

## Передаточные функции электромагнитоупругих актюаторов наноперемещений мехатронных систем

АФОНИН С.М.

*Пьезоактюатор (ПА) — пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение и силу. Получены передаточные функции электромагнитоупругого актюатора для мехатронных систем. На основе решения волнового уравнения построены обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора и его параметрическая структурная схема. Полученные структурно-параметрическая модели, параметрические структурные схемы и передаточные функции ПА определяют динамические и статические характеристики ПА нано- и микроперемещений с учетом граничных условий, физических параметров ПА, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.*

*Ключевые слова: электромагнитоупругий актюатор, деформация, наноперемещения, передаточная функция, структурно-параметрическая модель, параметрическая структурная схема, пьезоактюатор*

Использование электромагнитоупругих актюаторов, работающих на основе электромагнитоупругости (пьезоэлектрического, пьезомагнитного, электрострикционного, магнестрикционного эффектов), перспективно для применения в мехатронике, нанотехнологии, нанобиологии, энергетике, микроэлектронике и адаптивной оптике для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций, а также атмосферной турбулентности путем коррекции волнового фронта. Пьезоактюатор (ПА) — пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение и силу. Пьезоактюаторы имеют высокие значения пьезомодулей и жесткостей, поэтому широко применяются для нано- и микроперемещений. Они работают на основе обратного пьезоэффекта, в котором результат перемещения достигается после приложения электрического напряжения за счет деформации ПА в диапазоне от единиц нанометров до единиц микрометров с погрешностью в пределах десятых долей нанометров [1–8].

Решение волнового уравнения с учетом соответствующего уравнения электромагнитоупругости, граничных условий на двух нагруженных рабочих поверхностях актюатора позволяет получить структурно-параметрическую модель электромагнитоупругого актюатора, на основе которой можно найти его передаточные функции. Для вывода передаточных функций электромагнитоупругого актюатора

мехатронных систем используем структурно-параметрическую модель актюатора в отличие от применения электрических эквивалентных схем пьезопреобразователей [9–11], которые предназначены для расчета пьезоизлучателей и пьезоприемников.

Пьезоактюаторы применяются в линейных нано- и микроприводах и микронасосах, при продольном пьезоэффекте они обеспечивают высокие значения усилий и скорости работы, их применяют в наноманипуляторах для сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), сканирующих силовых микроскопов (ССМ), атомно-силовых микроскопов (АСМ). Наноманипуляторы с ПА при продольном пьезоэффекте применяются в наноробототехнических системах нано- и микроперемещений. В фотонике ПА при продольном пьезоэффекте используют, например, для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при оптических методах передачи информации и энергии, их применяют для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов, для совмещения и сканирования в электронных, зондовых микроскопах, в адаптивной оптике больших телескопов, например, Европейского чрезвычайно большого телескопа (E-ELT) и Большого обзорного телескопа (LSST), коррекции деформации и вибраций корпусов и лопастей, например, вертолетов и самолетов в аэрокосмической технике, космических телескопов, биотехнологий и микропривода инструментов в микрохирургии. Изготавливаются ПА из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца различных марок [1–19].

Деформация ПА соответствует его напряженно-му состоянию [7]. Если в пьезоактуаторе создать механическое напряжение  $T$ , то в нем возникнет деформация  $S$ . Существует шесть составляющих напряжений:  $T_1 \div T_6$ , из них  $T_1 \div T_3$  относятся к напряжениям растяжения-сжатия;  $T_4 \div T_6$  — к напряжениям сдвига. Матричные уравнения состояния [11], связывающие электрические и упругие переменные для поляризованной пьезокерамики, имеют вид:

$$[D]=[d][T]+[\varepsilon^T][E]; \quad (1)$$

$$[S]=[s^E][T]+[d]^t[E]. \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает прямой пьезоэффект, (2) — обратный;  $[D]$  — матрица-столбец электрической индукции по координатным осям;  $[S]$  — матрица-столбец относительных деформаций;  $[d]$  — матрица пьезоэлектрических модулей;  $[T]$  — матрица-столбец механических напряжений;  $[\varepsilon^T]$  — матрица диэлектрических проницаемостей при  $T = \text{const}$ ;  $[E]$  — матрица-столбец напряженности электрического поля по координатным осям;  $[s^E]$  — матрица упругой податливости при  $E = \text{const}$ . Направление оси поляризации  $P$ , т.е. направление, по которому проведена поляризация ПА, обычно для продольного и поперечного пьезоэффектов принимают за направление оси  $3$ .

