

## Условие абсолютной устойчивости системы управления электроупругим актюатором для наномехатроники

АФОНИН С.М.

*Электроупругий актюатор для наномехатроники находит применение в нанотехнологии, адаптивной оптике, микрохирургии, микроэлектронике, биомедицине. Он используется для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе электроупругого эффекта и для преобразования электрических сигналов в механические перемещения и силы. В системах наномехатроники пьезоактюатор применяется в сканирующей микроскопии, лазерных системах, астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных, гравитационных деформаций и атмосферной турбулентности, фокусировки, стабилизации изображения. В статье получено условие абсолютной устойчивости системы управления электроупругим актюатором для наномехатроники при детерминированных и случайных воздействиях. Найдено множество положений равновесия в мехатронной системе управления электроупругим актюатором, которое представляет собой отрезок прямой. Определена относительная ширина зоны покоя для системы управления деформацией электроупругого актюатора при симметричной и асимметричной гистерезисных характеристиках актюатора. При детерминированных воздействиях и выполнении ряда условий актюатора множество положений равновесия системы управления электроупругим актюатором для наномехатроники абсолютно устойчиво. При случайных воздействиях определена абсолютная устойчивость системы относительно математических ожиданий положений равновесия мехатронной системы управления электроупругим актюатором.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** электроупругий актюатор, система управления, условие абсолютной устойчивости, пьезоактюатор, наномехатроника

Применение электроупругого актюатора на основе пьезоэлектрических или электрострикционных эффектов перспективно в системах управления для наномехатроники. Электроупругий актюатор используется для нанотехнологий, адаптивной оптики, микрохирургии, микроэлектроники, нанобиологии. В системах наномехатроники пьезоактюатор применяется в сканирующей микроскопии, астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных, гравитационных деформаций, атмосферной турбулентности, фокусировки, стабилизации изображения [1–3].

Наличие гистерезиса деформации электроупругого актюатора усложняет проектирование мехатронных систем управления его деформацией. В отличие от системы управления с однозначной нелинейностью, для которой устойчивость положения равновесия исследуется с помощью функций Ляпунова, критерия Попова, устойчивость системы управления деформацией электроупругого актюатора с гистерезисной нелинейностью и множеством положений равновесия оценивается с применением критерия абсолютной устойчивости Якубовича [4–7].

Пьезоактюатор используется для приведения в действие механизмов, систем или управления ими

на основе пьезоэффекта и для преобразования электрических сигналов в механические перемещения и силы. Пьезоактюатор имеет перемещение 1 нм – 10 мкм, отклик 1–10 мс, усилие 100–1000 Н [6–14].

Передаточная функция электроупругого актюатора определяется в результате совместного решения уравнения электроупругости, волнового уравнения и граничных условий. Уравнение электроупругости [6, 7, 12–14] имеет вид:

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

где  $S_i$  – относительная деформация электроупругого актюатора по оси  $i$ ;  $d_{mi}$  – электроупругий модуль или пьезомодуль;  $E_m = U / \delta$  – напряженность электрического поля по оси  $m$ ;  $U$  – напряжение;  $\delta$  – толщина;  $s_{ij}^E$  – упругая податливость при  $E = \text{const}$ ;  $T_j$  – механическое напряжение по оси  $j$ .

Для электроупругого актюатора с одним закрепленным торцом и упругоинерционной нагрузкой при  $x=l$ , где  $l$  – длина актюатора, имеем уравнение сил на другом торце актюатора:

$$T_j S_0 = -M d^2 \xi(x, t) / dt^2 - C_e \xi(x, t), \quad (2)$$

где  $S_0$  – площадь поперечного сечения актюатора;  $M$  – перемещаемая масса;  $C_e$  – жесткость упругой нагрузки.

Преобразование Лапласа для волнового уравнения электроупругого актюатора при нулевых начальных условиях имеет вид обычного линейного дифференциального уравнения второго порядка [3, 6, 12, 13]:

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \gamma^2 \Xi(x, p) = 0, \quad \gamma = p/c^E + \alpha, \quad (3)$$

где  $\Xi(x, p)$  – преобразование Лапласа смещения сечения актюатора с  $x$  координатой;  $p$  – оператор Лапласа;  $\gamma$  – коэффициент распространения волны;  $c^E$  – скорость звука при  $E = \text{const}$ ;  $\alpha$  – коэффициент затухания волны.

