

УДК 658.527.011

А.А. Иванов

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЯ
С ПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментальных исследований пьезопреобразователей с продольной поляризацией, используемых в конструктивных схемах пьезодвигателей с косыми соударениями и двумерными колебаниями при различных комбинациях продольных, поперечных, изгибных и других колебаний. Предложена методика расчета характеристик ПД.

Ключевые слова: пьезодвигатель, подвижное звено, метод косых соударений, продольная поляризация.

Пьезоэлектрический эффект был открыт братьями Кюри в 1880 г. Впервые его начали применять, используя естественные монокристаллы (такие, как кварц) в 1920 г. В 1950 г. появляется пьезоэлектрическая керамика, например, PZT. Позже появились пьезоэлектрические полимеры (PVDF). Было открыто, что для получения пьезоэлектрического эффекта пьезокерамику необходимо подвергать процессу поляризации, а для улучшения пьезоэлектрических свойств структура кристалла должна быть асимметричной.

В настоящее время активно ведутся исследования различных конструкций высокочастотных пьезокерамических преобразователей (ПКП) с целью разработки на их основе пьезодвигателей (ПД) промышленных приводов для систем точного позиционирования (СТП). Пьезоэлектрики являются обратимыми электрохимическими преобразователями, то есть они способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Преобразователи, основанные на использовании прямого пьезоэффекта, называют преобразователями-генераторами. Они имеют механический вход и электрический выход. Преобразователи, основанные на использовании обратного пьезоэффекта, называют преобразователями-двигателями, которые имеют электрический вход и механический выход. Для пьезоактивного материала характерно наличие поляризационного заряда при его механической деформации, а при внесении его в электрическое поле наблюдается изменение его длины. Установлено, что изменение направления электрического поля вызывает переход от растягивающего напряжения пьезоэлемента (ПЭ) к сжимающему. Электрическая поляризация, связанная с поверхностным зарядом, в первом приближении увеличивается линейно относительно механического напряжения.

Основой пьезодвигателя служит пьезоэлектрик, то есть элемент, изготовленный из пьезоэлектрического материала. Если ПЭ используется как электромеханический преобразователь, то его ориентацию выбирают из условия достижения наибольшего эффекта. Внешние силы (механические и электрические), воздействующие на ПЭ, могут быть как распределенными, так и сосредоточенными. Распределенные силы позволяют достичь более эффективного преобразования, поэтому для более полной поляризации объема ПЭ используют электроды, покрывающие всю площадь граней пьезоэлектрика.

Токопроводящие покрытия на гранях ПЭ можно получить, например, напылением металла в вакууме. При воздействии на ПЭ сосредоточенной силы ее можно преобразовать в распределенную путем установки накладок из упругого материала, которые должны плотно прилегать к граням ПЭ.

В СТП находят применение схемы с косыми соударениями, в которых пьезодвигатель расположен под углом к контактной плоскости подвижного звена (ПЗ), смонтированного в шариковых направляющих. Непрерывное движение ПЗ происходит за счет серии косых соударений наконечника ПД с частотой колебаний напряжения, подводимого к пьезопреобразователю.

Расчет характеристик пьезодвигателя (ПД) проведем применительно к схеме перемещения подвижного звена (ПЗ) методом косых соударений (рис. 1).

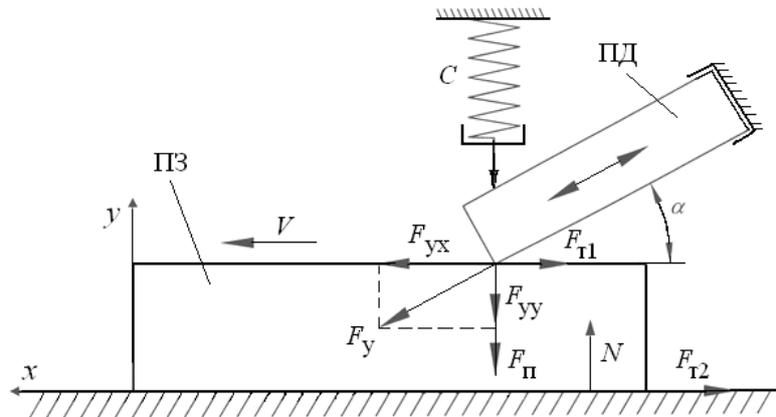


Рис. 1. Схема сил, действующих на ПЗ, при его перемещении методом косых соударений:
ПД – пьезодвигатель с продольной поляризацией

Сила удара F_y возникает при быстрой деформации растяжения ПД. Горизонтальная составляющая F_{yx} этой силы является движущей силой.

