

Параллельное и кодовое управление многослойным пьезоактюатором наноперемещений

АФОНИН С.М.

Пьезоактюатор – пьезомеханическое устройство для приведения в действие механизмов и систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение и силу. Механические и регулировочные характеристики многослойных пьезоактюаторов при параллельном и кодовом управлении позволяют рассчитывать статические и динамические режимы работы многослойных пьезоактюаторов с учетом внешней нагрузки и физических и геометрических параметров. В статье определены статические и динамические характеристики многослойных пьезоактюаторов наноперемещений при параллельном и кодовом управлении, продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффектах. Получены механические и регулировочные характеристики многослойного секционного пьезоактюатора наноперемещений при параллельном и кодовом управлении.

Ключевые слова: многослойный секционный пьезоактюатор, деформация, наноперемещения, параллельное и кодовое управление, статические и динамические характеристики

Пьезоактюаторы наноперемещений, применяемые в микроэлектронике, нанотехнологии, нанобиологии, астрономии и др. [1–5], представляют собой пьезомеханические устройства для приведения в действие механизмов и систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывают электрические сигналы в механическое перемещение и силу.

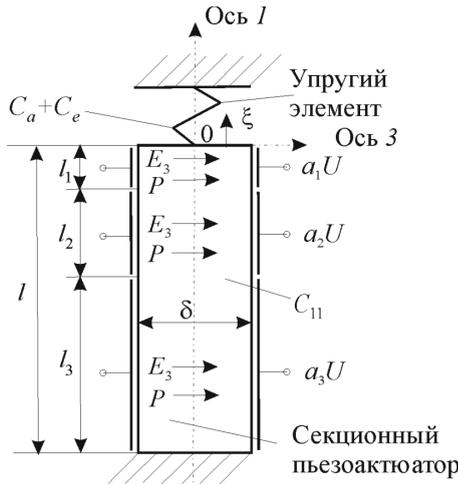
Пьезоактюаторы наноперемещений имеют диапазон перемещения от нескольких нанометров до десятков микрометров, чувствительность до 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н [1, 3, 6]. Увеличение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается за счет использования многослойного (секционного, составного, пакетного, блочного) пьезоактюатора [5, 7], конструктивное исполнение которого зависит от технологии изготовления. Многослойный пьезоактюатор выполняется в виде составного пьезопреобразователя из отдельных пьезопластин с их упругим поджатием, пакетного или блочного пьезопреобразователя из спеченных с применением серебряной пасты пьезопластин, составного пьезопреобразователя из пьезопакетов с упругим армированием, многослойного пьезопреобразователя, склеенного из пьезопластин, или многослойного пьезопреобразователя со слоями, нанесенными по толсто пленочной или тонко пленочной технологиям, причем пьезоактюатор делится на секции для кодового управления.

Многослойный секционный пьезоактюатор с кодовым управлением используется для электромеханического цифроаналогового преобразования. При кодовом управлении пьезослои в пьезоактюа-

торе соединены параллельно в каждой секции. Соответственно, число пьезослоев в секции равно выражению 2 в степени $0, 1, 2, 3, 4, \dots$, т.е. $1, 2, 4, 8, 16, \dots$, и на каждую секцию через коммутатор подается управляющее напряжение. Суммарная деформация многослойного пьезоактюатора с кодовым управлением складывается из деформаций отдельных секций пьезоактюатора при подаче на них напряжения и деформации многослойного пьезоактюатора при действии на него внешней силы.

В работе показано влияние жесткости нагрузки, т.е. отношения силы упругой реакции нагрузки к деформации нагрузки, на механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора при параллельном и кодовом управлении. При параллельном управлении все слои многослойного пьезоактюатора включены параллельно, а при кодовом управлении коммутатор обеспечивает подключение напряжения на секции многослойного пьезоактюатора.

Определим статические и динамические характеристики многослойных секционных пьезоактюаторов при параллельном и кодовом управлении (см. рисунок). Электромеханическое цифроаналоговое преобразование [8] с использованием в качестве преобразователя пьезоэлектрического многослойного пьезоактюатора при продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффектах обеспечивает наноперемещения, пропорциональные управляющему коду. Многослойный пьезоактюатор с кодовым управлением секциями применяется для прецизионного совмещения и юстировки. Многослойный секционный пьезоактюатор делится на N сек-



Кинематическая схема секционного пьезоактюатора наноперемещений при поперечном пьезоэффекте и кодовом управлении

ций с числом n_k пьезопластин в k -й секции. Секции пьезоактюатора соединены механически последовательно, а электрически изолированы. Пьезослои в секции соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

В общем виде уравнение обратного пьезоэффекта [4, 5] имеет вид:

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

где S_i – относительная деформация электромагнитоупругого актюатора по оси i ; T_j – механическое напряжение в актюаторе по оси j ; E_m – напряженность электрического поля в актюаторе по оси m ; s_{ij}^E – упругая податливость при $E = \text{const}$; d_{mi} – пьезомодуль; $i, j = 1, 2, \dots, 6$; $m = 1, 2, 3$.