В общем виде уравнение электромагнитоупругости [11] имеет вид:

$$S_i = s_{ij}^{E,H,\Theta} T_j + d_{mi}^{H,\Theta} E_m + d_{mi}^{E,\Theta} H_m + \alpha_i^{E,H} \Delta\Theta, \quad (3)$$

где  $S_i$  — относительная деформация по оси  $i$ ;  $s_{ij}^{E,H,\Theta}$  — упругая податливость при  $E = \text{const}$ ,  $H = \text{const}$ ,  $\Theta = \text{const}$ ;  $T_j$  — механическое напряжение по оси  $j$ ;  $d_{mi}^{H,\Theta}$  — пьезомодуль;  $E_m$  — напряженность электрического поля по оси  $m$ ;  $d_{mi}^{E,\Theta}$  — коэффициент магнитострикции;  $H_m$  — напряженность магнитного поля по оси  $m$ ;  $\alpha_i^{E,H}$  — коэффициент теплового расширения;  $\Delta\Theta$  — изменение температуры;  $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ;  $m = 1, 2, 3$ .

На рис. 1 ПА при продольном пьезоэффекте представляет пьезопластину толщиной  $\delta$  с электродами, нанесенными на грани, перпендикулярные оси  $3$ , площадь которых равна  $S_0$ . Для составления структурно-параметрической модели ПА с управлением по напряжению решим совместно волновое уравнение, уравнение обратного продольного пьезоэффекта и уравнения сил на гранях ПА. При расчете ПА используется волновое уравнение

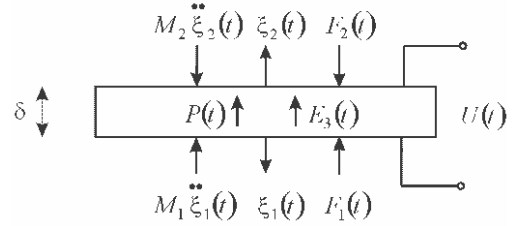


Рис. 1. Кинематическая схема пьезоактуатора при продольном пьезоэффекте

[11–16], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений:

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} + \alpha^2 \xi(x,t) = \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где  $c^E$  — скорость распространения упругой волны при  $E = \text{const}$ ;  $\alpha$  — коэффициент затухания колебаний из-за рассеивания энергии на тепловые потери при распространении волны в ПА.

С помощью преобразования Лапласа [12] исходная задача для уравнения с частными производными гиперболического типа — волнового уравнения (4) — сводится к более простой задаче для линейного дифференциального уравнения с параметром преобразования  $p$ .

Применим к (4) преобразование Лапласа, полагая начальные условия нулевыми:

$$\frac{\partial^2 \Xi(x,p)}{\partial x^2} - \left[ \frac{1}{(c^E)^2} p^2 + \frac{2\alpha}{c^E} p + \alpha^2 \right] \Xi(x,p) = 0, \quad (5)$$

решением которого будет функция

$$\Xi(x,p) = Ce^{-x\gamma} + Be^{x\gamma}, \quad (6)$$

где  $\Xi(x,p)$  — преобразование Лапласа смещения сечения ПА;  $\gamma = p/c^E + \alpha$  — коэффициент распространения. Определим постоянные  $C$  и  $B$ . Запишем:

$$\Xi(0,p) = \Xi_1(p) \text{ for } x=0; \quad (7)$$

$$\Xi(\delta,p) = \Xi_2(p) \text{ for } x=\delta,$$

следовательно,

$$C = (\Xi_1 e^{\delta\gamma} - \Xi_2) / [2 \text{sh}(\delta\gamma)]; \quad (8)$$

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

поэтому получаем решение (5) в виде:

