

## **Система управления ультразвуковыми пьезоэлектрическими двигателями**

**Бардин В.А.\*, Васильев В.А.\***

*Пензенский государственный университет,*

*улица Красная, 40, Пенза, 400026,*

*Россия*

*\*e-mail: opto@bk.ru*

### **Аннотация**

Данная статья посвящена исследованию систем управления ультразвуковыми пьезоэлектрическими двигателями и их совершенствованию. Предложена система управления ультразвуковыми пьезодвигателями (УЗПД), отличающаяся простотой технической реализации и эффективностью. Схема и способ управления УЗПД основаны на амплитудно-частотной регулировке.

**Ключевые слова:** система управления, ультразвуковой пьезодвигатель, статор, прецизионное позиционирование.

Основой производственного и тестового оборудования точного приборостроения являются информационно-измерительные и управляющие системы позиционирования рабочего органа с применением двигателей. В качестве исполнительных механизмов исследовательского и тестового оборудования для нано-

и микроперемещений наибольшее распространение получили пьезоактюаторы и пьезодвигатели.

Ведущими фирмами, занимающимися разработкой и производством пьезодвигателей являются *Cedrat Technologies* (Франция), *Physik Instrumente* (Германия), *Discovery Technology International* (США), *New Scale Technologies* (США) [1–5]. В последнее время активно разрабатываются и исследуются резонансные (ультразвуковые) пьезодвигатели (УЗПД) [1]. Они также известны как вибрационные двигатели, которые могут быть использованы в системах прецизионного позиционирования. УЗПД могут работать в непрерывном, шаговом или сканирующем режимах, и предназначены для точного углового или линейного позиционирования различных объектов. Важным положительным качеством УЗПД является то, что при снятии напряжения управления фиксируется положение ротора (ползуна). УЗПД имеют высокий дискрет хода – 50 нм, высокую скорость – до 500 мм/с (1...300 об/мин), высокий момент (0.1...1.8 Н\*м), высокое угловое разрешение (1...0,016 угл. сек).

Имеется достаточно много конструктивных исполнений пьезодвигателей, но они, как правило, предназначены для выполнения узкоспециализированных задач. Например, дорезонансные (моноблочные, изгибно-натяжные и т.д.) пьезоактюаторы имеют высокую точность позиционирования и высокую скорость, но малый диапазон перемещения; дорезонансные шаговые пьезодвигатели имеют достаточно высокую точность позиционирования, большой диапазон перемещения, но малую скорость; резонансные линейные и роторные пьезодвигатели имеют менее высокую точность позиционирования, но высокую скорость и большой диапазон перемещения.

В настоящей работе ставилась и решалась задача разработки системы управления скоростным приводом устройства позиционирования многофункционального тестового прибора, применяемого совместно с прецизионным приводом, обеспечивающей линейное перемещение тестируемого образца по одной координате с разрешением в доли микрометра со скоростью единицы мм/с. Области применения такого прибора – контроль поверхности пластин в микроэлектронике, контроль электрических параметров микросборок, датчики пути, контроль качества, измерение твёрдости материалов. Структурная схема многофункционального тестового прибора приведена на рис. 1.