Соответственно, уравнение обратного пьезоэффекта при поперечном пьезоэффекте пьезоактюатора имеет вид:

$$S_1 = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_1, \quad (2)$$

где S_1 – относительная деформация пьезоактюатора по оси 1 ; d_{31} – поперечный пьезомодуль; $E_3 = U / \delta$ – напряженность электрического поля в пьезоактюаторе по оси 3 ; U – напряжение на электродах; δ – толщина пьезоактюатора; s_{11}^E – упругая податливость по оси 1 при $E = \text{const}$; T_1 – механическое напряжение по оси 1 .

Уравнение обратного пьезоэффекта при продольном пьезоэффекте пьезоактюатора

$$S_3 = d_{33} E_3 + s_{33}^E T_3, \quad (3)$$

где S_3 – относительная деформация пьезоактюатора по оси 3 ; d_{33} – продольный пьезомодуль; s_{33}^E – упругая податливость по оси 3 при $E = \text{const}$; T_3 – механическое напряжение в пьезоактюаторе по оси 3 .

Уравнение обратного пьезоэффекта при сдвиговом пьезоэффекте пьезоактюатора

$$S_5 = d_{15} E_1 + s_{55}^E T_5, \quad (4)$$

где S_5 – относительная сдвиговая деформация пьезоактюатора; d_{15} – сдвиговый пьезомодуль; s_{55}^E – сдвиговая упругая податливость при $E = \text{const}$; T_5 – механическое напряжение сдвига.

Для секционного пьезоактюатора (см. рисунок) при поперечном пьезоэффекте в виде монолитного пьезоактюатора или пьезопластины с отдельными секционными электродами определяем длину секции пьезоактюатора:

$$l_k = 2^{k-1} h, \quad (5)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$; $l_1 = h$ – длина 1-й секции пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте; δ – толщина пьезопластины. Выражение длины секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте записываем в виде:

$$l = \sum_{k=1}^N l_k = (2^N - 1)h. \quad (6)$$

С учетом (5) определяем перемещение секционного пьезоактюатора (см. рисунок) при поперечном пьезоэффекте и подаче напряжения на k -ю секцию:

$$\Delta l_k = \frac{d_{31} 2^{k-1} h U}{\delta} = \frac{d_{31} l_k U}{\delta}, \quad (7)$$

тогда максимальное перемещение секционного пьезоактюатора при параллельном управлении и поперечном пьезоэффекте

$$\Delta l_{\max} = \frac{d_{31} (2^N - 1) h U}{\delta} = \frac{d_{31} l U}{\delta}. \quad (8)$$

Из (2) и (7) определяем перемещение секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте при подаче двоичного кода на вход коммутатора напряжения:

$$\Delta l = (d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U. \quad (9)$$

Найдем механические и регулировочные характеристики многослойных пьезоактюаторов с кодовым управлением при поперечном пьезоэффекте. Суммарная деформация многослойного секционного пьезоактюатора с кодовым управлением при поперечном пьезоэффекте равна сумме деформаций его отдельных секций при подаче на них на-

пряжения и деформации многослойного секционного пьезоактюатора от действия внешней силы.

Из (2), (8) и (9) получаем уравнение механической характеристики $\Delta l(F) = \Delta l(U, a_k, F) \Big|_{U=\text{const}, a_k=\text{const}}$ многослойного секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте с кодовым управлением по напряжению:

$$\begin{aligned} \Delta l &= (d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U - s_{11}^E F l / S_0 = \\ &= (d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U = F / C_{11}^E; \end{aligned} \quad (10)$$

$$C_{11}^E = S_0 / (s_{11}^E l), \quad (11)$$

следовательно,

$$\Delta l = \Delta l_{1\text{max}} (1 - F / F_{1\text{max}}); \quad (12)$$

$$\Delta l_{1\text{max}} = (d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U;$$

$$F_{1\text{max}} = \frac{(d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U S_0}{s_{11}^E l}.$$

Регулировочная характеристика показанного на рисунке многослойного секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругой нагрузке имеет вид:

$$\Delta l = \frac{(d_{31} h / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{11}^E}} \quad (13)$$

или

$$\Delta l = \frac{(d_{31} l_1 / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{11}^E}},$$

где $l_1 = h$ – длина 1-й секции пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте; C_a – жесткость армирующего элемента; C_e – жесткость нагрузки; $C_a + C_e$ – суммарная жесткость упругого элемента; C_{11}^E – жесткость секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте (см. рисунок).

