{th}(l\gamma)]\} p^3 + \\
 &+ [(M_1 + M_2)\chi_{ij}^D \alpha/\text{th}(l\gamma) + \\
 &+ 1/(c^D)^2] p^2 + 2\alpha p/c^D + \alpha^2; \\
 W_{21}(p) &= \Xi_2(p)/D_m(p) = \\
 &= g_{mi}[M_1\chi_{ij}^D p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij}; \\
 W_{12}(p) &= \Xi_1(p)/F_1(p) = \\
 &= -\chi_{ij}^D[M_2\chi_{ij}^D p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}; \\
 W_{13}(p) &= \Xi_1(p)/F_2(p) = \\
 &= W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) = \\
 &= [\chi_{ij}^D \gamma/\text{sh}(l\gamma)]/A_{ij}; \\
 W_{23}(p) &= \Xi_2(p)/F_2(p) = \\
 &= -\chi_{ij}^D[M_1\chi_{ij}^D p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}.
 \end{aligned}$$

и систему уравнений для структурно-параметрической модели актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте с управлением по току:

$$\begin{aligned}
 \Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)]\{-F_1(p) + (1/\chi_{ij}^D)[g_{mi}D_m(p) - \\
 &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\
 \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)]\{-F_2(p) + (1/\chi_{ij}^D)[g_{mi}D_m(p) - \\
 &- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)][\text{ch}(l\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\},
 \end{aligned} \quad (27)$$

причем  $\chi_{ij}^D = s_{ij}^D/S_0$ .

Отсюда при обобщенном пьезоэффекте с управлением по току получаем систему

$$\begin{aligned}
 \Xi_1(p) &= W_{11}(p)D_m(p) + \\
 &+ W_{12}(p)F_1(p) + W_{13}(p)F_2(p); \\
 \Xi_2(p) &= W_{21}(p)D_m(p) + \\
 &+ W_{22}(p)F_1(p) + W_{23}(p)F_2(p)
 \end{aligned} \quad (28)$$

и матричное уравнение вида

$$\begin{pmatrix} \Xi_1(p) \\ \Xi_2(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_m(p) \\ F_1(p) \\ F_2(p) \end{pmatrix}, \quad (29)$$

С учетом параметра  $\Psi = E, D$  управления и обобщенной рабочей длины  $l = (\delta, h, b)$  электроупругого актюатора для наномехатронных систем записываем матричное уравнение в общем виде:

$$\begin{pmatrix} \Xi_1(p) \\ \Xi_2(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_m(p) \\ F_1(p) \\ F_2(p) \end{pmatrix} \quad (30)$$

и передаточные функции в общем виде:

$$\begin{aligned}
 W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/E_1(p) = \\
 &= d_{mi}[M_2\chi_{ij}^\Psi p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij}; \\
 A_{ij} &= M_1 M_2 (\chi_{ij}^\Psi)^2 p^4 + \\
 &+ \{(M_1 + M_2)\chi_{ij}^\Psi/[c^\Psi \text{th}(l\gamma)]\} p^3 + \\
 &+ [(M_1 + M_2)\chi_{ij}^\Psi \alpha/\text{th}(l\gamma) + \\
 &+ 1/(c^\Psi)^2] p^2 + 2\alpha p/c^\Psi + \alpha^2; \\
 W_{21}(p) &= \Xi_2(p)/E_m(p) = \\
 &= d_{mi}[M_1\chi_{ij}^\Psi p^2 + \gamma \text{th}(l\gamma/2)]/A_{ij};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{12}(p) &= \Xi_1(p)/F_1(p) = \\
&= -\chi_{ij}^\Psi [M_2 \chi_{ij}^\Psi p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}; \\
W_{13}(p) &= \Xi_1(p)/F_2(p) = \\
&= W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) = [\chi_{ij}^\Psi \gamma/\text{sh}(l\gamma)]/A_{ij}; \\
W_{23}(p) &= \Xi_2(p)/F_2(p) = \\
&= -\chi_{ij}^\Psi [M_1 \chi_{ij}^\Psi p^2 + \gamma/\text{th}(l\gamma)]/A_{ij}; \\
\chi_{ij}^\Psi &= s_{ij}^\Psi / S_0, \nu_{mi} = \begin{cases} d_{33}, d_{31}, d_{15} \\ g_{33}, g_{31}, g_{15} \end{cases}, \Psi_m = \begin{cases} E_3, E_1 \\ D_3, D \end{cases}, \\
s_{ij}^\Psi &= \begin{cases} s_{33}^E, s_{11}^E, s_{55}^E \\ s_{33}^D, s_{11}^D, s_{55}^D \end{cases}, c^\Psi = \begin{cases} c^E \\ c^D \end{cases}, \gamma = \begin{cases} \gamma^E \\ \gamma^D \end{cases}.
\end{aligned}$$