Из (1) и (2) с учетом граничных условий актюатора получаем

$$\left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{mi} E_m(p) - \frac{s_{ij}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0} - \frac{s_{ij}^E C_e \Xi(p)}{S_0}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) для электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, при упруго-инерционной нагрузке

$$\frac{\Xi(p)\gamma}{\text{th}(h\gamma)} + \frac{s_{ij}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0} + \frac{s_{ij}^E C_e \Xi(p)}{S_0} = d_{mi} E_m(p), \quad (5)$$

где  $\Xi(p)$  – преобразование Лапласа перемещения второго торца актюатора.

Из (5) находим передаточную функцию электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, при упруго-инерционной нагрузке: в виде

$$W_E(p) = \frac{\Xi(p)}{E_m(p)} = \frac{d_{mi}}{s_{ij}^E M p^2 / S_0 + \gamma \text{th}(h\gamma) + s_{ij}^E C_e / S_0}, \quad (6)$$

а из (6) – передаточные функции с распределенными параметрами электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом:

$$W_E(p) = \frac{\Xi(p)}{E_m(p)} = \frac{d_{mi} l}{M p^2 / C_{ij}^E + h\gamma \text{th}(h\gamma) + C_e / C_{ij}^E};$$

$$W_U(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{mi} l / \delta}{M p^2 / C_{ij}^E + h\gamma \text{th}(h\gamma) + C_e / C_{ij}^E}, \quad (7)$$

где  $E_m(p)$ ,  $U(p)$  – преобразования Лапласа напряженности электрического поля и напряжения;  $C_{ij}^E = S_0 / (s_{ij}^E l)$  – жесткость электроупругого актюатора.

Из (7) с учетом двух членов ряда, полученных при разложении гиперболического котангенса, найдем передаточные функции с сосредоточенными параметрами электроупругого актюатора, закрепленного одним торцом, при упруго-инерционной нагрузке:

$$W_E(p) = \frac{\Xi(p)}{E_m(p)} = \frac{d_{mi} l}{(1 + C_e / C_{ij}^E)(T_t^2 p + 2T_t \xi_t p + 1)};$$

$$W_U(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{mi} l / \delta}{(1 + C_e / C_{ij}^E)(T_t^2 p + 2T_t \xi_t p + 1)}; \quad (8)$$

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

$$\xi_t = \alpha l^2 C_{ij}^E / [3c^E \sqrt{M(C_{ij}^E + C_e)}],$$

где  $T_t$ ,  $\xi_t$  – постоянная времени и коэффициент затухания электроупругого актюатора. Получаем выражение статического перемещения  $\xi(l, \infty)$  электроупругого актюатора при упруго-инерционной нагрузке в установившемся режиме:

$$\xi(l, \infty) = (d_{mi} l / \delta) U_0 / (1 + C_e / C_{ij}^E), \quad (9)$$

где  $U_0$  – амплитуда напряжения.

Для описания гистерезиса деформации электроупругого актюатора используем модель Преайзаха [8, 9]. При рассмотрении структуры системы управления актюатором для наномехатроники имеем передаточную функцию линейной части системы  $W(p)$  и гистерезисную функцию  $S_i$  электроупругого актюатора. Гистерезисная функция деформации электроупругого актюатора для наномехатроники имеет вид:

$$S_i = F[E_m|_0^t, t, S_i(0), \text{sign} \dot{E}_m], \quad (10)$$

где значение гистерезисной функции  $S_i$  с основными и частными циклами зависит от напряженности электрического поля  $E_m$  на промежутке  $[0, t]$  от времени  $t$ , от начального значения относительной деформации  $S_i(0)$  и знака скорости изменения напряженности  $\dot{E}_m$  электрического поля. Для определения стационарного множества системы управления актюатором при устойчивой линейной части системы управления на плоскости  $(E_m, S_i)$  проведем прямую  $L$  (рис. 1) с уравнением  $E_m + k S_i = 0$ , где  $k = W(0)$  – коэффициент передачи или значение передаточной функции при  $p \rightarrow 0$  линейной части системы управления. Множество точек  $M$  пересечения этой прямой с гистерезисной характеристикой деформации электроупругого актюатора представляет собой выделенный отрезок прямой.