В общем виде записываем выражение регулировочной характеристики многослойного пьезоак-

тюатора при параллельном и кодовом управлении, упругой нагрузке и продольном, поперечном или сдвиговом пьезоэффекте:

$$\Delta l = k_c U, \quad (14)$$

где k_c – коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении:

$$k_c = \begin{cases} \frac{(d_{33} l_1 / \delta) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{33}^E}}; \\ \frac{(d_{31} l_1 / \delta) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{11}^E}}; \\ \frac{(d_{15} l_1 / \delta) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{55}^E}}. \end{cases} \quad (15)$$

Откуда получаем выражение для коэффициента передачи многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении в общем виде:

$$k_c = \frac{(d_{mi} l_1 / \delta) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{ij}^E}}, \quad (16)$$

где l_1 – длина 1-й секции пьезоактюатора; d_{mi} – пьезомодуль; $C_{ij}^E = S_0 / (s_{ij}^E l)$ – жесткость пьезоактюатора. Для секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте из пьезокерамики ЦТС и кодовом управлении при упругой нагрузке для $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м/В, $l_1 / \delta = 1$, $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $a_3 = 0$, $a_4 = 1$, $C_{11}^E = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м, $C_e = 0,1 \cdot 10^7$ Н/м получаем $k_c = 1,9$ нм/В.

Коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора при параллельном управлении имеет вид

$$k_c = \frac{d_{mi} l / \delta}{1 + (C_a + C_e) / C_{ij}^E}. \quad (17)$$

Следовательно, определяем выражение для регулировочной характеристики многослойного секционного пьезоактюатора при упругой нагрузке в виде

$$\Delta l = \frac{(d_{mi}l_1 / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U}{1 + (C_a + C_e) / C_{ij}^E}, \quad (18)$$

где $l_1 = \delta, h, b$ – длина 1-й секции многослойного пьезоактюатора; δ – толщина пьезослоя; $d_{mi} = d_{33}, d_{31}, d_{15}$ – пьезомодуль; $C_{ij}^E = C_{33}^E, C_{11}^E, C_{55}^E$ – жесткость многослойного пьезоактюатора при продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффектах.

Передаточная функция многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте, параллельном управлении и упруго-инерционной нагрузке при $m \ll M$ в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01c^E / l$ имеет вид:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}l / \delta}{[1 + (C_a + C_e) / C_{11}^E] (T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}\xi_{11}p + 1)}; \quad (19)$$

$$T_{11} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_{11}^E}};$$

$$\xi_{11} = \frac{\alpha l^2 C_{11}^E}{3c^E \sqrt{M(C_a + C_e + C_{11}^E)}},$$

где T_{11}, ξ_{11} – постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена; m, M – массы многослойного пьезоактюатора и наружки.

С учетом выражений (16) и (19) получаем передаточную функцию многослойного секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте с кодовым управлением для упруго-инерционной нагрузки при $m \ll M$ в виде

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}l_1 / \delta \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{\left(1 + \frac{C_a + C_e}{C_{11}^E} \right) (T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}\xi_{11}p + 1)}. \quad (20)$$

Из (14), (20) получаем переходную характеристику многослойного пьезоактюатора при параллельном и кодовом управлении, упруго-инерционной нагрузке и электрическом сопротивлении $R \rightarrow 0$ в обобщенном виде:

$$\xi(t) = k_c U_0 h(t) = \xi_0 h(t), \quad (21)$$

где $h(t)$ – нормированная переходная характеристика многослойного пьезоактюатора; ξ_0 – установившееся значение перемещения.

Выражение для установившегося значения перемещения (21) многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении имеет вид:

$$\xi_0 = \left[\begin{array}{l} \frac{(d_{33}l_1 / \delta) U_0 \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{33}^E}} \\ \frac{(d_{31}l_1 / \delta) U_0 \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{11}^E}} \\ \frac{(d_{15}l_1 / \delta) U_0 \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{55}^E}} \end{array} \right] \quad (22)$$

или в общем виде:

$$\xi_0 = \frac{(d_{mi}l_1 / \delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U_0}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{ij}^E}}, \quad (23)$$

где соответствующие параметры многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте $l_1 = \delta$ и с индексами $mi=33, ij=33$, при поперечном пьезоэффекте $l_1 = h$ и с индексами $mi=31, ij=11$, при сдвиговом пьезоэффекте $l_1 = b$ и с индексами $mi=15, ij=55$.

