

guage was Visual C#. The graphical interface was built using the library component Net Framework 4. The authors' program for searching of the contours' mechanism applied to the graph algorithm is based on the search of "the depth". According to the formulas proposed by the authors, for each contour the program finds the number of the redundant ties, extra mobility, extra links, and metric connections. The calculation results of the program present the number of the circuits of the mechanism, their composition, the number of the redundant links or redundant mobility of the contours, the number of extra units and metric relations, as well as the number of the degrees of freedom of the mechanism and its mobility. The article presents an analysis of the mechanism of the mechatronic device with the developed program. Application of this method of analysis of the mechanisms ensures a rational construction of the mechanisms leading to reduction of friction and wear in the kinematics pairs, and improvement of the conditions of their functioning and the quality of operation of the mechanisms.

Keywords: mechanism, structural analysis, graph, excess communication, excess mobility, metric connection

For citation:

Egorov O. D., Buynov M. A. Investigation of the Mechanisms of the Mechatronic Devices by Using Graphs, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 108—112.

DOI: 10.17587/mau.18.108-112

References

1. **Poduraev Yu. V.** *Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye* (Mechatronics: fundamentals, methods, application), Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p. (in Russian).
2. **Ilyukhin Yu. V.** *Metody nauchnogo poznaniya v protsesse issledovaniya i sozdaniya mekhatronnykh sistem* (Methods of scientific cognition in the process of research and creation of mechatronic systems), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2012, no. 1, pp. 145—147 (in Russian).
3. **Egorov O. D., Buynov M. A.** *Evolutsionnyy algoritm mnogokriterial'noy optimizatsii parametrov mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv i robotov* (Evolutionary algorithm of multicriteria optimization of mechanisms of mechatronic devices and robots), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2015, no. 3, pp. 90—96 (in Russian).
4. **Reshetov L. N.** *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* (Self-aligning mechanisms), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 334 p. (in Russian).
5. **Egorov O. D., Poduraev Yu. V.** *Raschet i konstruirovaniye mekhatronnykh moduley* (Calculation and design of mechatronic modules), Moscow, GOU VPO MGTU "STANKIN", 2012, 422 p. (in Russian).
6. **Gushchin V. G., Baltadzi S. A., Sobolev A. N., Brovkina Yu. I.** *Proektirovaniye mekhanizmov i mashin* (The design of mechanisms and machines), Staryy Oskol, TNT, 2014, 488 p. (in Russian).
7. **Egorov O. D.** *Prikladnaya mekhanika robototekhnicheskikh ustroystv* (Applied mechanics of robotic devices), Moscow, FGBOU VPO MGTU "STANKIN", 2014, 372 p. (in Russian).
8. **Egorov O. D., Buynov M. A.** *Proektirovaniye mekhatronnogo modulya zakhvatnogo ustroystva robota s preobrazovatelem dvizheniya reechnogo tipa* (Designing mechatronic module of the grasp of the robot with the Converter of movement lath type), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2013, no. 2, pp. 8—12 (in Russian).
9. **Grigor'ev S. N., Kutin A. A., Dolgov V. A.** *Printsipy postroeniya tsifrovyykh proizvodstv v mashinostroenii* (The principles of digital industries in the engineering), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2014, no. 3, pp. 8—14 (in Russian).
10. **Egorov O. D.** *Strukturnyy analiz mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv* (Structural analysis of lever mechanisms), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2012, no. 2, pp. 16—19 (in Russian).
11. **Egorov O. D.** *Strukturnyy analiz ryuchazhnykh mekhanizmov* (Structural analysis of lever mechanisms), *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2012, no. 4, pp. 54—58 (in Russian).
12. **Goodrich M. T., Tamassia R.** *Graph terminology and representations*, Boston: Addison-Wesley, 2015, 360 p.
13. **Egorov O. D.** *Konstruirovaniye mekhanizmov robotov* (Designing of mechanisms of robots), Moscow, Abris, 2012, 443 p. (in Russian).
14. **Kharari F.** *Teoriya grafov* (Graph theory), G. P. Gavrilova ed., Moscow, Editorial URSS, 2003, 296 p. (in Russian).
15. **Cormen Th. H., Leiserson Ch. E., Rivest R. L., Stein C.** *Introduction to Algorithms*, Second Edition, MIT Press and McGraw-Hill, 2001, 549 p.
16. **Knuth D. E.** *The Art of Computer Programming*, vol. 1, 3rd edition, Boston, Addison-Wesley, 1997, 560 p.
17. **Nekrasov A. Ya., Arbuzov M. O.** *Logika poiska ratsional'nykh inzhenernykh resheniy pri konstruirovanii* (The search logic of rational engineering solutions in the design), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2014, no. 3, pp. 20—24 (in Russian).

УДК 534.2:621.3

DOI: 10.17587/mau.18.112-121

С. М. Афонин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц., eduems@mail.ru,

Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

Параметрические структурные схемы пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте

Исследованы параметрические структурные схемы пьезоактюаторов нано- и микроперемещений, получены структурно-параметрические модели пьезоактюаторов при продольном пьезоэффекте с учетом противозлектродвижущей силы, определены передаточные функции.

Ключевые слова: пьезоактюатор, деформация, нано- и микроперемещения, параметрическая структурная схема, структурно-параметрическая модель, продольный пьезоэффект, противозлектродвижущая сила, передаточная функция

Введение

Применение пьезоактюаторов (пьезодвигателей, пьезопреобразователей), работающих на продольном пьезоэффекте и развивающих высокие усилия, перспективно для реализации нано- и микроперемещений в области нанотехнологий, нанобиоло-

гии, фотонике, энергетике, микроэлектронике и астрономии [1—11]. Пьезоактюатор — пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, которое преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение или силу [1].

При использовании пьезоактюаторов в точных электромеханических системах необходимо учитывать особенности электромеханического преобразования энергии пьезоактюатором при продольном и поперечном пьезоэффектах и соответствующие коэффициенты полезного действия. Пьезоактюатор нано- и микроперемещений из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или PZT, например, ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-26, ЦТБС-3, ПКР-7, ПКР-7М или PZT-4, PZT-5Н, обеспечивает диапазон перемещения от единиц нанометров до единиц микрометров с точностью до десятых долей нанометров в статических и квазистатических режимах эксплуатации. В фотонике используются пьезоактюаторы для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при применении оптических методов передачи информации и энергии. Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений применяются для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов, для совмещения и сканирования в электронных, зондовых, атомно-силовых микроскопах [1—11]. Для синтеза системы управления проводится математическое моделирование и построение структурно-параметрических моделей пьезоактюаторов.