Первое условие перемещения ПЗ имеет вид:

$$F_{yx} > F_{ин} + F_{т2},$$

где $F_{yx} = F_y \cos \alpha$; $F_{ин} = ma$ – сила инерции ПЗ; m, a – масса и ускорение ПЗ; $F_{т2} = Nf_2$ – сила трения в направляющих ПЗ; $N = P + F_{yy} + F_{п}$ – нормальная реакция опоры ПЗ; f_2 – коэффициент трения в направляющих; $P = mg$ – вес каретки ПЗ; g – ускорение свободного падения.

Второе условие перемещения ПЗ:

$$F_{yx} < F_{т1},$$

где $F_{т1} = (F_{yy} + F_{п})f_1$ – сила трения между ПД и контактной плоскостью ПЗ; $F_{yy} = F_y \sin \alpha$; $F_{п}$ – сила поджатия ПД пружиной; f_1 – коэффициент сухого трения скольжения.

Для выполнения первого условия необходимо, чтобы коэффициент трения f_2 был минимален. Это достигается заменой направляющих скольжения ПЗ на направляющие качения (например, шариковые направляющие). Для выполнения второго условия необходимо увеличить коэффициент трения f_1 (например, за счет поджатия пружины). Это позволяет исключить или минимизировать проскальзывание точки контакта ПД относительно поверхности ПД.

Подставим значения всех действующих сил и запишем оба условия в развернутом виде:

$$\frac{F_{п}f_1}{\cos \alpha - f_1 \sin \alpha} > F_y > \frac{m(a + gf_2) + f_2}{\cos \alpha - f_2 \sin \alpha}.$$

Полученное выражение показывает границы, в которых должно лежать значение силы удара, возникающего при колебаниях ПД.

Таким образом, движение ПЗ будет представлять собой совокупность дискретных перемещений. При каждом ударе ПД по поверхности ПЗ сила удара будет меняться от нуля до максимального значения и снова до нуля, тем самым будет изменяться и сила трения между контактирующими звеньями – силу трения покоя будет сменять сила трения скольжения.

Структурно-параметрическая модель пьезодвигателя строится в результате совместного решения волнового уравнения, соответствующего уравнения пьезоэффекта и граничных условий на двух нагруженных рабочих поверхностях пьезодвигателя [1, 2]. Рассмотрим простой ПД в виде пьезопластины толщиной δ с электродами, нанесенными на две параллельные грани, которые перпендикулярны вектору X (рис. 2).

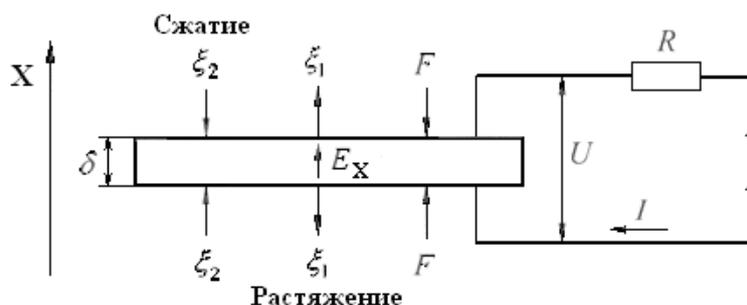


Рис. 2. Схема простого пьезодвигателя с продольным пьезоэффектом:
 ξ_1, ξ_2 – смещения граней пластины при растяжении и сжатии; F – внешние силы;
 E_X – напряженность электрического поля; U – напряжение на электродах пластины;
 I – ток; R – нагрузка

Для вывода уравнений колебаний ПД выделим элемент высотой dx с площадью поперечного сечения S_0 . Запишем в общем виде уравнение сил, действующих на выделенный элемент:

$$F_{ин} + F_{вт} + P_{yc} = F_{вк}, \quad (1)$$

где $F_{ин}$ – инерционная сила сопротивления; $F_{вт}$ – сила вязкого трения, пропорциональная скорости смещения сечения x пластины; P_{yc} – сила упругого сопротивления; $F_{вк}$ – сила, вызывающая вынужденные колебания пьезодвигателя.