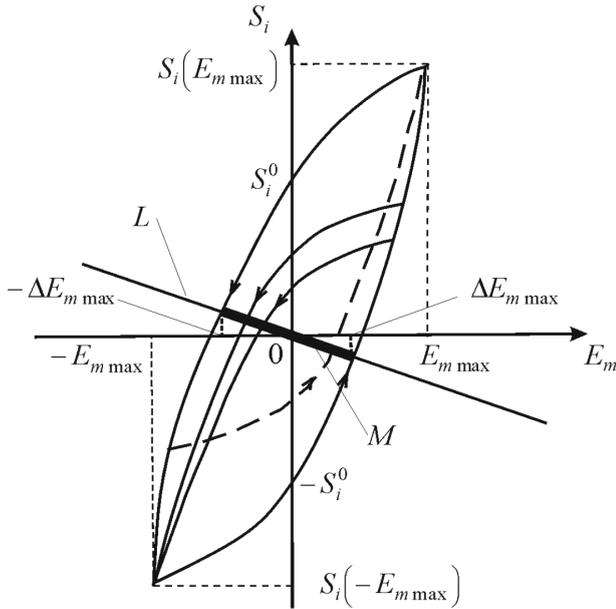


Рис. 1. Гистерезисная характеристика деформации электроупругого актюатора

Уравнение для стационарного решения системы:

$$E_{m0} + kS_{i0}(E_{m0}) = 0, \quad (11)$$

где  $E_{m0}$ ,  $S_{i0}$  – координаты стационарного решения системы. Каждой точке пересечения гистерезисной нелинейности деформации и прямой  $L$  соответствует одно положение равновесия с координатами  $(E_{m0}, S_{i0})$ . Рассмотрим проекцию стационарного множества положений равновесия на ось  $x$ , где координата  $x = E_m / E_{m \max}$  (рис. 1). Подставим в уравнение прямой (11) выражение для симметричной основной гистерезисной петли электроупругого актюатора:

$$S_i = d_{mi} E_m - \gamma_{mi} E_{m \max} \left( 1 - \frac{E_m^2}{E_{m \max}^2} \right)^{n_{mi}} \text{sign} \dot{E}_m, \quad (12)$$

где  $E_m$  – амплитуда напряженности электрического поля в актюаторе;  $S_{i \max}$  – максимальное относительное перемещение актюатора;  $\gamma_{mi} = S_i^0 / E_{m \max}$  – остаточный гистерезис;  $S_i^0$  – остаточное относительное значение статической гистерезисной характеристики при  $E_m = 0$ ;  $n_{mi}$  – степенной коэффициент, определяемый формой гистерезисной кривой, для актюатора из пьезокерамики ЦТС коэффициент  $n_{mi} = 1$ .

Определим относительную ширину зоны покоя  $2\Delta$  для системы управления деформацией электроупругого актюатора при симметричной основной петле гистерезиса, подставив в (11) значение  $E_{m0} = E_{m \max}$ :

$$\Delta E_{m \max} + kS_i^+(\Delta E_{m \max}) = 0, \quad (13)$$

где  $\Delta$  – относительное значение напряженности электрического поля;  $S_i^+(\Delta E_{m \max})$  – значение относительной деформации на восходящей ветви гистерезисной характеристики при  $\dot{E}_m > 0$  и  $E_{m0} = E_{m \max}$ ;  $S_i^-(\Delta E_{m \max})$  – значение относительной деформации на нисходящей ветви гистерезисной характеристики при  $\dot{E}_m < 0$  и  $E_{m0} = -\Delta E_{m \max}$  (рис. 1). Из (12) получаем при симметричной основной петле гистерезиса уравнение:

$$S_i^+(\Delta E_{m \max}) = d_{mi} \Delta E_{m \max} - \gamma_{mi} E_{m \max} \left( 1 - \frac{(\Delta E_{m \max})^2}{E_{m \max}^2} \right). \quad (14)$$

В результате преобразования (14) запишем

$$S_i^+(\Delta E_{m \max}) = d_{mi} \Delta E_{m \max} - \gamma_{mi} E_{m \max} (1 - \Delta^2). \quad (15)$$