Следовательно, система уравнений для структурно-параметрической модели и структурной схемы (рис. 2) электроупругого актюатора при обобщенном пьезоэффекте имеет вид

$$\begin{aligned}
\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1/\chi_{ij}^\Psi) [d_{mi} \Psi_m(p) - \\
&- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)] [\text{ch}(l\gamma) \Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\
\Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1/\chi_{ij}^\Psi) [d_{mi} \Psi_m(p) - \\
&- [\gamma/\text{sh}(l\gamma)] [\text{ch}(l\gamma) \Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\},
\end{aligned} \quad (31)$$

причем  $\chi_{ij}^\Psi = s_{ij}^\Psi / S_0$ .

Для учета влияния скорости электроупругого актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте за счет возникновения противоэлектродвижущей силы из-за прямого пьезоэффекта структурно-параметрическую модель и параметрическую структурную схему (рис. 2) актюатора дополняем отрицательными обратными связями

$$U_{\Xi\alpha}(p) = \frac{d_{mi} S_0 R}{\delta s_{ij}} \dot{\Xi}_\alpha(p), \alpha = 1, 2. \quad (32)$$

Из выражений (31) получаем для наномехатронных систем передаточные функции электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, в диапазоне частот  $0 < \omega < 0,01 c^\Psi/l$  при  $M_2/m \gg 1$ , инерционной нагрузке и управлению по напряжению или току в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_m(p)} = \frac{d_{mi} l}{(T_{ij}^\Psi)^2 p^2 + 2T_{ij}^\Psi \xi_{ij}^\Psi p + 1}; \quad (33)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = -\frac{1/C_{ij}^\Psi}{(T_{ij}^\Psi)^2 p^2 + 2T_{ij}^\Psi \xi_{ij}^\Psi p + 1}; \quad (34)$$

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{mi}(l/\delta)}{(T_{ij}^\Psi)^2 p^2 + 2T_{ij}^\Psi \xi_{ij}^\Psi p + 1}; \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
T_{ij}^\Psi &= \sqrt{M_2 s_{ij}^\Psi l / S_0} = \sqrt{M_2 / C_{ij}^\Psi}; \\
C_{ij}^\Psi &= S_0 / (s_{ij}^\Psi l), \xi_{ij}^\Psi = \alpha \delta \sqrt{m / M_2} / 3,
\end{aligned}$$

где  $T_{ij}^\Psi = T_{ij}^E, T_{ij}^D$ ,  $\xi_{ij}^\Psi = \xi_{ij}^E, \xi_{ij}^D$ ,  $C_{ij}^\Psi = C_{ij}^E, C_{ij}^D$ ,  $s_{ij}^\Psi = s_{ij}^E, s_{ij}^D$  — постоянная времени, коэффициент затухания, жесткость и упругая податливость актюатора в соответствии с  $\Psi = E, D$  — параметром управления, где  $E$  — напряженность электрического поля;  $D$  — электрическая индукция.

Соответственно, при управлении электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, при обобщенном пьезоэффекте и питании от источника напряжения с конечным сопротивлением источника записываем для учета изменения упругой податливости и жесткости актюатора выражение для положительной обратной связи по усилию в виде

$$U_F(p) = \frac{k_u(l/\delta) d_{mi}}{C_0} F_2(p), \quad (36)$$

причем при управлении актюатором по току от источника тока с бесконечно большим сопротивлением имеем  $k_u|_{R \rightarrow \infty} = 1$ , при управлении актюатором по напряжению от источника напряжения при нулевом сопротивлении источника получаем  $k_u|_{R \rightarrow 0} = 0$ .

