

УДК 658.527.011

А.А. Иванов

**ПРИВОДЫ СИСТЕМ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель работы:** Использование пьезоэлектриков в качестве преобразователей-двигателей, имеющих электрический вход и механический выход.

**Метод проведения работы:** 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 др. колебаний.

**Результаты и область их применения:** Установлено, что при условии равенства частоты собственных продольных колебаний и частоты второй формы изгибных колебаний можно осуществлять независимое возбуждение этих колебаний, которое обеспечивает выбор оптимальных амплитудных и фазовых соотношений между отдельными компонентами колебаний в зоне контакта.

**Выводы:** Представлены различные принципиальные схемы пьезодвигателей и даны рекомендации по их применению в системах точного позиционирования, в том числе в нанометрическом диапазоне, исключаящих громоздкую классическую схему: двигатель – редуктор – тяговая пара «винт-гайка».

*Ключевые слова:* пьезодвигатель, пьезокерамический преобразователь, обратный пьезоэффект.

Пьезоэлектрики являются обратимыми электромеханическими преобразователями, то есть они способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Преобразователи, основанные на использовании прямого пьезоэффекта, называют преобразователями-генераторами, которые имеют механический вход и электрический выход. Преобразователи, основанные на использовании обратного пьезоэффекта, называют преобразователями-двигателями, которые имеют электрический вход и механический выход. Прямой пьезоэффект используется, например, в микрофонах, звукоснимателях, датчиках механических сил, перемещений и ускорений, бытовых зажигалках для газа и т.д. Обратный пьезоэффект послужил основой для создания телефонов, громкоговорителей, ультразвуковых излучателей, реле, двигателей и т.п.

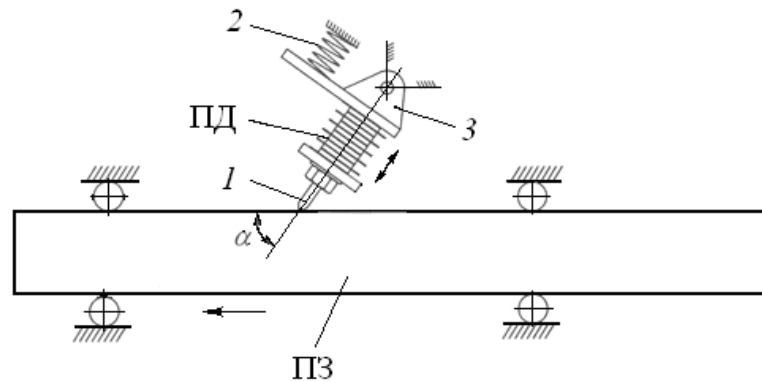
Рассмотрим основные типы пьезоэлектрических двигателей, которые применяются в приводах систем точного позиционирования (СТП).

*Пьезодвигатели с косыми соударениями*

Схема перемещения содержит ПД с продольной поляризацией, расположенный под углом  $\alpha$  к контактной плоскости подвижного звена ПЗ, смонтированного в шариковых направляющих (рис. 1).

Непрерывное движение ПЗ происходит за счет серии косых соударений наконечника 1 ПД с частотой колебаний напряжения, подводимого к пьезопреобразователю. Пружина 2 позволяет регулировать усилие поджима контактного наконечника 1 к плоскости ПЗ. Конструкция кронштейна 3 обеспечивает возможность изменения угла наклона  $\alpha$  ПД. Пьезодвигатель может быть выполнен в виде сплошного бруска из пьезокерамики или в виде блока (пакета) пьезокерамических колец.

Предельные (разрушающие) механические напряжения в пьезокерамике на сжатие в среднем в десять раз превосходят напряжения на растяжение. Поэтому из соображений прочности необходимо выполнить предварительное нагружение пьезоэлемента при помощи упругой нагрузки (пружины, мембраны, стяжки и т.д.). Усилие предварительного нагружения обеспечивает гарантированное рабочее сжатие пьезоэлемента, при этом перемещение свободного конца пьезодвигателя естественно уменьшается.



**Рис. 1. Схема перемещения подвижного звена ПЗ с помощью пьезодвигателя ПД с продольной поляризацией методом косых соударений:**

1 – контактный наконечник; 2 – пружина для поджима ПД к ПЗ;  
3 – кронштейн для крепления ПД

Пьезоэлементы в блоке ПД электрически соединены параллельно, что позволяет увеличить амплитуду продольных колебаний пьезодвигателя.