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

Уравнения для сил на гранях ПА при продольном пьезоэффекте:

$$T_3(0,p)S_0 = F_1(p) + M_1 p^2 \Xi_1(p) \text{ for } x=0; \quad (10)$$

$$T_3(\delta, p)S_0 = -F_2(p) + M_2 p^2 \Xi_1(p) \text{ for } x = \delta,$$

где соответствующие преобразования Лапласа для выражений механических напряжений  $T_3(0, p)$  и  $T_3(\delta, p)$  ПА при продольном пьезоэффекте определяются из уравнения обратного пьезоэффекта:

$$\begin{aligned} T_3(0, p) &= \frac{1}{s_{33}^E} \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=0} - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_3(p); \\ T_3(\delta, p) &= \frac{1}{s_{33}^E} \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=\delta} - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_3(p). \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом решения линейного дифференциального уравнения (5) получаем систему уравнений для структурно-параметрической модели ПА при продольном пьезоэффекте (рис. 2):

$$\begin{aligned} \Xi_1(p) &= [1 / (M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1 / \chi_{33}^E) \times \\ &\times [d_{33} E_3(p) - [\gamma / \text{sh}(\delta\gamma)] [\text{ch}(\delta\gamma) \Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1 / (M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1 / \chi_{33}^E) \times \\ &\times [d_{33} E_3(p) - [\gamma / \text{sh}(\delta\gamma)] [\text{ch}(\delta\gamma) \Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\chi_{33}^E = s_{33}^E / S_0$ .

Рассмотрим ПА при сдвиговом пьезоэффекте (2) на рис. 3.

С учетом решения линейного обыкновенного дифференциального уравнения (5) находим систему уравнений для структурно-параметрической модели ПА при сдвиговом пьезоэффекте (рис. 4):

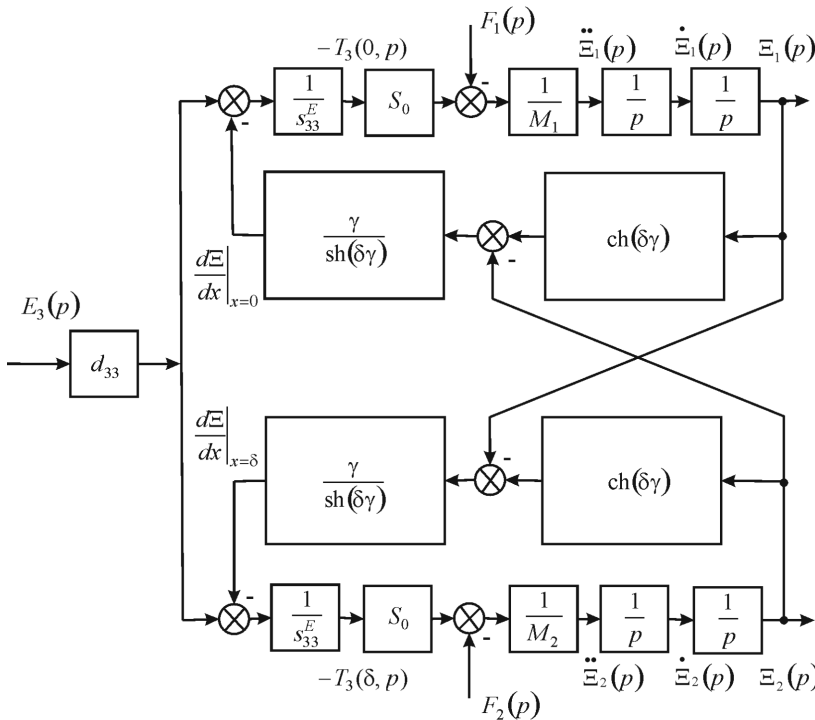


Рис. 2. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте

$$\begin{aligned} \Xi_1(p) &= [1 / (M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1 / \chi_{55}^E) \times \\ &\times [d_{15} E_1(p) - [\gamma / \text{sh}(b\gamma)] [\text{ch}(b\gamma) \Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Xi_2(p) &= [1 / (M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1 / \chi_{55}^E) \times \\ &\times [d_{15} E_1(p) - [\gamma / \text{sh}(b\gamma)] [\text{ch}(b\gamma) \Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\}, \end{aligned}$$

где  $\chi_{55}^E = s_{55}^E / S_0$ .