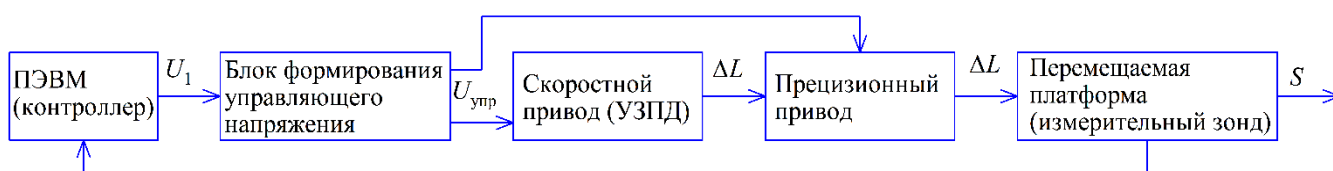


Рис. 1. Структурная схема многофункционального тестового прибора

При разработке ультразвукового пьезодвигателя для скоростной ступени устройства прецизионного позиционирования в качестве прототипа использована конструкция пьезодвигателя *Squiggle* фирмы *NST*. Его преимуществом является то, что он при малых габаритных размерах (2,8x2,8x6 мм) имеет высокую скорость перемещения (7 мм/с) и достаточно большое нагрузочное усилие (0,33 Н) (рис. 2). Основными элементами данного пьезопривода являются: четырёхгранная металлическая муфта (из немагнитного материала) с внутренней резьбой, ходовой винт (червяк) и четыре пластины пьезокерамики [6, 7]. Пластины пьезокерамики прикреплены на гранях металлической муфты, червяк вкручен в металлическую муфту. При подаче двухфазных напряжений на противоположные пары пластин

пьезокерамики возникают механические колебания, которые передаются металлической муфте. Если есть сдвиг фаз между подаваемыми электрическими напряжениями, то на границе соприкасающихся поверхностей муфты и червяка возникают силы сдвигания с поворотом. В результате червяк вращается и линейно перемещается относительно муфты. Меняя сдвиг фаз можно изменять направление движения винта (червяка) [8–10].

Так как УЗПД являются резонансными устройствами с высокой добротностью, в которых небольшое изменение внешних условий (температуры или нагрузки) приводит к сдвигу резонансной частоты по отношению к рабочей частоте контроллера [11], то для его эффективной работы необходимо постоянно подстраивать частоту рабочего сигнала под меняющуюся резонансную частоту УЗПД, для чего используется обратная связь между УЗПД и устройством управления. Обычно для управления УЗПД используют внешние датчики обратной связи.

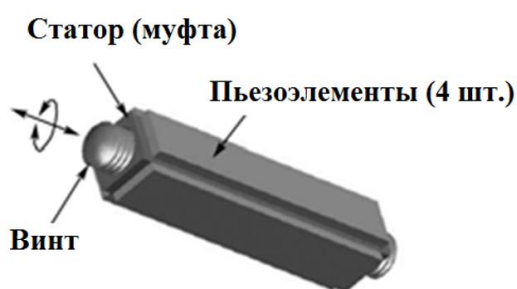


Рис. 2. Конструкция пьезопривода *Squiggle* фирмы *NST*

На рис. 3 представлена структурная схема УЗПД с датчиками обратной связи, а на рис. 4 – саморегулируемого УЗПД.



Рис. 3. Структурная схема УЗПД с датчиками обратной связи



Рис. 4. Структурная схема саморегулируемого УЗПД

Обычный УЗПД (рис. 3) состоит из последовательных преобразователей входного электрического сигнала в выходное механическое воздействие, а датчики обратной связи преобразуют выходное механическое воздействие на полезную нагрузку (скорость и перемещение) в электрический сигнал обратной связи, поступающий на корректирующий вход управляющей цепи. Саморегулируемый УЗПД (рис. 4) также состоит из последовательных преобразователей входного электрического сигнала в выходное механическое воздействие на полезную нагрузку (скорость и перемещение), которое затем преобразуется самим пьезодвигателем с помощью пьезоэлементов в электрический сигнал обратной связи, поступающий на корректирующий вход управляющей цепи.

Функции преобразователей саморегулируемого УЗПД:

- управляющая цепь преобразует внешний управляющий сигнал во входной двухфазный высокочастотный сигнал для управления пьезодвигателем;
- пьезоэлементы пьезодвигателя преобразуют входной двухфазный высокочастотный сигнал в силу и механические колебания упругого элемента (статора), которые затем преобразуются в деформацию  $\varepsilon$ ;
- статор преобразует механические колебания в перемещение подвижного элемента с полезной нагрузкой;
- деформация статора  $\varepsilon$  преобразуется в изменение емкости пьезоэлементов  $\Delta C$  и параметров других, установленных на него, чувствительных элементов (сопротивление  $\varepsilon_R$ , частота  $f$ );
- изменение тока  $\Delta I$  через пьезоэлементы (сопротивления  $\varepsilon_R$ , частотного сигнала  $f$ ) с помощью измерительной цепи, в которую они включены, преобразуются в изменение частоты  $\Delta f$ .