Уравнение обратного пьезоэффекта для продольных колебаний при управлении по напряжению имеет вид [1, 2]

$$S_X = d_{33}E_X(t) + \varepsilon_X T_X, \quad (2)$$

где $S_X = \partial \xi / \partial t$ – скорость деформации пьезопластины в направлении X ; ξ – смещение сечения x пластины; d_{33} – пьезомодуль при продольной поляризации пластины; $E_X(t) = U(t) / \delta$ – напряженность электрического поля в направлении X ; $U(t)$ – напряжение на электродах пьезопластины; ε_X – упругая податливость в направлении X при $E_X = \text{const}$; T_X – механическое напряжение в пьезопластине.

Уравнение сил, действующих на пьезопластину, представим в виде

$$T_X S_0 = F + m \partial S_X / \partial t, \quad (3)$$

где F – внешняя сила, приложенная к пьезопластине; m – перемещаемая масса ПЗ; $\partial S_X / \partial t$ – ускорение смещения сечения пьезопластины.

Решая совместно уравнения (1), (2) и (3), можно получить систему уравнений, описывающих структурно-параметрическую модель простого пьезодвигателя с продольной поляризацией пластины.

Механическая характеристика пьезодвигателя при $E_X = \text{const}$ представляет собой зависимость удлинения Δl от внешней нагрузки F (усилия стяжки пакета пьезопластин):

$$\Delta l = d_{33}nU - \frac{\varepsilon_X Fl}{S_0}, \quad (4)$$

где n – число пьезопластин в ПД; $l = n\delta$ – длина составного ПД.

Из уравнения (4) видно, что удлинение Δl принимает максимальное значение при $F = 0$:

$$\Delta l = d_{33}nU_{max}.$$

Максимальное рабочее усилие, которое способен выдавать составной ПД, можно определить из (4) при $\Delta l = 0$:

$$F_{max} = \frac{d_{33}E_{Xmax}S_0}{\varepsilon_X},$$

где $E_{Xmax} = U_{max} / \delta$ – максимальное значение напряженности электрического поля в направлении X .

Для вывода системы уравнений эквивалентного механического четырехполюсника составного пьезодвигателя рассматриваются и решаются соответствующие матричные уравнения [1, 2]. В результате совместного рассмотрения системы уравнений для эквивалентного четырехполюсника уравнения сил на гранях составного пьезодвигателя и уравнения силы, возбуждающей колебания (подобно силе, возбуждающей колебания простого пьезодвигателя), после некоторых арифметических преобразований получают систему уравнений, описывающую структурно-параметрическую модель составного пьезодвигателя при продольном пьезоэффекте.

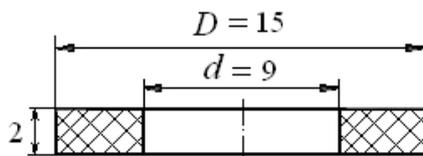


Рис. 3. Кольцо составного ПД из пьезокерамики ЦТС-19

Приведем экспериментальные графики максимального удлинения Δl_{\max} составного пьезодвигателя от приложенной внешней нагрузки F_{\max} для различных значений подводящего напряжения. Графики построены для ПД из десяти пьезоколец размером $D = 15$ мм, $d = 9$ мм, $\delta = 2$ мм (рис. 3). Кольца были изготовлены из керамики ЦТС-19, для которой пьезомодуль $d_{33} = 350 \cdot 10^{-12}$, упругая податливость $\epsilon_x = 3 \cdot 10^{-11}$ м²/Н. Площадь верхней и нижней граней пьезоэлемента составляет $S_0 = \pi(D-d)^2/4 = 1,308$ мм².