Подставив (15) в уравнение (13), имеем выражение

$$\Delta E_{m \max} + k E_{m \max} [d_{mi} \Delta - \gamma_{mi} (1 - \Delta^2)] = 0,$$

откуда

$$\Delta + k[d_{mi} \Delta - \gamma_{mi} (1 - \Delta^2)] = 0. \quad (16)$$

Из (16) получаем квадратное уравнение для определения относительной ширины зоны покоя  $2\Delta$  электроупругого актюатора:

$$\Delta^2 + \frac{(1 + kd_{mi})}{k\gamma_{mi}} \Delta - 1 = 0. \quad (17)$$

Относительное значение ширины зоны покоя  $2\Delta$  для системы управления деформацией электроупругого актюатора при симметричной петлевой характеристике актюатора находим из (17):

$$2\Delta = -\frac{(1 + kd_{mi})}{k\gamma_{mi}} + \sqrt{\frac{(1 + kd_{mi})^2}{k^2 \gamma_{mi}^2} + 4}. \quad (18)$$

Для асимметричной петлевой характеристики электроупругого актюатора при восходящей ветви гистерезиса и  $\text{sign} \dot{E}_n = +1$  получаем  $\gamma_{mi} = \gamma_{mi}^+$ , при нисходящей ветви гистерезиса и  $\text{sign} \dot{E}_n = -1$  имеем  $\gamma_{mi} = \gamma_{mi}^-$ , где верхние индексы «плюс» и «минус» – для восходящей и нисходящей ветвей. Следовательно, формулу для значения относительной ши-

рины зоны покоя  $\Delta^+ + \Delta^-$  для системы управления деформацией электроупругого актюатора при асимметричной петлевой характеристике актюатора можем записать в виде:

$$\Delta^+ + \Delta^- = -\frac{(1+kd_{mi})}{2k} \left( \frac{1}{\gamma_{mi}^+} + \frac{1}{\gamma_{mi}^-} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(1+kd_{mi})^2}{k^2(\gamma_{mi}^+)^2} + 4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(1+kd_{mi})^2}{k^2(\gamma_{mi}^-)^2} + 4}. \quad (19)$$

Функция  $S_i$  гистерезисной нелинейности электроупругого актюатора непрерывна. Найдем минимальное  $v_{1mi}$  и максимальное  $v_{2mi}$  значения тангенса угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности электроупругого актюатора:

$$v_{1mi}, v_{2mi} \in [0, v_{mi}]; \quad v_{mi} = \max[dS_i / dE_m], \quad (20)$$

Значения  $v_{1mi}$  и  $v_{2mi}$  определяем по гистерезисной статической характеристике деформации (рис. 1), измеренной при максимально допустимой напряженности электрического поля в актюаторе, где  $v_{1mi} = 0$  и  $v_{2mi} = v_{mi}$ . Гистерезисную петлю электроупругого актюатора следует обходить против часовой стрелки. Отношение тангенсов угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности электроупругого актюатора при продольном, поперечном, сдвиговом пьезоэффектах пропорционально отношению соответствующих пьезомодулей:

$$v_{33} : v_{31} : v_{15} = d_{33} : d_{31} : d_{15}. \quad (21)$$

Применяя критерий Якубовича [4], являющийся развитием критерия Попова, находим условие абсолютной устойчивости системы управления актюатором при детерминированных воздействиях, записываем условие абсолютной устойчивости системы управления деформацией электроупругого актюатора при детерминированных воздействиях и  $v_{1mi} = 0$  и  $v_{2mi} = v_{mi}$ :

$$\operatorname{Re} v_{mi} W(j\omega) \geq 1, \quad (22)$$

где  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – частота.