*Пьезодвигатели с косыми соударениями и двумерными колебаниями*

Эти двигатели базируются на суммировании тангенциальных составляющих ударного импульса. Двумерное движение пьезокерамического преобразователя определяет и нормальную и тангенциальную составляющие скорости удара. В обобщенном случае двумерное движение колеблющегося звена может быть представлено любой комбинацией продольных, поперечных, изгибных, крутильных и других колебаний. Наиболее распространены схемы с продольно-изгибными, продольно-крутильными и радиально-крутильными колебаниями.

Рассмотрим случай, когда вектор электрического поля **E** перпендикулярен плоскости изгибных колебаний (рис. 2, а).

Продольные и изгибные колебания возбуждаются подачей напряжения резонансной частоты на различные электроды. Если соблюдать условие равенства собственной частоты основной формы продольных колебаний и частоты второй формы изгибных колебаний, то можно осуществить независимое возбуждение этих колебаний и тем самым обеспечить выбор оптимальных амплитудных и фазовых соотношений между отдельными компонентами колебаний в зоне контакта.

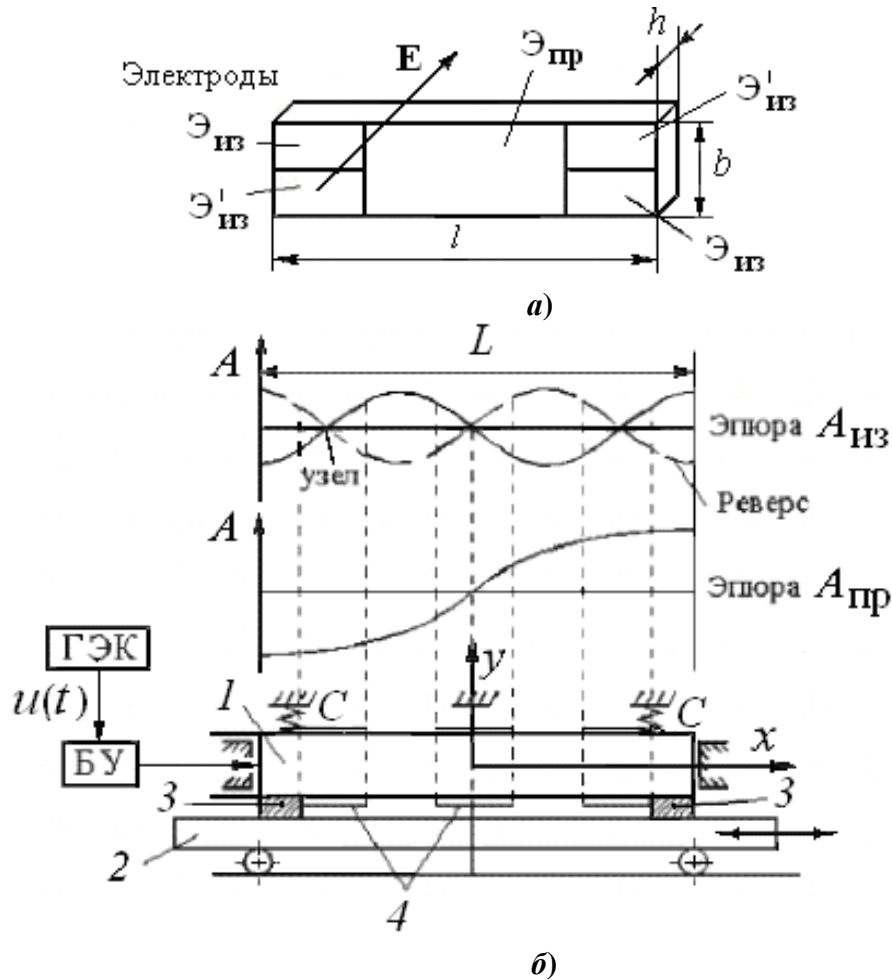
На рис. 2, а электрод  $\mathcal{E}_{пр}$  служит для возбуждения продольных колебаний, а электроды  $\mathcal{E}_{из}$  и  $\mathcal{E}'_{из}$  (при сдвиге фазы на  $\pi$ ) – изгибных колебаний. Оптимальные законы двумерных колебаний можно обеспечить и путем возбуждения связанных колебаний обоих типов, что упрощает схему питания преобразователя. При контакте ПКП с подвижным звеном ПЗ (например с кареткой КС) последнее будет перемещаться с шагом примерно 0,1 мкм, равном амплитуде колебаний ПКП (рис. 2, б).