Максимальное удлинение и внешняя нагрузка для различных значений напряжения представлены в табл. 1.

График $\Delta l(F)$ показан на рис. 4, а, а график $\Delta l(U)$ – на рис. 4, б.

Таблица 1

Максимальное удлинение и внешняя нагрузка для различных значений напряжения

U , В	Δl_{\max} , м	F_{\max} , Н
100	$4 \cdot 10^{-7}$	18,85
150	$6 \cdot 10^{-7}$	28,274
200	$8 \cdot 10^{-7}$	37,7
300	$1,2 \cdot 10^{-6}$	56,55

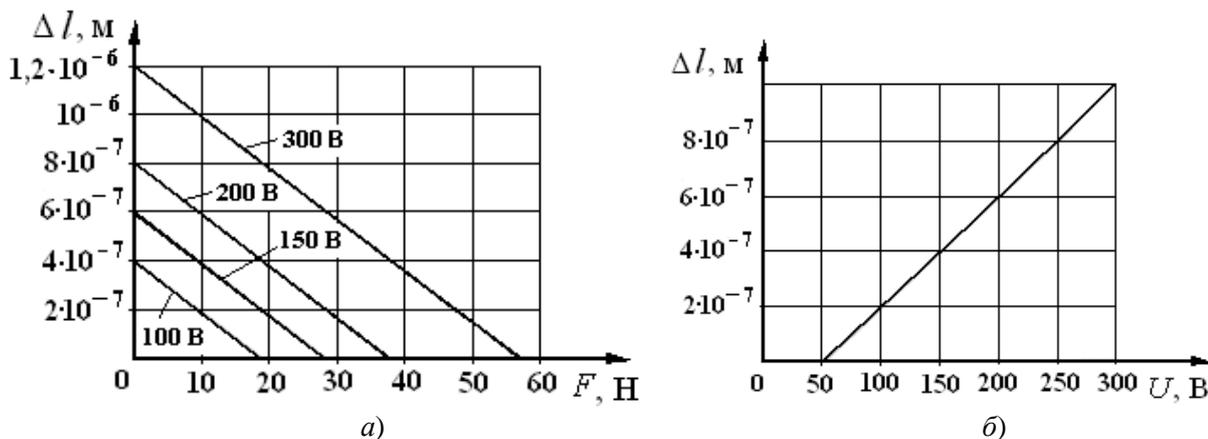


Рис. 4. Графики зависимости удлинения пьезодвигателя от внешней нагрузки (а) и от напряжения при $F = 10$ Н (б)

Вывод: расчет характеристик пьезодвигателя проведен применительно к схеме перемещения подвижного звена методом косых соударений. В результате получены границы, в которых должно лежать значение силы удара, возникающего при колебаниях высокочастотного пьезокерамического преобразователя.

Библиографический список

1. **Афонин, С.М.** Структурно-параметрическая модель составного пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2007. № 1. С. 3–13.
2. **Иванов, А.А.** Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки: учеб. пособие / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 224 с..

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

A.A. Ivanov

THE CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE PIEZOENGINE WITH LONGITUDINAL POLARIZATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Employment methods of the calculation of the characteristics of the piezoengine with longitudinal polarization.

Methodology: A theoretical framework is proposed based on the results of the experimental investigations of piezoconverters with longitudinal polarization. Subsequently constructive schemes of piezoengines with oblique co-strokes and oscillations in both directions are quoted. For example different combinations of longitudinal, lateral and curved oscillations are used.

Findings: It is possible to accomplish independent excitement of these oscillations if frequencies of proper longitudinal oscillations are equal to the second form of curved oscillations. Consequently the choice of optimal amplitude and phase correlations between separate components of oscillations in the contact zone.

Research limitations/implications: The present study provides methods of the calculation of the characteristics of the piezoengine in relation to the moving scheme of a movable link by the method of oblique collisions is shown. As a result the boundary values of power of the strike which occurs during vibrations of the high-frequency piezoceramic transducer are obtained.

Key words: piezoengine, movable link, method of oblique collisions, longitudinal polarization.