В расчетах по аналогии с классическим электроприводом нужно учитывать противоЭДС пьезоактюатора, соответствующую противоЭДС якоря двигателя постоянного тока. Для этого в структурно-параметрических моделях и параметрических структурных схемах пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте вводятся отрицательные обратные связи, учитывающие прямой пьезоэффект в пьезоактюаторе, и рассматривается их влияние в статике и динамике на характеристики пьезоактюатора.

В результате совместного решения волнового уравнения пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте, уравнений обратного и прямого пьезоэффекта и граничных условий на двух нагруженных рабочих поверхностях пьезоактюатора определяется его структурно-параметрическая модель и соответствующая параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте. Из этой структурно-параметрической модели пьезоактюатора определяются передаточные функции пьезоактюатора нано- и микроперемещений. В зависимости от граничных условий, частотного диапазона работы, вида управления показано преобразование параметрических структурных схем пьезоактюатора с учетом противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта.

Из-за реакции пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с учетом противоЭДС пьезоактюатора в зависимости от вида управления по напряжению или току изменяются упругая податливость и жесткость пьезоактюатора, которые наряду с пьезомодулем являются основными параметрами пьезоактюатора. Для учета влияния нагрузки на характеристики пьезоактюатора необходимо исследовать

изменение упругой податливости пьезоактюатора. При высокой скорости перемещения торца пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте также необходимо учитывать влияние противоЭДС пьезоактюатора на ток через пьезоактюатор.

Для расчетов и практического использования пьезоактюаторов в системах управления требуется решать волновое уравнение при продольном пьезоэффекте при различных граничных условиях и проводить построение соответствующих структурно-параметрических моделей пьезоактюатора и его передаточных функций в различных частотных диапазонах работы.

Полученные в данной работе параметрические структурные схемы пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте наглядно отображают преобразование электрической энергии в механическую при продольном пьезоэффекте и взаимную зависимость электромеханических параметров пьезоактюатора.

Структурно-параметрическая модель пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте

Пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте представляет собой пьезопластину (рис. 1) толщиной δ с электродами, нанесенными на грани, перпендикулярные оси 3, площадь которых равна S_0 .

Уравнение электроупругости для обратного продольного пьезоэффекта при управлении пьезоактюатора по напряжению [2, 3] имеет вид

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

где $S_3 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ — относительное смещение сечения пьезоактюатора по оси 3; d_{33} — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте; $E_3(t) = U(t)/\delta$ — напряженность электрического поля; $U(t)$ — напряжение на электродах пьезоактюатора; s_{33}^E — упругая податливость по оси 3; T_3 — механическое напряжение по оси 3; δ — толщина пьезоактюатора.

Рассмотрим влияние реакции пьезоактюатора из-за создания пьезоактюатором противоЭДС за счет прямого пьезоэффекта при статической де-

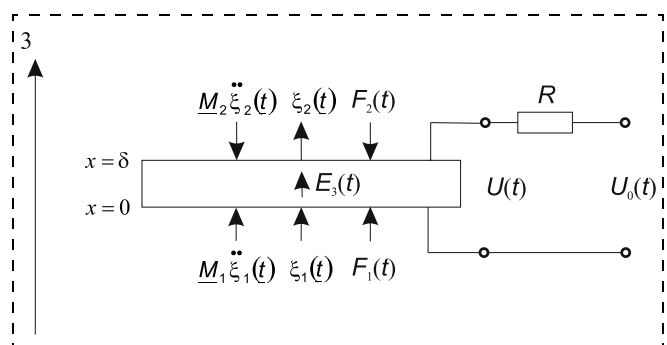


Рис. 1. Структурная схема пьезоактюатора нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте

формации пьезоактюатора. В статическом режиме при зажатом пьезоактюаторе (при неподвижных торцах пьезоактюатора) деформация пьезоактюатора равна нулю, а сила, развиваемая им, максимальна.

Упругие податливости пьезоактюаторов $s_{33}^E > s_{33}^D$, причем $s_{33}^E/s_{33}^D \leq 1,2$. Индекс E соответствует измерениям при постоянной напряженности электрического поля в пьезоактюаторе или измерениях с замкнутыми электродами. Индекс D соответствует измерениям при постоянной индукции при управлении от источника тока или при измерениях с разомкнутыми электродами пьезоактюатора. Измерения проводили на прессе марки УММ-5 в диапазоне рабочих нагрузок при механических напряжениях в пьезоактюаторе до 50 МПа.

Соответственно имеем $C_{33}^E = S_0/(s_{33}^E \delta)$ — жесткость пьезоактюатора с управлением по напряжению при продольном пьезоэффекте, S_0 — площадь поперечного сечения пьезоактюатора, $C_{33}^D = S_0/(s_{33}^D \delta)$ — жесткость пьезоактюатора с управлением по току при продольном пьезоэффекте. 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 пьезоактюатора [6].

При управлении пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте от источника питания с конечным сопротивлением источника с учетом прямого пьезоэффекта получаем в статике выражение

$$F_{\max} = U \frac{1}{\delta} d_{33} \frac{S_0}{s_{33}^E} + F_{\max} \frac{1}{S_0} d_{33} S_0 \frac{S_0}{\varepsilon_{33} S_0 / \delta} k_u \frac{1}{\delta} d_{33} \frac{S_0}{s_{33}^E}, \quad (2)$$

откуда

$$F_{\max} \left(1 - \frac{d_{33}^2 k_u}{\varepsilon_{33} s_{33}^E} \right) = E_3 d_{33} \frac{S_0}{s_{33}^E}$$

или

$$T_3(1 - k_{33}^2 k_u) s_{33}^E = E_3 d_{33},$$

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

При управлении от источника тока с бесконечно большим сопротивлением источника

$$k_u|_{R \rightarrow \infty} = 1,$$

при управлении от источника напряжения с бесконечно малым сопротивлением источника

$$k_u|_{R \rightarrow 0} = 0.$$

Соответственно, имеем k_s — коэффициент изменения упругой податливости:

$$s_{33} = (1 - k_{33}^2 k_u) s_{33}^E = k_s s_{33}^E, \quad (3)$$

$$k_s = 1 - k_{33}^2 k_u, \quad k_s > 0,$$

$$(1 - k_{33}^2)|_{R \rightarrow \infty} \leq k_s \leq 1|_{R \rightarrow 0},$$

$$k_s|_{R \rightarrow \infty} = 1 - k_{33}^2,$$

$$k_s|_{R \rightarrow 0} = 1.$$

Запишем уравнение сил, действующих на пьезоактюатор, с учетом рабочей нагрузки:

$$T_3 S_0 = F + M \frac{\partial^2 \xi(t)}{\partial t^2},$$

где F — внешняя сила, приложенная к пьезоактюатору; M — перемещаемая масса; ξ — перемещение торца пьезоактюатора.