Рассмотрим геометрическую интерпретацию условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией электроупругого преобразователя. На рис. 2 в комплексной плоскости приведена амплитудно-фазовая частотная характеристика для частотной передаточной функции  $v_{mi} W(j\omega)$  и заштрихована запретная область для амплитудно-фазовых частотных характеристик, ограниченная вертикальной прямой, проходящей через точку с координатой  $(-1)$  на действительной оси. Амплитуд-

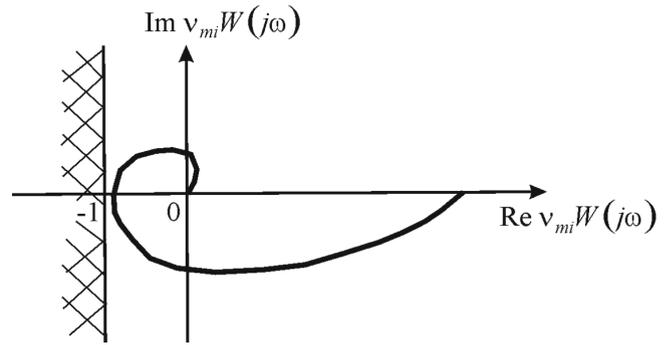


Рис. 2. Геометрическое изображение условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией электроупругого актюатора

но-фазовая характеристика разомкнутой системы  $v_{mi} W(j\omega)$  должна быть для всех значений  $\omega \geq 0$  расположена правее вертикальной прямой  $\operatorname{Re} v_{mi} W(j\omega) = -1$ . Для системы управления актюатором из пьезокерамики ЦТС при детерминированных воздействиях максимальное значение тангенса угла касательной к нелинейности составляет  $v_{mi} = 1$  нм/В.

Условие абсолютной устойчивости системы управления деформацией электроупругого актюатора при случайных воздействиях определяется на основе критерия Якубовича [5]. Найдем критерий абсолютной устойчивости для системы управления деформацией электроупругого преобразователя с гистерезисной характеристикой при  $v_{1mi} = 0$  и  $v_{2mi} = v_{mi}$ . Для того чтобы нелинейная система управления деформацией электроупругого актюатора при случайных воздействиях, на которую действует внешнее воздействие, содержащее случайную составляющую

$$f(t) = m_f(t) + f^0(t); \quad |m_f(t)| \leq R_f, \quad (23)$$

где  $R_f$  – верхняя оценка модуля математического ожидания  $m_f$ , была абсолютно устойчивой относительно математических ожиданий, достаточно, чтобы при всех значениях  $\omega \geq 0$  выполнялось условие

$$\operatorname{Re} v_{mi} W(j\omega) + 1 \geq 0 \quad (24)$$

и производная нелинейной характеристики удовлетворяла неравенству

$$0 < \frac{\partial m_{S_i}(m_{E_m}, \sigma_{E_m})}{\partial m_{E_m}} < v_{mi}. \quad (25)$$

Дисперсию  $\sigma_{E_m}^2$  оценим с использованием дисперсии внешнего воздействия, т.е.

$$\sigma_{E_m}^2 \leq k_\sigma^2 \sigma_f^2, \quad (26)$$

где  $k_\sigma$  – взаимная корреляционная функция  $f$  и  $E_m$ . Среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{E_m}$  заменим его верхним значением и двойное неравенство запишем в виде

$$0 < \frac{\partial m_{S_i}(m_{E_m}, k_\sigma \sigma_f)}{\partial m_{E_m}} < v_{mi}. \quad (27)$$

Используя метод статистической линеаризации, получаем производную нелинейной характеристики:

$$\frac{\partial m_{S_i}}{\partial m_{E_m}} = \frac{1}{2\sigma_{E_m}^2} \int_{-\infty}^{\infty} [S_i^+(E_m) + S_i^-(E_m)] \times \frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2} \times (E_i - m_{E_i}) \frac{1}{\sigma_{E_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2}} dE_m, \quad (28)$$

где  $S_i^+(E_m)$ ;  $S_i^-(E_m)$  – восходящая и нисходящая кривые гистерезисной петли.

Для электроупругого актюатора вершины основных гистерезисных петель находятся на начальной кривой  $S_i = F_1(E_m)$ , причем  $S_{i \max} = d_{mi \max} E_{m \max}$ , где  $d_{mi \max}$  – максимальное значение пьезомодуля для каждой основной гистерезисной кривой пьезопреобразователя. Из (28) получаем выражение для производной нелинейной характеристики:

$$\frac{\partial m_{S_i}}{\partial m_{E_m}} = \frac{1}{\sigma_{E_m}^2} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(E_m) (E_m - m_{E_m}) \times \frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2} \times \frac{1}{\sigma_{E_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2}} dE_m. \quad (29)$$

Выражение для начальной кривой электроупругого актюатора из пьезокерамики ЦТС имеет вид:

$$F_1(E_m) = d_{mi}^0 E_m + a_{mi} E_m^3 = d_{mi \max} E_m, \quad (30)$$

значит максимальное значение пьезомодуля

$$d_{mi \max} = d_{mi}^0 + a_{mi} E_m^2,$$

где  $d_{mi}^0$  – начальное значение пьезомодуля;  $a_{mi}$  – коэффициент степенного полинома.