Для учета противоэлектродвижущей силы из-за прямого пьезоэффекта структурно-параметрическую модель и параметрическую структурную схему электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте и питании от источника напряжения с конечным сопротивлением источника дополняем отрицательной обратной связью

$$U_{\Xi}(p) = \frac{d_{mi} S_0 R}{\delta s_{ij}} \dot{\Xi}_2(p). \quad (37)$$

Рассмотрим для наномехатронных систем параметрические структурные схемы с распределенными и с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом при упругоинерционной нагрузке, с управлением по напряжению при конечном сопротивлении источника. Из выражений (13) и (15) для электроупругого актюатора с одним жестко закрепленным торцом при упруго-инерционной нагрузке при  $M_1 \rightarrow \infty$  получаем его параметрическую структурную схему с распределенными параметрами, по-

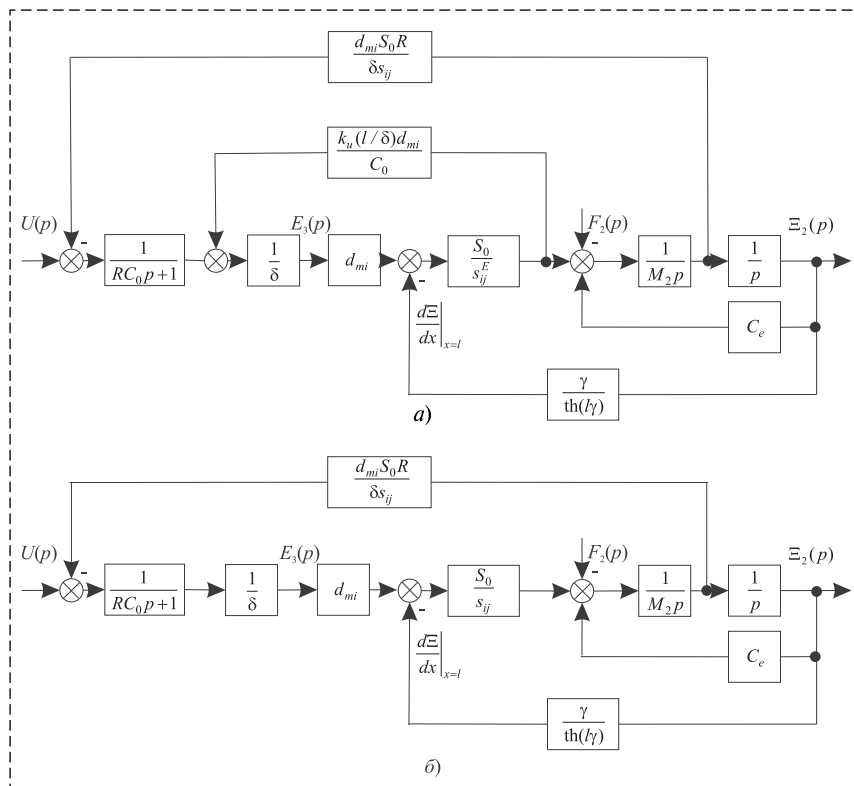


Рис. 3. Параметрическая структурная схема с распределенными параметрами электроупругого актюатора с закрепленным одним торцом при упруго-инерционной нагрузке, с управлением по напряжению при конечном сопротивлении источника:

*a* — исходная структурная схема; *б* — преобразованная структурная схема  
 Fig. 3. Parametric structural scheme with distributed parameters of electroelastic actuator, fixed at one end, with elastic-inertial load, with voltage control at finite source resistance:  
*a* — initial structural scheme; *б* — transformed structural diagram

казанную на рис. 3, *a*. После структурных преобразований исходной схемы на рис. 3, *a* с положительной обратной связью по усилию получаем преобразованную структурную схему актюатора на рис. 3, *б* с упругой податливостью  $s_{ij} = (1 - k_{mi}^2 k_u) s_{ij}^E$ .