Для составления структурно-параметрической модели пьезоактюатора с управлением по напряжению решим совместно волновое уравнение, уравнение обратного продольного пьезоэффекта и уравнения сил на гранях пьезоактюатора.

При расчете пьезоактюаторов с управлением по напряжению используется волновое уравнение [2–5], 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 $E = \text{const}$ (например, при распространении волны в пьезоактюаторе при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению по оси 3 имеем $c^E = c_{33}^E$); α — коэффициент затухания колебаний из-за рассеивания энергии на тепловые потери при распространении волны.

С помощью преобразования Лапласа [7] исходная задача для уравнения с частными производными гиперболического типа — волнового уравнения (4) — сводится к более простой задаче для линейного обыкновенного дифференциального уравнения с параметром p , где p — параметр преобразования.

Применим к волновому уравнению (4) преобразование Лапласа [7]:

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^\infty \xi(x, t) e^{-pt} dt, \quad (5)$$

полагая начальные условия нулевыми, т. е.

$$\xi(x, t)|_{t=0} = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0.$$

В результате получим линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2} p^2 + \frac{2\alpha}{c^E} p + \alpha^2 \right] \Xi(x, p) = 0, \quad (6)$$

или

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

решением которого будет функция

$$\Xi(x, p) = Ce^{-x\gamma} + Be^{x\gamma}, \quad (7)$$

где $\Xi(x, p)$ — преобразование Лапласа смещения сечения пьезоактюатора; $\gamma = p/c^E + \alpha$ — коэффициент распространения волны в пьезоактюаторе при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению.

Постоянные C и B определим из граничных условий:

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

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

Следовательно, постоянные

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

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

Решение (7) запишется в виде

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p)\text{sh}[(\delta - x)\gamma] + \Xi_2(p)\text{sh}(x\gamma)\} / \text{sh}(\delta\gamma). \quad (8)$$

Уравнения для сил, действующих на торцах пьезоактюатора, будут иметь вид

$$T_3(0, p)S_0 = F_1(p) + M_1 p^2 \Xi_1(p) \text{ при } x = 0; \quad (9)$$

$$T_3(\delta, p)S_0 = -F_2(p) + M_2 p^2 \Xi_2(p) \text{ при } x = \delta,$$

где соответствующие преобразования Лапласа для выражений механических напряжений $T_3(0, p)$ и $T_3(\delta, p)$ определяются из уравнения обратного пьезоэффекта.

Следовательно, получаем систему уравнений для механических напряжений в пьезоактюаторе с управлением по напряжению при $x = 0$ и $x = \delta$:

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

$$T_3(\delta, p) = \frac{1}{s_{33}^E} \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=\delta} - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_3(p). \quad (10)$$

Из соотношений (9) и (10) найдем уравнения для структурно-параметрической модели пьезоактюатора с управлением по напряжению

$$\begin{aligned} \Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1/\chi_{33}^D)[d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1/\chi_{33}^D)[d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]\}, \end{aligned} \quad (11)$$

причем $\chi_{33}^E = s_{33}^E / S_0 = \delta / [m(c^E)^2]$, где m — масса пьезоактюатора.

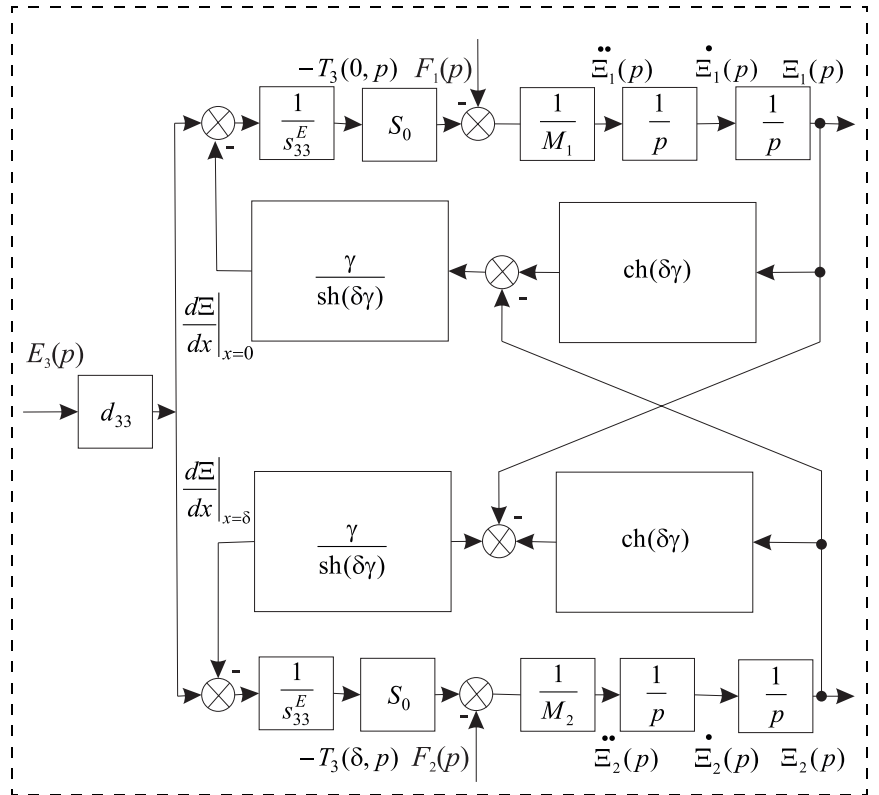


Рис. 2. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению

Системе уравнений (11) соответствует параметрическая структурная схема пьезоактюатора с управлением по напряжению (рис. 2, 3).

Аналогично получаем уравнения для структурно-параметрической модели пьезоактюатора с управлением по току и параметрическую структурную схему (рис. 4) пьезоактюатора с управлением по току:

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

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

причем $\chi_{33}^D = s_{33}^D / S_0$; $\gamma = p/c^D + \alpha$ — коэффициент распространения волны в пьезоактюаторе при продольном пьезоэффекте с управлением по току; c^D — скорость распространения упругой волны по оси 3 при $D = \text{const}$ в пьезоактюаторе, $c^D = c_{33}^D$.