Реверс движения ПЗ происходит при смещении фаз изгибных колебаний на угол  $\pi$  путем переключения с электродов  $\mathcal{E}_{из}$  на электроды  $\mathcal{E}'_{из}$ . Шаг перемещения подвижного звена может быть рассчитан по формуле

$$s = \left( \frac{a_n}{2} + \frac{a_n^2}{2gf_3} \right) \tau^2,$$

где  $a_n$  – начальное ускорение ПЗ;  $g$  – ускорение свободного падения;

$f_y$  – эффективный коэффициент трения при затухании колебаний;  
 $\tau$  – продолжительность импульса питания.



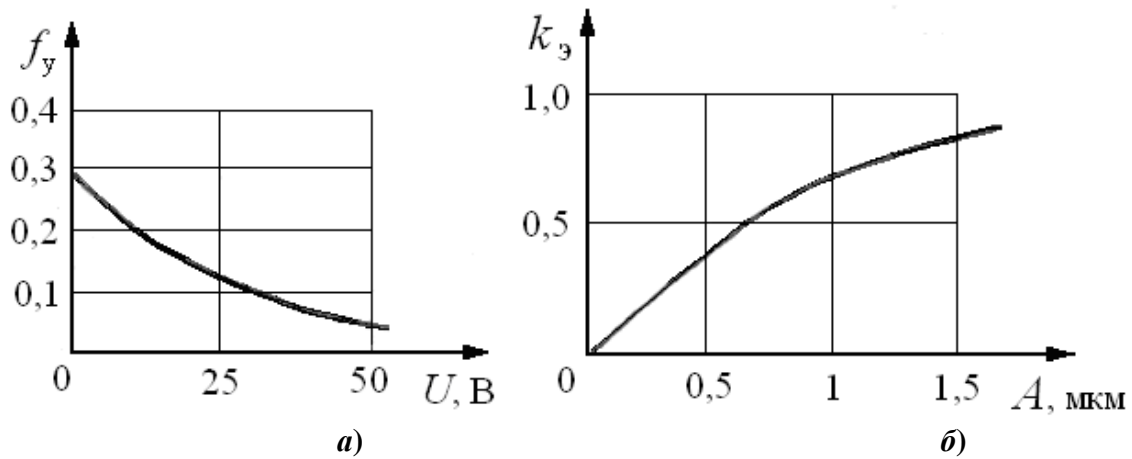
**Рис. 2. Схемы пьезокерамического преобразователя с двумерными колебаниями (а) и непрерывного перемещения подвижного звена ПЗ методом косых соударений (б):**

1 – ПКП; 2 – ПЗ; 3 – зоны контакта ПКП с ПЗ; 4 – электроды; ГЭК – генератор электрических колебаний; БУ – блок управления;  $u(t)$  – переменное напряжение;  $A_{из}$ ,  $A_{пр}$  – амплитуды изгибных и продольных колебаний соответственно;  $\mathcal{E}_{пр}$ ,  $\mathcal{E}_{из}$  – электроды для возбуждения продольных и изгибных колебаний соответственно

Суммарная тангенциальная составляющая ударного импульса, согласно гипотезе вязкого трения, не зависит от нормальной составляющей и определяется коэффициентом мгновенного трения при ударе  $f_y$ , зависящим от свойств и состояния контактирующих поверхностей.

Снижение неравномерности движения подвижного звена осуществляется управлением коэффициентом  $f_y$  в зоне контакта путем наложения на ПКП более высоких частот, чем основная резонансная частота (рабочая). Кривая зависимости  $f_y$  от напряжения  $U$ , подводимого к ПКП, показывает, что диапазон изменения  $f_y$  достаточно широк (рис. 3, а).

Эффективность действия колебаний в зоне контакта оценивается коэффициентом  $k_3$  ( $0 \leq k_3 \leq 1$ ). Для точечных и линейных контактов  $k_3 < 1$ , а для поверхностных контактов  $k_3 \approx 1$ . Зависимость  $k_3$  от амплитуды  $A$  тангенциальных и нормальных колебаний показана на рис. 3, б.