После замены гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда и использова-

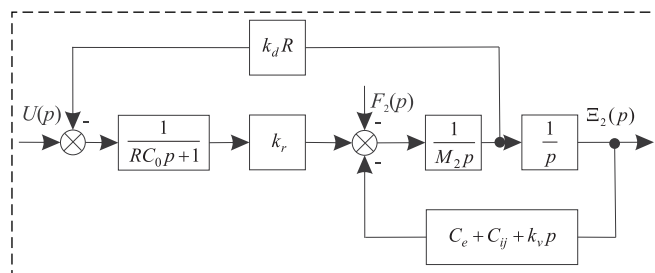


Рис. 4. Параметрическая структурная схема с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора с закрепленным одним торцом при упруго-инерционной нагрузке, с управлением по напряжению при конечном сопротивлении источника  
 Fig. 4. Parametric structural scheme with lumped parameters of electroelastic actuator, fixed at one end, with an elastic-inertial load, with voltage control at finite source resistance

ния в схеме (рис. 3, *б*) коэффициента  $k_d$  прямого электроупругого эффекта и коэффициента  $k_r$  обратного электроупругого эффекта

$$k_d = k_r = \frac{d_{mi} S_0}{\delta s_{ij}} \quad (38)$$

получаем параметрическую структурную схему с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора с одним жестко закрепленным торцом при упруго-инерционной нагрузке при  $M_1 \rightarrow \infty$  (рис. 4).

Следовательно, для наномехатронных систем получаем параметрическую структурную схему с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора с закрепленным одним торцом при упруго-инерционной нагрузке, показанную на рис. 5, *a*. Из данной структурной схемы с сосредоточенными параметрами для электроупругого актюатора с учетом противоэлектродвижущей силы при упруго-инерционной нагрузке находим передаточную функцию актюатора в виде

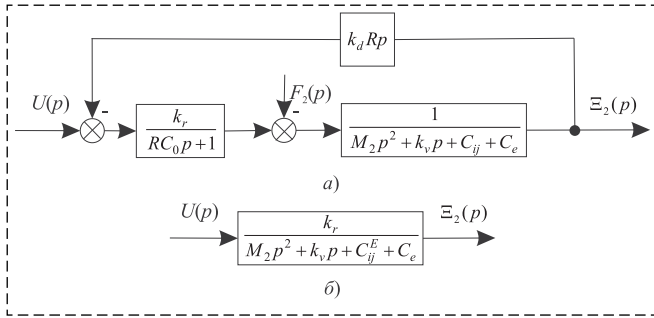
$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{k_r}{RC_0 M_2 p^3 + (M_2 + RC_0 k_v) p^2 + (k_v + RC_0 C_{ij} + RC_0 C_e + R k_r k_d) p + C_{ij} + C_e}, \quad (39)$$

где  $C_{ij} = S_0 / (s_{ij} l)$  — жесткость актюатора, причем  $C_{ij}^E < C_{ij} < C_{ij}^D$ ,  $k_v$  — коэффициент демпфирования электроупругого актюатора.

Из соотношения (39) в статическом режиме работы электроупругого актюатора при упругоинерционной нагрузке (рис. 5, *a*) получаем выражение установившегося перемещения торца актюатора в виде

$$\xi_0 = \frac{d_{mi} (l / \delta) u_0}{1 + C_e / C_{ij}}. \quad (40)$$

После преобразования выражения (38) при  $R k_r k_d \ll k_v$  или  $R k_r^2 \ll k_v$  получаем переда-



**Рис. 5. Структурная схема с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора с закрепленным одним торцом при упруго-инерционной нагрузке, с управлением по напряжению:**  
 а — при конечном сопротивлении источника; б — при нулевом сопротивлении источника

**Fig. 5. Parametric structural scheme with lumped parameters of electroelastic actuator fixed at one end, with elastic-inertial load, with voltage control:**