В результате преобразований получаем систему уравнений структурно-параметрической модели и преобразованную параметрическую структурную схему (см. рис. 3) пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению:

$$\begin{aligned} \Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1/\chi_{33}^E)[d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - \gamma \Xi_1(p) / \text{th}(\delta\gamma) + \gamma \Xi_2(p) / \text{sh}(\delta\gamma)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1/\chi_{33}^E)[d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - \gamma \Xi_2(p) / \text{th}(\delta\gamma) + \gamma \Xi_1(p) / \text{sh}(\delta\gamma)]\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично получаем систему уравнений структурно-параметрической модели и преобразованную параметрическую структурную схему (рис. 4) пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по току:

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + (1/\chi_{33}^D)[d_{33}E_3(p) - \\ &- \gamma \Xi_1(p)/\text{th}(\delta\gamma) + \gamma \Xi_2(p)/\text{sh}(\delta\gamma)]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + (1/\chi_{33}^D)[d_{33}E_3(p) - \\ &- \gamma \Xi_2(p)/\text{th}(\delta\gamma) + \gamma \Xi_1(p)/\text{sh}(\delta\gamma)]\}.\end{aligned}\quad (14)$$

Параметрическая структурная схема пьезоактюатора дополнена уравнениями внешней цепи, например, $U(p) = U_0(p)/(RC_0 p + 1)$ или $U(p) = I(p)/C_0 p$, где $U(p)$, $U_0(p)$, $I(p)$ — соответственно преобразования Лапласа для выражений напряжения на обкладках пьезоактюатора, напряжения источника и тока пьезоактюатора; R — сопротивление внешней

цепи; C_0 — статическая емкость пьезоактюатора (рис. 3, 4).

Уравнения (11) для структурно-параметрической модели пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению преобразуются к следующему виду:

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)] \{-F_1(p) + C_{33}^E \delta [d_{33}E_3(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)] \{-F_2(p) + C_{33}^E \delta [d_{33}E_3(p) - \\ &- [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\},\end{aligned}\quad (15)$$

где $C_{33}^E = S_0/(s_{33}^E \delta) = 1/(\chi_{33}^E \delta)$ — жесткость пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению.

Аналогично уравнение (12) для структурно-параметрической модели пьезоактюатора при про-

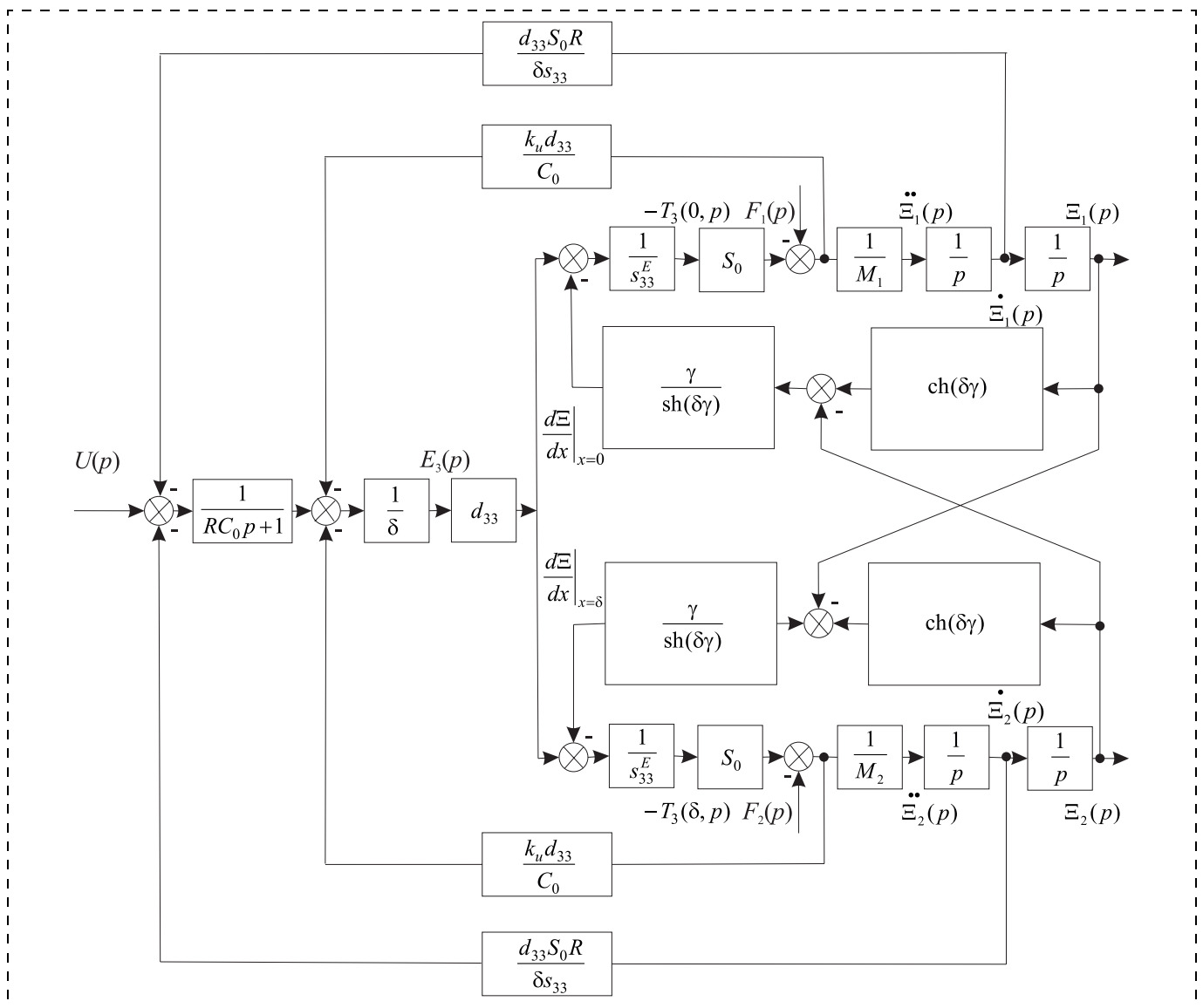


Рис. 3. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению при конечном сопротивлении источника

долном пьезоэффекте с управлением по току преобразуются к следующему виду:

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= [1/(M_1 p^2)]\{-F_1(p) + C_{33}^D \delta [d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_2(p)]]\}; \\ \Xi_2(p) &= [1/(M_2 p^2)]\{-F_2(p) + C_{33}^D \delta [d_{33} E_3(p) - \\ &\quad - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\},\end{aligned}\quad (16)$$

где $C_{33}^D = S_0/(s_{33}^D \delta) = 1/(\chi_{33}^D \delta)$ — жесткость пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по току.