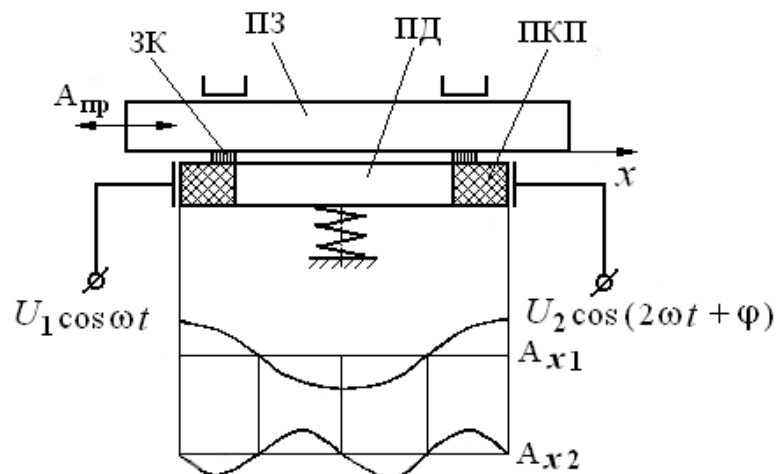
**Рис. 3.** Зависимости коэффициента мгновенного трения при ударе  $f_y$  от подводимого напряжения  $U$  (а) и коэффициента эффективности колебаний  $k_3$  в зоне контакта от амплитуды  $A$  тангенциальных и нормальных колебаний (б)

Место крепления ПД определяется наличием хотя бы одного узла в эволюциях колебаний обоих типов. Изменение знака скорости (реверс) подвижного звена производится изменением фазы одной из компонент колебаний с  $\varphi$  до  $\varphi + \pi$ .

Шаговое перемещение ПЗ осуществляется за счет возбуждения в ПКП пакетов импульсов ВЧ-колебаний.

Схема ПД с продольно-изгибными колебаниями используется и для организации вращательного движения подвижного звена (ротора).

Волновые ПД основаны на фрикционном взаимодействии колебаний типа бегущих волн ПД и ротора, которые обычно возбуждаются в регулярных структурах (по типу волновых фрикционных передач). В кольцевом ПД (волноводе) возбуждаются изгибные колебания типа бегущей волны амплитудой  $A_b$  с помощью двух напряжений одинаковой частоты, смещенных по фазе на угол  $\varphi = \pi/2$ .



**Рис. 4.** Схема ПД с асимметричными циклами колебаний:

ЗК – зона контакта; ПЗ – подвижное звено; ПД – пьезодвигатель; ПКП – пьезокерамический преобразователь;  $A_{пр}$  – амплитуда продольных колебаний;  $A_{x1}$ ,  $A_{x2}$  – эпюры амплитуд продольных колебаний;  $U_1, U_2$  – питающие напряжения, возбуждающие продольные колебания кратных резонансных частот;  $\omega t$  – фазовый угол;  $\varphi$  – угол сдвига по фазе

ПД с асимметричными циклами колебаний основаны на асимметрии инерционных воздействий сил сухого трения или нелинейной скорости деформации упругого тела (ПЭ). В ПД возбуждают продольные или крутильные колебания с асимметрией ускорения в пределах одного цикла, причем в зоне контакта, как правило, возникает проскальзывание.

В этой схеме имеет место нелинейная зависимость сил сухого трения от скорости перемещения подвижного звена или инерционных воздействий. Реализация асимметричных колебаний осуществляется путем суперпозиции продольных колебаний кратных резонансных частот со сдвигом фаз между ними на угол  $\varphi$  (рис. 4).

Эти ПД уступают рассмотренным типам пьезодвигателей по КПД и скорости, но позволяют достигать меньшей дискреты шагового перемещения (2 нм в линейном приводе).