а — at finite source resistance; б — at zero source resistance

точную функцию электроупругого актюатора в виде

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{k_r}{(RC_0 p + 1)(M_2 p^2 + k_v p + C_{ij}^E + C_e)}. \quad (41)$$

Для структурной схемы электроупругого актюатора (рис. 5, б) для наномехатронных систем при  $R = 0$  определяем следующее выражение для передаточной функции актюатора:

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{k_r}{M_2 p^2 + k_v p + C_{ij}^E + C_e} = \frac{k_r / (C_{ij}^E + C_e)}{((M_2 / (C_{ij}^E + C_e)) p^2 + (k_v / (C_{ij}^E + C_e)) p + 1)}. \quad (42)$$

откуда после преобразований получаем передаточную функцию актюатора в виде

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}(h/\delta)}{(1 + C_e / C_{ij}^E)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)}; \quad (43)$$

$$T_t = \sqrt{M_2 / (C_{ij}^E + C_e)};$$

$$\xi_t = k_v / (2(C_{ij}^E + C_e) \sqrt{M_2 (C_{ij}^E + C_e)});$$

$$C_{ij}^E = S_0 / (s_{ij}^E l) = 1 / (\chi_{ij}^E l).$$

Следовательно, передаточная функция пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению при  $R = 0$  имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{31} h / \delta}{(1 + C_e / C_{11}^E)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)}; \quad (44)$$

$$T_t = \sqrt{M_2 / (C_e + C_{11}^E)};$$

$$\xi_t = \alpha h^2 C_{11}^E / (3c^E \sqrt{M(C_e + C_{11}^E)});$$

$$C_{11}^E = S_0 / (s_{11}^E h) = 1 / (\chi_{11}^E h),$$

где  $\Xi_2(p)$ ,  $U(p)$  — преобразования Лапласа перемещения торца и напряжения на обкладках пьезоактюатора;  $\delta$  — толщина;  $h$  — высота пьезоактюатора;  $T_t$ ,  $\xi_t$  — постоянная времени и коэффициент затухания пьезоактюатора.

Из соотношения (43), используя обратное преобразование Лапласа, получаем выражение переходной характеристики пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению

$$\xi(t) = \xi_0 \left[ 1 - \frac{e^{-\frac{\xi_t t}{T_t}}}{\sqrt{1 - \xi_t^2}} \sin(\omega_t t + \varphi_t) \right]; \quad (45)$$

$$\xi_0 = \frac{d_{31}(h/\delta) u_0}{1 + C_e / C_{11}^E}; \quad \omega_t = \sqrt{1 - \xi_t^2} / T_t;$$

$$\varphi_t = \arctg(\sqrt{1 - \xi_t^2} / \xi_t),$$

где  $\xi_0$  — установившееся перемещение;  $u_0$  — амплитуда напряжения.

Для пьезоактюатора из пьезокерамики марки ЦТС при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению с одним жестко закрепленным торцом при упругоинерционной нагрузке для  $M_1 \rightarrow \infty$ ,  $m \ll M_2$  и ступенчатом входном напряжении амплитудой  $u_0 = 25$  В при  $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$  м/В,  $h/\delta = 20$ ,  $M_2 = 1$  кг,  $C_{11}^E = 2 \cdot 10^7$  Н/м,  $C_e = 0,5 \cdot 10^7$  Н/м получаем  $\xi_0 = 80$  нм,  $T_t = 0,2 \cdot 10^{-3}$  с.

## Заключение

В работе определены структурно-параметрические модель и параметрическая структурная схема электроупругого актюатора для наномехатронных систем при обобщенном пьезоэффекте с учетом противоэлектродвижущей силы из-за прямого пьезоэффекта. Получены

структурно-параметрические модели электроупругих актюаторов для наномехатронных систем при поперечном, продольном, сдвиговом и обобщенном пьезоэффектах, управлении по напряжению или току.

Структурно-параметрические модели и параметрические структурные схемы с обратными связями для электроупругих актюаторов для наномехатронных систем наглядно отображают преобразование электрической энергии в механическую энергию актюатора. В зависимости от вида управления актюатора по напряжению или току показано изменение его структурно-параметрической модели и параметрической структурной схемы.