Структурно-параметрическая модель пьезоактюатора позволяет получить его передаточные функции как отношение преобразованных по Лапласу перемещений торцов пьезоактюатора к выражению соответствующего входного электрического параметра или соответствующей силы при нулевых начальных условиях. Совместное решение выше-

приведенных уравнений (11) для перемещений двух граней пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению дает

$$\begin{aligned}\Xi_1(p) &= W_{11}(p)E_3(p) + W_{12}(p)F_1(p) + W_{13}(p)F_2(p); \\ \Xi_2(p) &= W_{21}(p)E_3(p) + W_{22}(p)F_1(p) + W_{23}(p)F_2(p),\end{aligned}\quad (17)$$

где обобщенные передаточные функции

$$\begin{aligned}W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/E_3(p) = \\ &= d_{33}[M_2 \chi_{33}^E p^2 + \gamma \text{th}(\delta\gamma/2)]/A_{33}, \quad \chi_{33}^E = s_{33}^E/S_0;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{33} &= M_1 M_2 (\chi_{33}^E)^2 p^4 + \{(M_1 + M_2) \chi_{33}^E / [c^E \text{th}(\delta\gamma)]\} p^3 + \\ &+ [(M_1 + M_2) \chi_{33}^E \alpha / \text{th}(\delta\gamma) + 1/(c^E)^2] p^2 + 2\alpha p / c^E + \alpha^2;\end{aligned}$$

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/\Psi_m(p) = d_{33}[M_1 \chi_{33}^E p^2 + \gamma \text{th}(\delta\gamma/2)]/A_{33};$$

$$W_{12}(p) = \Xi_1(p)/F_1(p) = -\chi_{33}^E [M_2 \chi_{33}^E p^2 + \gamma / \text{th}(\delta\gamma)]/A_{33};$$

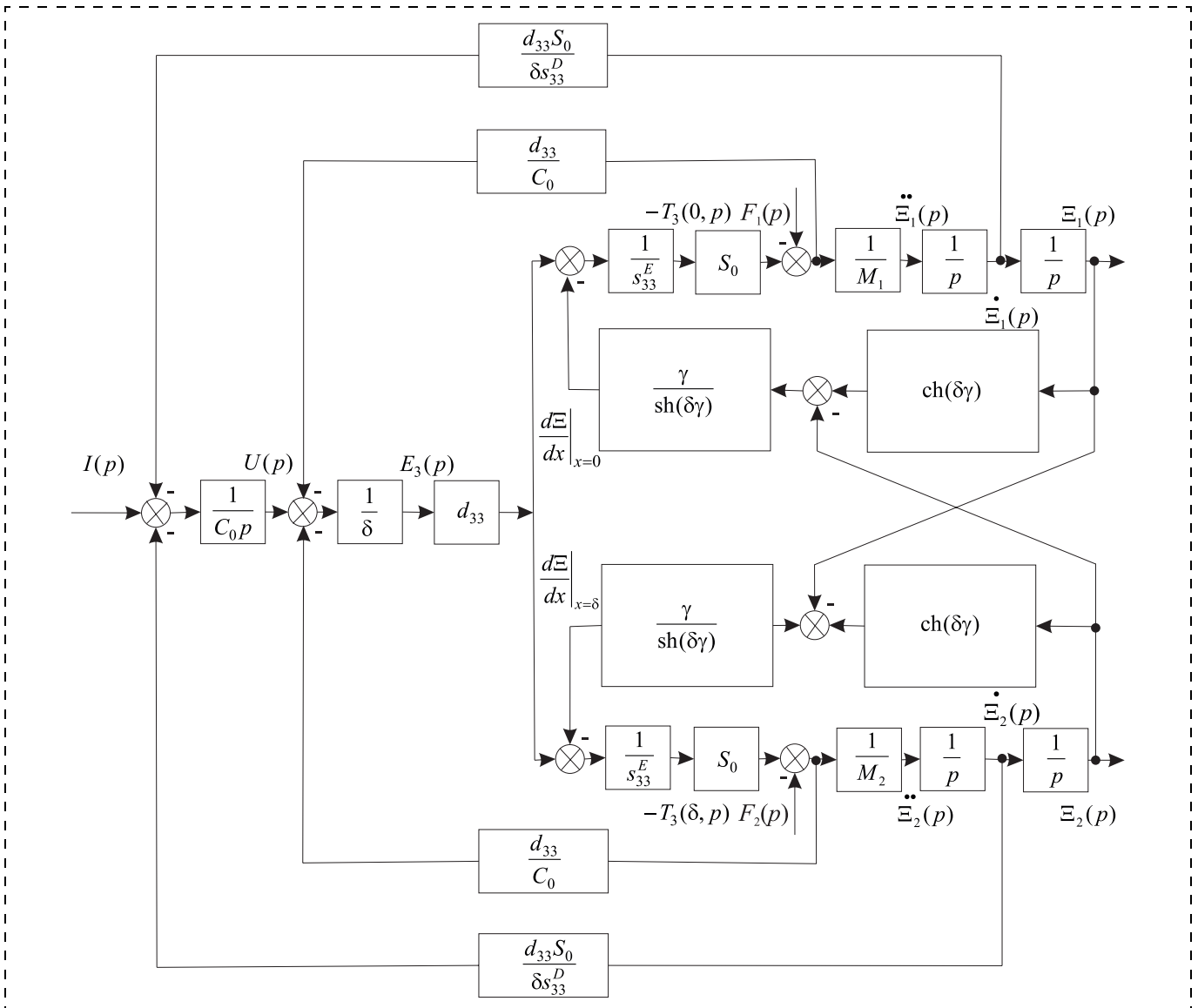


Рис. 4. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с управлением по току

$$W_{13}(p) = \Xi_1(p)/F_2(p) = W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) = \\ = [\chi_{33}^E \gamma / \text{sh}(\delta\gamma)] / A_{33};$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) = -\chi_{33}^E [M_1 \chi_{33}^E p^2 + \gamma / \text{th}(\delta\gamma)] / A_{33}.$$

В свою очередь, из соотношения (16) получаем параметрическую структурную схему пьезоактюатора (см. рис. 2) и матричное уравнение

$$\begin{pmatrix} \Xi_1(p) \\ \Xi_2(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_3(p) \\ F_1(p) \\ F_2(p) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