Соответственно, нормированная переходная характеристика имеет вид

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{\xi_{ij}t}{T_{ij}}}}{\sqrt{1 - \xi_{ij}^2}} \sin(\beta_{ij}t + \varphi_{ij}), \quad (24)$$

где

$$\beta_{ij} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{ij}^2}}{T_{ij}}; \quad \varphi_{ij} = \arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{ij}^2}}{\xi_{ij}} \right).$$

Из (17) получаем выражение для установившегося значения перемещения многослойного пьезоактюатора при параллельном управлении:

$$\xi_0 = \frac{(d_{mi}l / \delta) U_0}{1 + \frac{C_a + C_e}{C_{ij}^E}}. \quad (25)$$

Для пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте из пьезокерамики ЦТС при параллельном управлении для упруго-инерционной нагрузки ($m \ll M$) при $U_0 = 300$ В, $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ М/В, $l / \delta = 15$,

$M=1$ кг, $C_a=0$, $C_{11}^E=1,5\cdot 10^7$ Н/м, $C_e=0,1\cdot 10^7$ Н/м получаем $\xi_0=0,84$ мкм, $T_f=0,25\cdot 10^{-3}$ с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электромеханика – некоторые проблемы XXI века. – Изв. РАН. Энергетика, 2003, № 1, с. 154–157.
2. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. – М.: Мир, 1978, 286 с.
3. Schultz J., Ueda J., Asada H. Cellular Actuators. – Oxford: Butterworth-Heinemann Publisher, 2017, 382 p.
4. Физическая акустика. Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований/Под ред. У. Мэсона. – М.: Мир, 1966, 592 с.
5. Афонин С.М. Структурно-параметрические модели пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте. – Электричество, 2016, № 11, с. 20–29.

6. Афонин С.М. Передаточные функции электромагнитоупругих актюаторов наноперемещений мехатронных систем. – Электричество, 2017, № 5, с. 40–45.

7. Afonin S.M. A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system. Chapter 8 in the book. Editors: Bartul Z., Trenor J. Advances in Nanotechnology, vol. 19. – New York: Nova Science Publisher, 2017, pp. 259–284.

8. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Профессия, 2004, 752 с.

[27.12.2017]

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

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 3, pp. 44–48

DOI:10.24160/0013-5380-2018-3-44-48

Parallel and Code Control of a Multilayer Nanodisplacement Piezoactuator

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

Piezoactuator is understood to mean a piezomechanical device for activating mechanisms or systems, or controlling them based on the piezoelectric effect, which converts electric signals into mechanical displacement and force. Knowing the mechanical and adjustment characteristics of multilayer piezoactuators, it becomes possible to calculate, in performing parallel and code control, the static and dynamic operating modes of multilayer actuators taking into account the external load and the physical and geometrical parameters. The static and dynamic characteristics of multilayer nanodisplacement piezoactuators are determined for parallel and code control, and for the longitudinal, transverse, and shear piezoeffects. The mechanical and adjustment characteristics of a multilayer sectioned nanodisplacement actuator are determined for parallel and code control.

Key words: multilayer sectioned piezoactuator, deformation, nanodisplacement, parallel and code control, static and dynamic characteristics

REFERENCES

1. Kopylov I.P. Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering), 2003, No. 1, pp. 154 – 157.
2. Lenk A. Elektromekhanicheskiye sistemy. Sistemy s sosredotochennymi parametrami (Electromechanical systems. Systems with concentrated parameters). Moscow, Publ. «Mir», 1978, 286 p.
3. Schultz J., Ueda J., Asada H. Cellular Actuators. Oxford: Butterworth-Heinemann Publisher, 2017, 382 p.
4. Fizicheskaya akustika. T.1 Part A. Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy/ Pod red. U. Mezona (Methods and devices of ultrasonic researches/Edit. by U. Meson). Moscow, Publ. «Mir», 1966, 592 p.

5. Afonin S.M. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2016, No. 11, pp. 20 – 29.

6. Afonin S.M. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2017, No. 5, pp. 40 – 45.

7. Afonin S.M. A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system. Chapter 8 in the book. Editors: Bartul Z., Trenor J. Advances in Nanotechnology, vol. 19. – New York: Nova Science Publisher, 2017, pp. 259–284.

8. Besekerskii V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya (The theory of automatic control systems). Moscow, Publ. «Professiya» 2004, 752 p.

[27.12.2017]