Из (2), (3), (12), (13) получаем систему уравнений, представляющую обобщенную структурно-параметрическую модель электромагнитоупругого актюатора для мехатронных систем:

$$\begin{aligned} \Xi_1(p) &= [1 / (M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1 / \chi_{ij}^\Psi) \times \\ &\times [v_{mi} \Psi_m(p) - [\gamma / \text{sh}(b\gamma)] [\text{ch}(b\gamma) \Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1 / (M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1 / \chi_{ij}^\Psi) \times \\ &\times [v_{mi} \Psi_m(p) - [\gamma / \text{sh}(b\gamma)] [\text{ch}(b\gamma) \Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\chi_{ij}^\Psi = s_{ij}^\Psi / S_0; \quad v_{mi} = \begin{cases} d_{33}, d_{31}, d_{15} \\ g_{33}, g_{31}, g_{15} \\ d_{33}, d_{31}, d_{15} \end{cases}; \quad \Psi_m = \begin{cases} E_3, E_1 \\ D_3, D_1 \\ H_3, H_1 \end{cases}$$

$$s_{ij}^\Psi = \begin{cases} s_{33}^E, s_{11}^E, s_{55}^E \\ s_{33}^D, s_{11}^D, s_{55}^D \\ s_{33}^H, s_{11}^H, s_{55}^H \end{cases}; \quad c^\Psi = \begin{cases} c^E \\ c^D \\ c^H \end{cases}; \quad \gamma = \begin{cases} \gamma^E \\ \gamma^D \\ \gamma^H \end{cases}; \quad l = \begin{cases} \delta \\ h \\ b \end{cases}$$

где параметры  $E, D$  и  $H$  относятся к управлению по напряжению, току для обратного пьезоэффекта и напряженности магнитного поля для магнитоstriction, причем  $\chi_{ij}^\Psi = s_{ij}^\Psi / S_0$ ;  $g_{33}, g_{31}, g_{15}$  — пьезоэлектрические постоянные;  $c^\Psi$  — скорость звука при  $\Psi = \text{const}$ ;  $l$  — геометрический размер в направлении деформации, равный  $\delta, h, b$  — толщине, высоте или ширине электромагнитоупругого актюатора;  $S_0$  — площадь соответствующего поперечного сечения актюатора. Системе (14) отвечает обобщенная параметрическая структурная схема электромагнитоупругого актюатора на рис. 5.

Обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора для мехатронных систем позволяет получить его передаточные функции как отношение преобразованных по Лапласу перемещений торцов актюатора к выражению соответствующего входного электрического парамет-

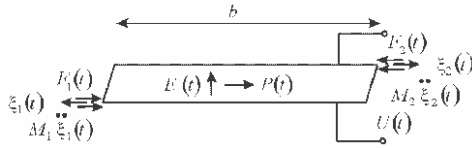


Рис. 3. Кинематическая схема пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте

ра или соответствующей силы при нулевых начальных условиях. Совместное решение уравнений (14) для перемещений двух граней электромагнитоупругого актюатора [14–17] дает:

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

где обобщенные передаточные функции электромагнитоупругого актюатора:

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

Следовательно, из (15) получаем обобщенную параметрическую структурную схему электромагнитоупругого актюатора и матричное уравнение:

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

В установившемся режиме при  $\Psi_m(t) = \Psi_{m0} \cdot 1(t)$ ,  $F_1(t) = F_2(t) = 0$  и инерционной нагрузке электромагнитоупругого актюатора статическое перемещение торцов актюатора записывается в виде:

$$\begin{aligned} \xi_1(\infty) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{11}(p) \Psi_{m0} / p = \\ &= v_{mi} / \Psi_{m0} (M_2 + m/2) / (M_1 + M_2 + m); \end{aligned} \quad (17)$$

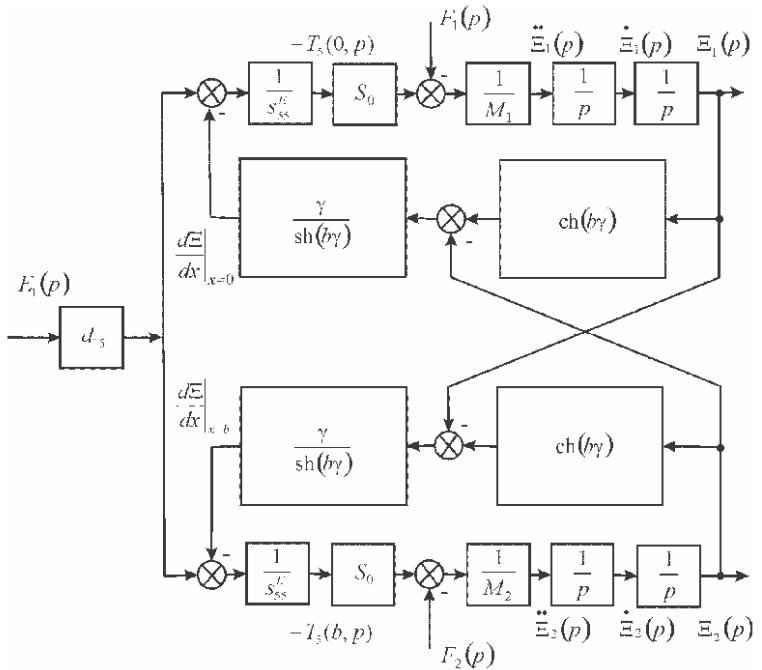


Рис. 4. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте с управлением по напряжению