Из (29) получаем производную нелинейной характеристики:

$$\frac{\partial m_{S_i}}{\partial m_{E_m}} = \frac{1}{\sigma_{E_m}^2} \int_{-\infty}^{\infty} d_{mi \max} E_m (E_m - m_{E_m}) \times \frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2} \times \frac{1}{\sigma_{E_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E_m - m_{E_m})^2}{2\sigma_{E_m}^2}} dE_m.$$

При  $m_{E_m} = 0$ , используя метод статистической линеаризации, найдем значение частной производной относительного перемещения актюатора по напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial m_{S_i}}{\partial m_{E_m}} = \frac{1}{\sigma_{E_m}^2} \int_{-\infty}^{\infty} d_{mi \max} E_m^2 \times \frac{E_m^2}{2\sigma_{E_m}^2} \times \frac{1}{\sigma_{E_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{E_m^2}{2\sigma_{E_m}^2}} dE_m = d_{mi \max};$$

$$0 < d_{mi \max} \leq v_{mi}. \quad (30)$$

С учетом (30) запишем условие абсолютной устойчивости системы управления деформацией электроупругого актюатора при случайных воздействиях и значениях  $v_{1mi} = 0$ ,  $v_{2mi} = v_{mi}$ :

$$\operatorname{Re} v_{mi} W(j\omega) = \operatorname{Re} d_{mi \max} W(j\omega) \geq -1.$$

Для системы управления актюатором из пьезокерамики ЦТС при случайных воздействиях максимальное значение тангенса угла касательной к нелинейности составляет  $v_{mi} = 1,7$  нм/В.

Полученное условие абсолютной устойчивости системы управления электроупругим актюатором для наномехатроники при детерминированных и случайных воздействиях позволяет проводить синтез корректирующего устройства системы управления деформацией электроупругого актюатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электромеханика - некоторые проблемы XXI века. – Изв. РАН. Энергетика, 2003, № 1, с. 154–157.
2. Мионов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004, 144 с.
3. Афонин С.М. Решение волнового уравнения для задач электроупругости. – Электричество, 2005, № 4, с. 41–45.
4. Yakubovich V.A. Popov's method and its subsequent development. – European Journal of Control, 2002, vol. 8. No. 3, pp. 200–208.
5. Наумов Б.Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972, 544 с.
6. Afonin S.M. Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement. Ch. 9/Ed I.A. Parinov/ Piezoelectrics and Nanomaterials:

Fundamentals, Developments and Applications. New York: Nova Science Publisher, 2015, pp. 225–242.

7. **Физическая акустика**, т. 1, ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований/ Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966, 592 с.

8. **Preisach A.** Über die magnetische Nachwirkung. – Zeitschrift für Physik. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1935, B. 94, No. 5 und 6, pp. 277–302.

9. **Турик А.В.** К теории поляризации и гистерезиса сегнетоэлектриков. – Физика твердого тела, 1963, т. 5, No. 4, с. 1213–1215.

10. **Lynch C.S.** The effect of uniaxial stress on the electro-mechanical response of 8/65/35 PLZT. – Acta materialia, 1996, vol. 44, No. 10, pp. 4137–4148.

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

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

13. **Afonin S.M.** Structural-parametric model of electro-magnetoelastic actuator for nanomechanics. – Actuators, 2018, vol. 7, No. 1, pp. 1–9.

14. **Afonin S.M.** Structural-parametric model and diagram of a multilayer electromagnetoelastic actuator for nanomechanics. – Actuators, 2019, vol. 8, No 3, pp. 1–14.