При подаче напряжения $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$ на обкладки пьезоактюатора, напряженности электрического поля по оси 3 $E_3(t) = E_{30} \cdot 1(t) = (U_0/\delta) \cdot 1(t)$ и $F_1(t) = F_2(t) = 0$ определим в установившемся режиме и инерционной нагрузке пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте статическое перемещение его торцов

$$\xi_1(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} p W_{11}(p) (U_0/\delta) / p = \\ = d_{33} U_0 (M_2 + m/2) / (M_1 + M_2 + m); \quad (19)$$

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} p W_{21}(p) (U_0/\delta) / p = \\ = d_{33} U_0 (M_1 + m/2) / (M_1 + M_2 + m); \quad (20)$$

$$\xi(\infty) + \xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\xi_1(t) + \xi_2(t)) = d_{33} U_0. \quad (21)$$

При $m \ll M_1$ и $m \ll M_2$ статическое перемещение торцов пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в зависимости от напряжения имеет вид

$$\xi_1(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} p W_{11}(p) (U_0/\delta) / p = \\ = d_{33} U_0 M_2 / (M_1 + M_2); \quad (22)$$

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} p W_{21}(p) (U_0/\delta) / p = \\ = d_{33} U_0 M_1 / (M_1 + M_2), \quad (23)$$

где m — масса пьезоактюатора, M_1 , M_2 — массы нагрузки.

Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19 при продольном пьезоэффекте при $m \ll M_1$ и $m \ll M_2$ в случае $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, $U_0 = 500$ В, $M_1 = 10$ кг и $M_2 = 40$ кг получаем статическое перемещение торцов $\xi_1(\infty) = 160$ нм, $\xi_2(\infty) = 40$ нм, $\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = 200$ нм.

Передачные функции пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте

Рассмотрим определение передаточных функций пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте, когда один торец жестко закреплен, например при $x = 0$, $M_1 \rightarrow \infty$, тогда при продольном пьезоэффекте

из соотношения (18) получаем передаточные функции пьезоактюатора в виде

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = \\ = d_{33} \delta \text{th}(\delta\gamma) / [M_2 \delta \chi_{33}^E \text{th}(\delta\gamma) p^2 + \delta p / c^E + \delta \alpha]; \quad (24)$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) = \\ = -\delta \chi_{33}^E \text{th}(\delta\gamma) / [M_2 \delta \chi_{33}^E \text{th}(\delta\gamma) p^2 + \delta p / c^E + \delta \alpha]. \quad (25)$$

Из выражения (24) следует

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = \\ = d_{33} \delta / [M_2 \delta \chi_{33}^E p^2 + \delta \gamma \text{cth}(\delta\gamma)], \quad (26)$$

откуда при $M_2 = 0$ имеем передаточную функцию ненагруженного пьезоактюатора

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = d_{33} / [\gamma \text{cth}(\delta\gamma)]. \quad (27)$$

Определим при продольном пьезоэффекте и с одним жестко закрепленным торцом пьезоактюатора перемещение $\xi_2(\infty)$ в установившемся режиме при $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$ и $F_2(t) = 0$ или $F_1(t) = F_0 \cdot 1(t)$ и $U(t) = 0$.

Соответственно, статическое перемещение $\xi_2(\infty)$ пьезоактюатора в зависимости от напряжения или силы имеет вид

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} p W_2(p) U_0 / p = \\ = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} d_{33} U_0 \text{th}(\alpha\delta) / (\alpha\delta) = d_{33} U_0; \quad (28)$$

$$\xi_2(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{23}(p) F_0 / p = \\ = -\lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} [\delta^2 F_0 \text{th}(\alpha\delta)] / [m(c^E)^2 \alpha \delta] = -\delta s_{33}^E F_0 / S_0. \quad (29)$$

Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19 при продольном пьезоэффекте в случае $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, $U_0 = 500$ В получаем статическое перемещение $\xi_2(\infty) = 200$ нм. При $\delta = 6 \cdot 10^{-4}$ м, $s_{33}^E = 3,5 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, $F_0 = 1000$ Н, $S_0 = 1,75 \cdot 10^{-4}$ м² значение $\xi_2(\infty) = -120$ нм. Экспериментальные и расчетные характеристики пьезоактюатора совпадают с погрешностью 5 %.

Рассмотрим работу пьезоактюатора на низких частотах при жестко закрепленном торце при $x = 0$, когда $M_1 \rightarrow \infty$ и $m \ll M_2$. Передаточные функции $W_{21}(p)$ и $W_{23}(p)$ имеют вид

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = \\ = d_{33} \delta / [M_2 \delta \chi_{33}^E p^2 + \delta \gamma \text{cth}(\delta\gamma)]; \quad (30)$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) = \\ = -\delta \chi_{33}^E / [M_2 \delta \chi_{33}^E p^2 + \delta \gamma \text{cth}(\delta\gamma)]. \quad (31)$$

Для учета влияния реакции пьезоактюатора за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта необходимо дополнить его параметрическую структурную схему обратными связями с учетом прямого пьезоэффекта (рис. 3, 4),

соответствующими следующим уравнениям

$$U_i(p) = \frac{1}{S_0} d_{33} S_0 \frac{1}{C_0} F_i(p) = \frac{d_{33}}{C_0} F_i(p), (32)$$

где $i = 1, 2$ — номер торца пьезоактюатора, $U_i(p)$ — изображение Лапласа противоЭДС напряжения обратной связи. Если за входную величину принять напряжение $U_0(t)$, то с учетом внешней цепи передаточные функции пьезоактюатора $W_{11}(p)$, $W_{21}(p)$ необходимо умножить на выражение

$$W_0(p) = \frac{E_3(p)}{U_0(p)} = \frac{1}{\delta(RC_0p + 1)}. (33)$$

Для учета влияния усилия, развиваемого пьезоактюатором, за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта при продольном пьезоэффекте и управлении от источника тока необходимо дополнить структурно-параметрическую модель и параметрическую структурную схему пьезоактюатора с учетом прямого пьезоэффекта обратными связями, соответствующими уравнениям

$$U_i(p) = \frac{1}{S_0} d_{33} S_0 \frac{1}{C_0} F_i(p) = \frac{d_{33}}{C_0} F_i(p); (34)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33} S_p}{\delta}, S_p = S_0 = b\delta,$$

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

При управлении пьезоактюатором при продольном пьезоэффекте от источника питания с конечным сопротивлением источника получаем выражения для обратных связей по усилию в виде

$$U_i(p) = \frac{1}{S_0} d_{33} S_0 \frac{1}{C_0} k_u F_i(p) = \frac{d_{33}}{C_0} k_u F_i(p). (35)$$