$$\begin{aligned} \xi_2(\infty) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{21}(p) \Psi_{m0} / p = \\ &= v_{mi} / \Psi_{m0} (M_1 + m/2) / (M_1 + M_2 + m); \end{aligned} \quad (18)$$

$$\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\xi_1(t) + \xi_2(t)) = v_{mi} / \Psi_{m0}, \quad (19)$$

где  $m$  — масса актюатора;  $M_1, M_2$  — значения массы нагрузки.

Для ПА из пьезокерамики ЦТС при продольном пьезоэффекте и  $m \ll M_1, m \ll M_2$ ,  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  м/В,  $U = 100$  В,  $M_1 = 10$  кг и  $M_2 = 40$  кг получаем статическое перемещение торцов ПА:  $\xi_1(\infty) = 32$  нм,  $\xi_2(\infty) = 8$  нм,  $\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = 40$  нм.

Передаточные функции ПА при продольном пьезоэффекте, когда один из его торцов жестко закреплен, например, при  $M_1 \rightarrow \infty$ , получаем из (15), (16):

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p) / E_3(p) = d_{33} \delta / [M_2 \delta \chi_{ij}^E p^2 + \delta \gamma / \text{cth}(\delta \gamma)]; \quad (20)$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p) / F_2(p) = -\delta \chi_{33}^E / [M_2 \delta \chi_{33}^E p^2 + \delta \gamma / \text{cth}(\delta \gamma)]. \quad (21)$$

Найдем для ПА при продольном пьезоэффекте и одной жестко закрепленной его грани значение перемещения  $\xi_2(\infty)$  в установившемся режиме при  $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$  и  $F_2(t) = 0$  или  $F_2(t) = F_0 \cdot 1(t)$  и  $U(t) = 0$ , тогда выражение для статического перемещения ПА  $\xi_2(\infty)$  в зависимости от напряжения или силы имеет вид:

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_2(p) U_0 / p = d_{33} U_0; \quad (22)$$

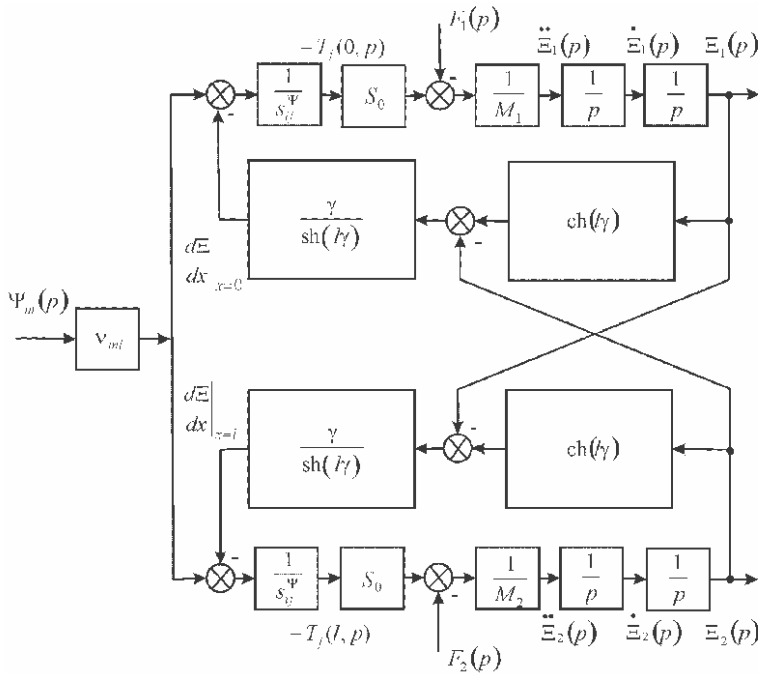


Рис. 5. Обобщенная параметрическая структурная схема электромагнитоупругого актюатора

$$\xi_2(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{23}(p) F_0 / p = -\delta s_{33}^E F_0 / S_0. \quad (23)$$

Для ПА из пьезокерамики ЦТС при продольном пьезоэффекте в случае  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  м/В,  $U = 300$  В получаем статическое перемещение  $\xi_2(\infty) = 120$  нм. При  $\delta = 6 \cdot 10^{-4}$  м,  $s_{33}^E = 3,5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н,  $F_0 = 1000$  Н,  $S_0 = 1,75 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> значение  $\xi_2(\infty) = -120$  нм.