[18.06.2020]

*А в т о р: Афонин Сергей Михайлович – кандидат техн. наук, диссертацию защитил в 1982 г., доцент, старший научный сотрудник Московского института электронной техники.*

*Electrichestvo*, 2020, No. 10, pp. 52–58

DOI:10.24160/0013-5380-2020-10-52-58

## The Condition for Absolute Stability of an Electroelastic Actuator Control System for Nanomechanics

**AFONIN Sergey M.** (*Moscow Electronic Technique Institute, Moscow, Russia*) – Associate Professor, Senior Scientist

*An electroelastic actuator for nanomechanics is used in nanotechnology, adaptive optics, microsurgery, microelectronics, and biomedicine to actuate or control mechanisms, systems based on the electroelastic effect, and to convert electrical signals into mechanical displacements and forces. In nanomechanical systems, a piezoactuator is used in scanning microscopy, laser systems, in astronomy for precision alignment, for compensation of temperature, gravitational deformations and atmospheric turbulence, focusing, and stabilizing the image. In this study, a condition for absolute stability of an electroelastic actuator control system for nanomechanics under deterministic and random inputs is obtained. A number of equilibrium positions in an electroelastic actuator mechatronic control system are found, the totality of which is represented by a straight line segment. The electroelastic actuator's deformation control system dead band relative width is determined for the actuator's symmetric and asymmetric hysteresis characteristics. Under deterministic inputs and with fulfilling the condition for the derivative of the nonlinear hysteresis actuator deformation characteristic, the set of equilibrium positions of the electroelastic actuator control system for nanomechanics is absolutely stable. Under random inputs, the system absolute stability with respect to the mathematical expectations of the electroelastic actuator mechatronic control system equilibrium positions has been determined subject to fulfilling the condition on the derivative of the actuator hysteresis characteristic.*

**Key words:** absolute stability condition, control system, electroelastic actuator, piezoactuator, nanomechanics

### REFERENCES

1. **Kopylov I.P.** *Izv. RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Energy)*, 2003, No. 1, pp. 154–157.

2. **Mironov V.L.** *Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii (Fundamentals of Scanning Probe Microscopy)*. М.: Tekhnosfera, 2004, 144 p.

3. **Afonin S.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 4, pp. 41–45.

4. **Yakubovich V.A.** Popov's method and its subsequent development. – *European Journal of Control*, 2002, vol. 8, No. 3, pp. 200–208.

5. **Naumov B.N.** *Teoriya nelineynykh avtomaticheskikh sistem. Chastotnyye metody (Theory of nonlinear automatic systems. Frequency methods)*, 1972, 544 p.

6. **Afonin S.M.** Structural-parametric model and transfer functions of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement. Ch. 9/Ed. I.A. Parinov. *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*. New York: Nova Science Publisher, 2015, pp. 225–242.

7. **Fizicheskaya akustika**, t. 1, ch. A. *Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy/ Pod red. U. Mezona (Physical acoustics, vol. 1, part A. Methods and devices for ultrasonic research / Ed. U. Mason)*. М.: Mir, 1966, 592 p.

8. **Preisach A.** Über die magnetische Nachwirkung. — Zeitschrift für Physik. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1935, B. 94, No. 5 und 6, ss. 277–302.
9. **Turik A.V.** *Fizika tverdogo tela – in Russ. (Physics of the Solid State)*, 1963, vol. 5, No. 4, pp. 1213–1215.
10. **Lynch C.S.** The effect of uniaxial stress on the electro-mechanical response of 8/65/35 PLZT. — *Acta materialia*, 1996, vol. 44, No. 10, pp. 4137–4148.
11. **Panich A.Ye.** *P'yezokeramicheskiye aktyuatory (Piezoceramic actuators)*. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2008, 159 p.
12. **Afonin S.M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system. Ch. 8/Ed. Z. Bartul, J. Trenor. *Advances in Nanotechnology*, vol. 19. New York: Nova Science Publisher, 2017, pp. 259–284.
13. **Afonin S.M.** Structural-parametric model of electro-magnetoelastic actuator for nanomechanics. — *Actuators*, 2018, vol. 7, No. 1, pp. 1–9.
14. **Afonin S.M.** Structural-parametric model and diagram of a multilayer electromagnetoelastic actuator for nanomechanics. — *Actuators*, 2019, vol. 8, No 3, pp. 1–14.

[18.06.2020]