Определены максимальные усилия и механические напряжения, которые развивает пьезоактюатор для наномехатронных систем при поперечном, продольном, сдвиговом, обобщенном пьезоэффектах. Найдены упругие податливости и жесткости пьезоактюатора при поперечном, продольном, сдвиговом и обобщенном пьезоэффектах в зависимости от вида управления в наномехатронной системе по напряжению или току. Получены передаточные функции пьезоактюаторов при поперечном, продольном, сдвиговом и обобщенном пьезоэффектах, управлении по напряжению или току.

## Список литературы

1. **Schultz J., Ueda J., Asada H.** Cellular Actuators. Oxford: Butterworth-Heinemann Publisher, 2017. 382 p.
2. **Cady W. G.** Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1946. 806 p.
3. **Afonin S. M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement. Chapter 9. Editor: Parinov I. A. Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications. New York: Nova Science Publisher, 2015. P. 225–242.
4. **Никольский А. А.** Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
5. **Панич А. Е.** Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2008. 159 с.
6. **Афонин С. М.** Структурно-параметрическая модель пьезопреобразователя наноперемещений // Доклады академии наук. 2008. Т. 419. № 1. С. 47–53.
7. **Афонин С. М.** Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актюаторов наноперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 39–45.
8. **Mason W.** ed. Physical acoustics: Principles and methods. Vol. 1. Part A. Methods and devices. New York: Academic Press, 1964. 515 p.
9. **Полянин А. Д.** Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
10. **Afonin S. M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system. Chapter 8. Editors: Bartul Z., Trenor J. Advances in Nanotechnology. Vol. 19. New York: Nova Science Publisher, 2017. P. 259–284.
11. **Афонин С. М.** Параметрические структурные схемы пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 2. С. 112–121.
12. **Афонин С. М.** Многомерные структурно-параметрическая модель и схема многослойного электромагнитоупругого актюатора нано- и микроперемещений // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 2. С. 95–110.

## Structural Schemes and Structural-Parametric Models of Electroelastic Actuators for Nanomechatronics Systems

**S. M. Afonin**, eduems@mail.ru,

National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

*Corresponding author: Afonin Sergei M., Ph. D. Senior Researcher, Associate Professor, National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, e-mail: eduems@mail.ru*

*Accepted on December 25, 2018*

### Abstract

*The parametric structural schemes, structural-parametric models and the transfer functions of the electroelastic actuators for the nanomechatronics systems are obtained. The transfer functions of the piezoactuator are determined under the generalized piezoelectric effect. The changes in the elastic compliance and the stiffness of the piezoactuator are found, taking into account the type of control. The decision wave equation and the structural-parametric models of the electroelastic actuators are obtained. Effects of the geometric and physical parameters of the electroelastic actuators and the external load on its static and dynamic characteristics are determined. The parametric structural schemes for the electroelastic actuators for the nanomechatronics systems are obtained. The transfer functions are determined. For calculation of the automatic control systems for the nanometric movements with the electroelastic actuators are obtained the parametric structural schemes and the transfer functions of actuators. Static and dynamic characteristics of the electroelastic actuators are determined. The application of electroelastic actuators solves problems of the precise matching in microelectronics and nanotechnology, compensation of temperature and gravitational deformations, atmospheric turbulence by wave front correction. By solving the wave equation with allowance for the corresponding equations of the piezoelectric effect, the boundary conditions on loaded working surfaces of the electroelastic actuator, the strains along the coordinate axes, it is possible to construct the structural parametric model of the actuator. The transfer functions and the parametric structural schemes of the electroelastic actuator are obtained from the equations describing the corresponding structural parametric models and taking into account the opposed electromotive force of the electroelastic actuator for the nanomechatronics systems.*

**Keywords:** parametric structural scheme, electroelastic actuator, piezoactuator, structural-parametric model, transfer function

For citation:

**Afonin S. M.** Structural Schemes and Structural-Parametric Models of Electroelastic Actuators for Nanomechanics Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 219–229.