Используя в передаточных функциях ПА (22) и (23) при аппроксимации гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем при  $M_1 \rightarrow \infty$  и  $m \ll M_2$  в диапазоне частот  $0 < \omega < 0,01 c^E / \delta$  следующие выражения:

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p) / E_3(p) = d_{33} \delta / (T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1); \quad (24)$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p) / F_2(p) = -(s_{33}^E \delta / S_0) / (T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1); \quad (25)$$

$$T_t = (\delta / c^E) \sqrt{M_2 / m} = \sqrt{M_2 / C_{33}^E};$$

$$\xi_t = (\alpha \delta / 3) \sqrt{m / M_2}; \quad C_{33}^E = S_0 / (s_{33}^E \delta) = 1 / (\chi_{33}^E \delta),$$

где  $T_t$  — постоянная времени;  $\xi_t$  — коэффициент затухания;  $C_{33}^E$  — жесткость ПА при продольном пьезоэффекте.

В статическом режиме работы пьезоактюатора при упругой нагрузке получаем выражение перемещения торца ПА:

$$\xi_2 = \frac{\xi_{2m}}{1 + C_e / C_{33}^E}, \quad (26)$$

где  $\xi_2$  — перемещение ПА при упругой нагрузке;  $\xi_{2m} = d_{33} U_0$  — максимальное перемещение ПА;  $C_e$  — жесткость нагрузки.

Для ПА при продольном пьезоэффекте с одним жестко закрепленным торцом и упруго-инерционной нагрузке из (24), (26) получаем передаточную функцию

$$W_2(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}}{(1 + C_e / C_{33}^E)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)}, \quad (27)$$

где  $T_t$  — постоянная времени;  $\xi_t$  — коэффициент затухания;  $C_{33}^E$  — жесткость

ПА при продольном пьезоэффекте:

$$T_t = \sqrt{M_2 / (C_e + C_{33}^E)};$$

$$\xi_t = \alpha \delta^2 C_{33}^E / (3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33}^E)}).$$

Для ПА при продольном пьезоэффекте с одним жестко закрепленным торцом и упруго-инерционной нагрузке при  $M_1 \rightarrow \infty$  и  $m \ll M_2$ ,  $M_2 = 10$  кг,  $C_{33}^E = 9 \cdot 10^6$  Н/м,  $C_e = 1 \cdot 10^6$  Н/м получаем постоянную времени  $T_t = 1 \cdot 10^{-3}$  с. Экспериментальные и расчетные характеристики ПА совпадают с погрешностью 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электромеханика — некоторые проблемы XXI века. — Изв. РАН. Энергетика, 2003, № 1, с. 154—157.
2. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 160 с.
3. Uchino K. Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. — Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997, 347 p.
4. Borboni A. Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach. — New York: CRC Press, 2008, 400 p.
5. Панич А.Е., Смотраков В.Г., Еремкин В.В., Вусевкер Ю.А. Перспективы применения электрострикционных материалов. — Микросистемная техника, 2002, № 2, с. 21—24.
6. Акопян В.А., Панич А.Е., Соловьев А.Н., Шевцов С.Н. Некоторые физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения. — Нано- и микросистемная техника, 2006, № 10, с. 35—40.
7. Афонин С.М. Критерии устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя. — Электричество, 2006, № 11, с. 41—44.
8. 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.
9. Yang Y., Tang L. Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. — Journal of intelligent material systems and structures, 2009, vol. 20, No. 18, pp. 2223—2235.

10. 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.

11. **Physical Acoustics: Principles and Methods. Vol.1. Part A. Methods and Devices.** Ed.: W. Mason. — New York: Academic Press, 1964, 515 p.

12. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. — М.: Физматлит, 2001, 576 с.

13. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. — М.: Техносфера, 2004, 144 с.

14. Афонин С.М. О матричных уравнениях в задачах электроупругости. — Электричество, 2006, № 3, с. 48–55.

15. Афонин С.М. Исследование динамических характеристик многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений. — Электричество, 2016, № 1, с. 49–55.

16. Афонин С.М. Структурно-параметрические модели пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте. — Электричество, 2016, № 1, с. 20–29.

17. Springer Handbook of Nanotechnology. Ed. by B. Bhushan. — Berlin, New York: Springer, 2004, 1222 p.

18. **Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.** Ed. by H.S. Nalwa. — Calif.: American Scientific Publishers, 10 Volume Set, 2004.

19. Zhou S., Yao Z. Design and optimization of a modal-independent linear ultrasonic motor. — IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2014, vol. 61, No. 3, pp. 535–546.

[09.01.2017]

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

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 5, pp. 40–45*

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-40-45

## The Transfer Functions of Electromagnetically Elastic Nanodisplacement Actuators for Mechatronic Systems

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

*Piezoactuator (PA) is a piezomechanical device intended to actuate mechanisms and systems or to perform their control based on the piezoelectric effect, and converts electrical signals into mechanical displacement and force. The transfer functions of an electromagnetically elastic actuator for mechatronic systems are obtained. The generalized structural-parametric model of an electromagnetically elastic actuator and its parametric structural diagram are constructed based on the solution of a wave equation. The obtained structural-parametric models, parametric structural diagrams and transfer functions of the PA determine the dynamic and static characteristics of PAs for nano- and microdisplacements taking into account the boundary conditions, PA physical parameters, external loads, and the electrical impedance of matching circuits.*

**Key words:** *electromagnetically elastic actuator, deformation, nanodisplacements, transfer function, structural-parametric model, parametric structural diagram, piezoactuator*

### REFERENCES

1. Копылов И.П. *Izv. RAN. Energetika — in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2003, No. 1, pp. 154 – 157.

2. Nikol'skii A.A. *Tochnye dvukhkanal'nye sledyashchiye elektroprivody s p'yezokompensatorami* (Accurate two-channel tracking with piezo actuators compensators). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 160 p.

3. Uchino K. Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. — Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997, 347 p.

4. Borboni A. Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach. — New York: CRC Press, 2008, 400 p.

5. Panich A.Ye., Smotrakov V.G., Yaremkin V.V., Vusevker Yu.A. *Mikrosistemnaya tekhnika — in Russ. (Microsystem Technology)*, 2002, No. 2, pp. 21–24.

6. Akop'yan V.A., Panich A.Ye., Solov'yev A.N., Shevtsov S.N. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika — in Russ. (Nano- and Microsystem Technology)*, 2006, No. 10, pp. 35–40.

7. Afonin S.M. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 11, pp. 41–44.

8. Kazakov V.K., Nikiforov V.G., Safronov A.Yu., Chernov V.A. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika — in Russ. (Nano- and Microsystem Technology)*, 2007, No. 10, pp. 52–55.

9. Yang Y., Tang L. Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. — Journal of intelligent material systems and structures, 2009, vol. 20, No. 18, pp. 2223–2235.

10. 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.

11. **Physical Acoustics: Principles and Methods. Vol.1. Part A. Methods and Devices.** Ed.: W. Mason. — New York: Academic Press, 1964, 515 p.

12. Polyaniin A.D. *Spravoshnik po lineinym uravneniyam matematicheskoi fiziki* (Handbook of linear equations mathematical physics). Moscow, Fizmatlit, 2001, 576 p.

13. Mironov V.L. *Osnovy skaniruyushchei zondovoi mikroskopii* (Basics scanning microscopy). Moscow, Publ. «Tehnosfera», 2004, 144 p.

14. Afonin S.M. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 3, pp. 48–55.

15. Afonin S.M. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 49–55.

16. Afonin S.M. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2016, № 11, c. 20–29.

17. Springer Handbook of Nanotechnology. Ed. by B. Bhushan. — Berlin, New York: Springer, 2004, 1222 p.

18. **Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.** Ed. by H.S. Nalwa. — Calif.: American Scientific Publishers, 10 Volume Set, 2004.

19. Zhou S., Yao Z. Design and optimization of a modal-independent linear ultrasonic motor. — IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2014, vol. 61, No. 3, pp. 535–546.