Для учета влияния скорости пьезоактюатора за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта при продольном пьезоэффекте необходимо дополнить структурно-параметрическую модель и параметрическую структурную схему пьезоактюатора обратными связями:

$$U_i(p) = \frac{d_{33} S_0 R}{\delta S_{33}} \dot{\Xi}_i(p). (36)$$

Рассмотрим различные режимы работы пьезоактюатора, если один из торцов пьезоактюатора жестко закреплен, например, при $x = 0$, причем $W_{11}(p) = 0$, $\Xi_1(p) = 0$. Тогда при инерционной нагрузке и продольном пьезоэффекте получаем передаточные функции при питании пьезоактюатора от

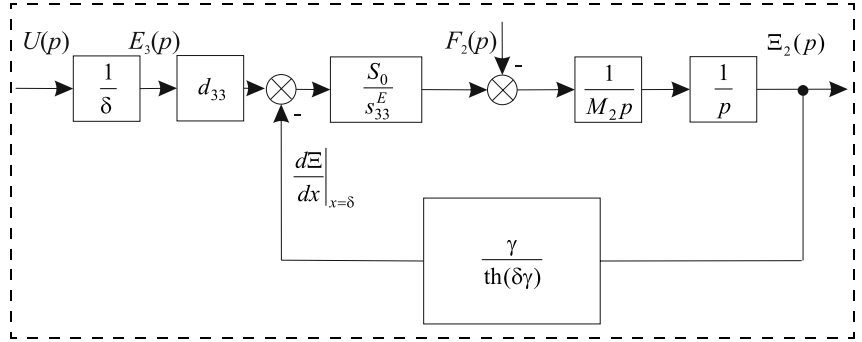


Рис. 5. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и инерционной нагрузке с управлением по напряжению

источника напряжения (рис. 5) с бесконечно малым сопротивлением источника:

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33} \text{th}(\delta\gamma)}{M_2 \delta \text{th}(\delta\gamma) p^2 / (m(c^E)^2) + \gamma}; (37)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = - \frac{\delta \text{th}(\delta\gamma) / (m(c^E)^2)}{M_2 \delta \text{th}(\delta\gamma) p^2 / (m(c^E)^2) + \gamma}. (38)$$

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

$$W_2(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{33} \text{th}(\delta\gamma)}{M_2 \delta^2 \text{th}(\delta\gamma) p^2 / (m(c^E)^2) + \delta\gamma}. (39)$$

Соответственно для учета влияния реакции пьезоактюатора за счет возникновения противоЭДС из-за прямого пьезоэффекта необходимо дополнить параметрическую структурную схему пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте обратной связью, описываемой следующим уравнением:

$$U_2(p) = \frac{1}{S_0} d_{33} S_0 \frac{1}{C_0} F_2(p) = \frac{d_{33}}{C_0} F_2(p). (40)$$

Тогда при инерционной нагрузке и продольном пьезоэффекте получаем его передаточные функции при питании от источника тока с бесконечно большим сопротивлением источника

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33} \text{th}(\delta\gamma)}{M_2 \delta (1 - k_{33}^2) \text{th}(\delta\gamma) p^2 / (m(c^E)^2) + \gamma}; (41)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = - \frac{\delta (1 - k_{33}^2) \text{th}(\delta\gamma) / (m(c^E)^2)}{M_2 \delta (1 - k_{33}^2) \text{th}(\delta\gamma) p^2 / (m(c^E)^2) + \gamma}, (42)$$

$$\text{где } \frac{m(c^E)^2}{\delta(1-k_{33}^2)} = \frac{S_0}{s_{33}^E(1-k_{33}^2)} = \frac{S_0}{s_{33}^D}.$$

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

$$W_2(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}\text{th}(\delta\gamma)}{M_2\delta^2(1-k_{33}^2)\text{th}(\delta\gamma)p^2/(m(c^E)^2) + \delta\gamma}. \quad (43)$$

Рассмотрим работу пьезоактюатора при инерционной нагрузке на низких частотах при $\omega \rightarrow 0$ для пьезоактюатора при $M_1 \rightarrow \infty$ и $M_2/m \gg 1$. При управлении по напряжению представим $W_{21}(p)$ и $W_{23}(p)$ в удобном для преобразования виде:

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{M_2\delta p^2/(m(c^E)^2) + \gamma\text{cth}(\delta\gamma)}; \quad (44)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = -\frac{\delta/(m(c^E)^2)}{M_2\delta p^2/(m(c^E)^2) + \gamma\text{cth}(\delta\gamma)}. \quad (45)$$

Используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c^E/\delta$ при $M_2/m \gg 1$ и инерционной нагрузке следующие выражения передаточных функций при управлении по напряжению и при питании пьезоактюатора (рис. 5) от источника напряжения с бесконечно малым сопротивлением источника:

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}\delta}{(T_{33}^E)^2 p^2 + 2T_{33}^E \xi_{33}^E p + 1}; \quad (46)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = -\frac{1/C_{33}}{(T_{33}^E)^2 p^2 + 2T_{33}^E \xi_{33}^E p + 1}; \quad (47)$$

$$W_2(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}}{(T_{33}^E)^2 p^2 + 2T_{33}^E \xi_{33}^E p + 1}, \quad (48)$$

где $T_{33}^E = \sqrt{M_2/C_{33}^E}$ — постоянная времени; $\xi_{33}^E = \alpha\delta\sqrt{m/M_2}/3 = \alpha\delta^2 C_{33}^E/(3c^E\sqrt{M_2 C_{33}^E})$ — коэффициент затухания; $C_{33}^E = S_0/(s_{33}^E\delta) = m(c^E)^2/\delta^2$ — жесткость пьезоактюатора; причем при упруго-инерционной нагрузке постоянная времени $T_{33}^E = \sqrt{M_2/(C_{33}^E + C_e)}$.

При питании пьезоактюатора от источника напряжения с конечным сопротивлением получаем упругую податливость $s_{33} = k_s s_{33}^E$ и выражения (46)–(48) передаточных функций при управлении по напряжению в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}\delta}{T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1}; \quad (49)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi_2(p)}{F_2(p)} = -\frac{1/C_{33}}{T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1}; \quad (50)$$

$$W_2(p) = \frac{\Xi_2(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}}{T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1}, \quad (51)$$

где $T_{33} = \sqrt{M_2/C_{33}}$ — постоянная времени; $\xi_{33} = \alpha\delta\sqrt{m/M_2}/3 = \alpha\delta^2 C_{33}/(3c^E\sqrt{M_2 C_{33}})$ — коэффициент затухания; $C_{33} = S_0/(s_{33}\delta) = S_0/(k_s s_{33}^E\delta)$ — жесткость пьезоактюатора, причем при упруго-инерционной нагрузке постоянная времени $T_{33} = \sqrt{M_2/(C_{33} + C_e)}$.