DOI: 10.17587/mau.20.219-229

#### References

1. **Schultz J., Ueda J., Asada H.** Cellular Actuators, Oxford, Butterworth-Heinemann Publisher, 2017, 382 p.
2. **Cady W. G.** Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals, New York, London, McGraw-Hill Book Company, 1946, 806 p.
3. **Afonin S. M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement, Chapter 9, Parinov I. A. ed., *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*, New York, Nova Science Publisher, 2015, pp. 225–242.
4. **Nikolsky A. A.** *Tochnye dvukhkanal'nye sledyashhie jelektroprivody s p'ezokompensatorami* (Precise two-channel servo drives with piezocompensators), Moscow, Energoatomizdat, 1988, 160 p. (in Russian).
5. **Panich A. E.** *P'ezokeramicheskie aktjatory* (Piezoceramic actuators.), Rostov-on-Don, Southern Federal University, 2008, 159 p. (in Russian).

6. **Afonin S. M.** Structural parametric model of a piezoelectric nanodisplacement transducer, *Doklady physics*, New York, Pleiades publishing, Inc., Springer, 2008. vol. 53, no. 3, pp. 137–143.
7. **Afonin S. M.** *Reshenie matrichnyh uravnenij v zadachah jelektrourugosti dlja mnogoslojnyh aktjutorov nanoperemeshhenij* (The solution of matrix equations in problems of electroelasticity for a multilayer actuators nanodisplacement), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2010, no. 8, pp. 39–45 (in Russian).
8. **Mason W.** ed. Physical acoustics: Principles and methods, vol. 1, part A. Methods and devices, New York, Academic Press, 1964, 515 p.
9. **Polyanin A. D.** *Spravochnik po lineynym uravneniyam matematicheskoy fiziki* (Handbook of linear partial differential equations), Moscow, Fizmatlit, 2001, 576 p. (in Russian).
10. **Afonin S. M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system, Chapter 8, Bartul Z., Trenor J. ed., *Advances in Nanotechnology*, vol. 19, New York, Nova Science Publisher, 2017, pp. 259–284.
11. **Afonin S. M.** *Parametricheskie strukturnye shemy p'ezoaktjutorov nano- i mikroperemeshhenij pri prodol'nom p'ezoeffekte* (Parametric structural schemes of piezoactuators of nano- and micrometric movements at a longitudinal piezoeffect), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 2. pp. 112–121 (in Russian).
12. **Afonin S. M.** Multidimensional structural parametric model and block diagram of multilayer electro- magneto- elastic actuator of nano and micro displacements, *Journal of computer and systems sciences international*, 2014, vol. 53, no. 2, pp. 239–255.



17—19 июня 2019 года в Москве состоится

## XIII Всероссийское совещание по проблемам управления,

посвященное 80-летию Института проблем управления  
имени В. А. Трапезникова РАН

**Сопредседатели программного комитета:**  
академик РАН Е. А. Микрин и член-корреспондент РАН Д. А. Новиков

#### Цели Совещания

- ознакомить участников с последними достижениями науки и практики управления по разным направлениям исследований и практических разработок;
- выявить основные тенденции и связи между различными направлениями науки об управлении, обсудить сценарные прогнозы их развития;
- выявить в процессе дискуссий проблемы и наиболее перспективные направления теории управления;
- содействовать упрочению связей между представителями различных академических и отраслевых научных центров, вузовской науки и реального сектора экономики;
- обсудить проблемы образования в области управления и задачи, которые ставит перед теорией управления современная практика.

#### Направления работы Совещания:

- ❖ Теория систем управления
- ❖ Управление подвижными объектами и навигация
- ❖ Интеллектуальные системы в управлении
- ❖ Управление в промышленности и логистике
- ❖ Управление системами междисциплинарной природы
- ❖ Средства измерения, вычислений и контроля в управлении
- ❖ Системный анализ и принятие решений в задачах управления
- ❖ Информационные технологии в управлении
- ❖ Проблемы образования в области управления: современное содержание и технологии обучения

Подробная информация о Совещании находится на сайте  
<http://vspu2019.ipu.ru>