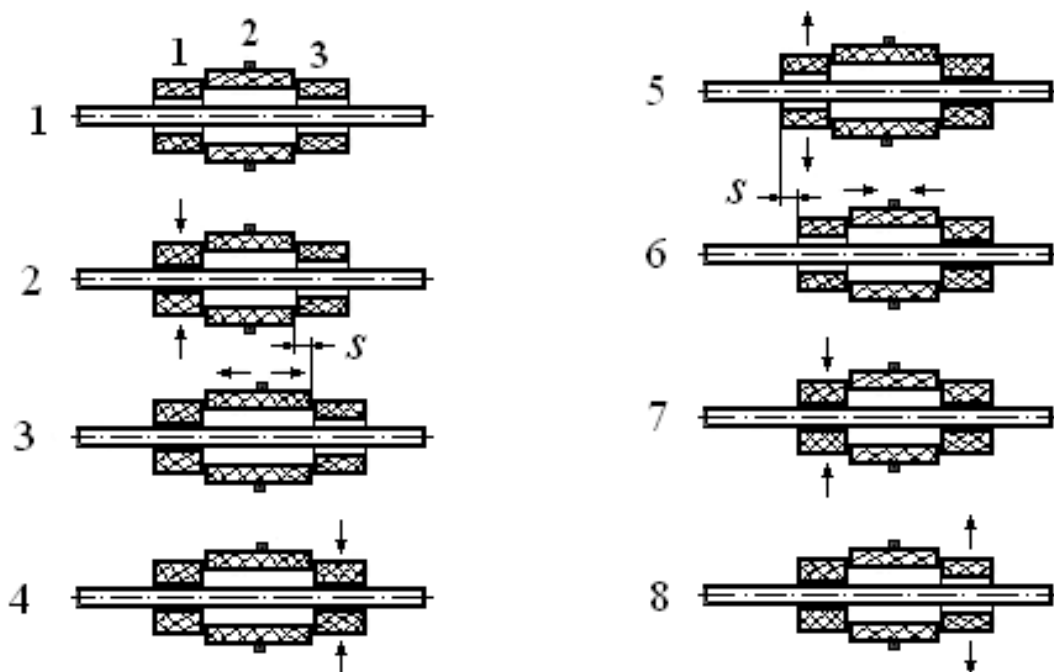
#### *ПД с управляемой связью в зоне контакта*

В качестве связи между ПД и подвижным звеном используют материалы с управляемым коэффициентом трения, например магнито- и электровязкие жидкости, и материалы, меняющие свою вязкость в УЗ поле.

ПД с управляемой связью обычно применяют в качестве нагрузочных устройств при исследовании динамических свойств системы.

#### *Шаговый ПД, работающий по принципу «червяка»*

Рассмотрим шаговый ПД, состоящий из трех пьезокерамических колец 1–3, насаженных на стержень и имеющих разное направление поляризации (рис. 5).



**Рис. 5. Схема действия шагового ПД по принципу «червяка»:**

1, 3 – кольца, поляризованные поперечно; 2 – кольцо, поляризованное продольно;  
S – шаг ПД

Все кольца соединены в единый узел. В начальный момент времени (поз. 1) подается напряжение на первое кольцо, поляризованное поперечно. Оно деформируется радиально, сжимая стержень (поз. 2). Затем подается напряжение на второе кольцо с продольной поляризацией, которое под действием электрического поля увеличивается в длину, сдвигая третье кольцо вправо (поз. 3). После этого подается напряжение на третье кольцо, которое, подобно первому, обжимает стержень (поз. 4).

Следующим шагом с первого кольца снимается напряжение, оно возвращается в исходное состояние (поз. 5), а на втором кольце меняют полярность электрического поля, благодаря чему оно продольно сжимается, увлекая за собой первое кольцо вправо (поз. 6). После того, когда второе кольцо максимально уменьшит свою длину, происходит зажим стержня первым кольцом (поз. 7) и снимается напряжение с третьего кольца, которое возвращается в исходное состояние (поз. 8). Затем процесс повторяется.

#### *ПД с ударным механизмом*

Принцип действия: в ПД формируется сила удара  $F_y$ , которая превосходит силу трения покоя  $F_T$  и силу инерции  $F_{и}$  подвижного звена:

$$F_y > F_T + F_{и}$$

#### **Выводы**

Представлены принципиальные схемы пьезодвигателей, работающих на основе обратного пьезоэффекта с высокочастотными пьезокерамическими преобразователями. Приведены основные технические характеристики пьезодвигателей и даны рекомендации по их применению в системах точного позиционирования, в том числе в нанометрическом диапазоне, исключая громоздкую классическую схему «двигатель – редуктор – тяговая пара «винт-гайка»».

#### **Библиографический список**

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

*Дата поступления  
в редакцию 19.04.2013*

**A.A. Ivanov**

#### **SYSTEM DRIVES OF EXACT POSITIONING ON THE BASIS OF THE REVERSE PIEZO EFFECT**

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

**Purpose:** Employment of piezoelectrics as converters that is engines with electric input and mechanical output is considered.

**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 study tested different principal schemes of piezoengines. As a result, some recommendations are given how to use these schemes in exact positioning systems including a nanometric range. Moreover the bulky classic scheme is eliminated in this case.

*Key words:* piezo engine, piezoceramic converter, reverse piezo effect.