Заключение

Полученные структурно-параметрические модели, параметрические структурные схемы и передаточные функции пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте определяют динамические и статические характеристики пьезоактюатора нано- и микроперемещений с учетом граничных условий, вида управления, физических параметров пьезоактюатора, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

Решение волнового уравнения дает структурно-параметрическую модель пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в системе управления при различных граничных условиях и описывает его динамические и статические характеристики с учетом физических параметров, внешней нагрузки и электрического сопротивления при работе в составе электромеханической системы наноперемещений.

Из-за реакции пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с учетом противоэлектродвижущей силы пьезоактюатора уменьшается упругая податливость и повышается жесткость пьезоактюатора. Увеличение сопротивления источника питания и согласующих цепей приводит к уменьшению упругой податливости пьезоактюатора. При высокой скорости перемещения пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте учитываем влияние этой скорости на ток пьезоактюатора.

Список литературы

1. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2008. 159 с.

2. **Физическая акустика.** Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
3. **Афонин С. М.** Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актюаторов наноперемещений // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 8. С. 39–45.
4. **Афонин С. М.** Исследование статических и динамических характеристик пьезодвигателя нано- и микроперемещений // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 5. С. 114–121.
5. **Afonin S. M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement // Chapter 9 in: *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*. Editor: Parinov I. A. New York: Nova Science Publisher, 2015. P. 225–242.
6. **Афонин С. М.** Статические характеристики и упругие податливости многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений // *Нано- и микросистемная техника*. 2016. Т. 18, № 1. С. 40–48.

7. **Полянин А. Д.** Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит. 2001. 576 с.
8. **Estanbouli Y., Hayward G., Radamas S., Barbenel J.** A block diagram model of the thickness mode piezoelectric transducer containing dual oppositely polarized piezoelectric zones // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006. Vol. 53. № 5. P. 1028–1036.
9. **Smyth K., Kim S.-G.** Experiment and simulation validated analytical equivalent circuit model for piezoelectric micromachined ultrasonic transducers // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015. Vol. 62, № 4, P. 744–765.
10. **Uchino K.** Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997. 347 p.
11. **Borboni A.** Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach. New York: CRC Press. 2008. 400 p.

Parametric Structural Schemes of Piezoactuators for Nano- and Micrometric Movements at a Longitudinal Piezoeffect

S. M. Afonin, eduems@mail.ru✉,

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

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

Received on June 23, 2016

Accepted on July 11, 2016

Solutions to the wave equation and structural-parametric models of piezoactuators at a longitudinal piezoeffect were obtained. Effects of the geometric and physical parameters of the piezoactuators and external load on its static and dynamic characteristics were determined. The parametric structural schemes for piezoactuators for nano- and micrometric movements at a longitudinal piezoeffect were obtained. The transfer functions were determined. The parametric structural schemes and the transfer functions of the piezoactuators were obtained for calculation of the automatic control systems for nano- and micrometric movements with piezoactuators at a longitudinal piezoeffect. The static and dynamic characteristics of the piezoactuators were determined. Application of the piezoactuators solves the problems of precise matching in microelectronics and nanotechnology, compensation for the temperature and gravitational deformations, atmospheric turbulence by a wave front correction. By solving the wave equation with allowance for the corresponding equations of the piezoelectric effect, the boundary conditions on the loaded working surfaces of a piezoactuator, the strains along the coordinate axes, it is possible to construct a structural parametric model of a piezoactuator. The transfer functions and the parametric structural schemes of the piezoelectric actuator were obtained from the equations describing the corresponding structural parametric models of the piezoactuators for nano- and micrometric movements at a longitudinal piezoeffect.

Keywords: piezoactuator, deformation, nano- and micrometric movements, parametric structural scheme, structural-parametric model, longitudinal piezoelectric effect, transfer function

For citation:

Afonin S. M. Parametric Structural Schemes of Piezoactuators for Nano- and Micrometric Movements at a Longitudinal Piezoeffect, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 112–121.

DOI: 10.17587/mau.18.112-121

References

1. **Panich A. E.** *P'ezokeramicheskie aktjuatory* (Piezoceramic actuators), Rostov-on-Don, Southern Federal University, 2008, 159 p. (in Russian).
2. **Mason W.** ed. *Physical Acoustics: Principles and Methods*, vol. 1, part A. *Methods and Devices*, New York: Academic Press, 1964, 515 p.
3. **Afonin S. M.** *Reshenie matrichnyh uravnenij v zadachah jelektrouprugosti dlja mnogoslojnyh aktjuatorov 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).
4. **Afonin S. M.** Investigation of static and dynamic characteristics of a piezomotor for nano- and micrometric movements, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, New York, Pleiades publishing, Inc., Springer, 2008, vol. 47, no. 5, pp. 778–785.

5. **Afonin S. M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement, *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*, New York, Nova Science Publisher, 2015, pp. 225–242.
6. **Afonin S. M.** *Staticheskie harakteristiki i uprugie podatlivosti mnogoslojnyh p'iezoaktjuatorov nano- i mikroperemewenij* (Static characteristics and elastic compliances of the multilayer piezoactuators for nano- and microdisplacements), *Nano- i Mikrosistmnaia Tehnika*. 2016, vol. 18, no. 1, pp. 40–48 (in Russian).
7. **Polyanin A. D.** *Spravochnik po lineynym uravneniyam matematicheskoy fiziki* (Handbook of linear partial differential equations), Moscow, Fizmatlit, 2001, 576 p. (in Russian).
8. **Estanbouli Y., Hayward G., Radamas S., Barbenel J.** A block diagram model of the thickness mode piezoelectric transducer containing dual oppositely polarized piezoelectric zones, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2006, vol. 53, no. 5, pp. 1028–1036.
9. **Smyth K., Kim S.-G.** Experiment and simulation validated analytical equivalent circuit model for piezoelectric micromachined ultrasonic transducers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, vol. 62, no. 4, pp. 744–765.
10. **Uchino K.** Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. Boston, MA, Kluwer Academic Publisher, 1997, 347 p.
11. **Borboni A.** Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach, New York, CRC Press, 2008, 400 p.