Известные управляющие системы саморегулируемых пьезодвигателей [12], [13], [14], [15], как правило, дорогостоящие и со сложной программной обработкой.

По результатам анализа существующих систем управления пьезодвигателями была разработана система управления саморегулируемым ультразвуковым пьезоэлектрическим двигателем с амплитудно-частотной регулировкой, использующая в качестве источника сигнала обратной связи для регулирования частоты управляющих сигналов непосредственно рабочие пьезоэлементы УЗПД. Схема устройства для его управления показана на рис. 5. Устройство содержит ультразвуковой пьезоэлектрический двигатель (УЗПД), вторичный преобразователь,

выполненный на оптопаре с резистивным выходным элементом, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), элемент сравнения, блок формирования и регулировки частоты вращения, к которому подключены два усилителя тока, два трансформатора, две пары пьезоэлементов саморегулируемого УЗПД.

Разработанный пьезодвигатель, показанный на рис. 6, имеет статор в виде полого цилиндра с четырьмя срезанными по длине поверхностями, к которым жёстко прикреплены пьезоэлементы. В отверстие цилиндра (статора) установлен ротор. Данную конструкцию можно использовать в качестве роторного или линейного двигателя. У линейного УЗПД ротор и отверстие статора имеют резьбовые поверхности, а ротор перемещается по резьбе, совершая вращательно-поступательное движение. У роторного УЗПД ротор и отверстие статора имеют гладкие поверхности, а ротор совершает вращательное движение. Управление ультразвуковым пьезоэлектрическим двигателем осуществляется с помощью сигналов, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ .

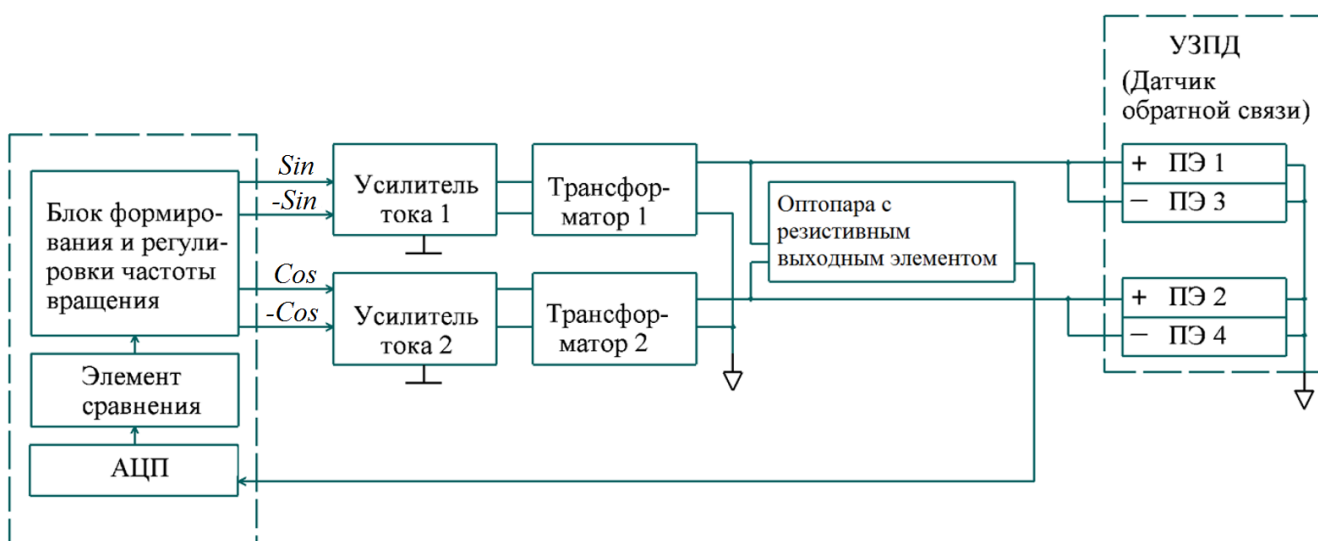


Рис. 5. Схема устройства управления саморегулируемым УЗПД с амплитудно-частотной регулировкой

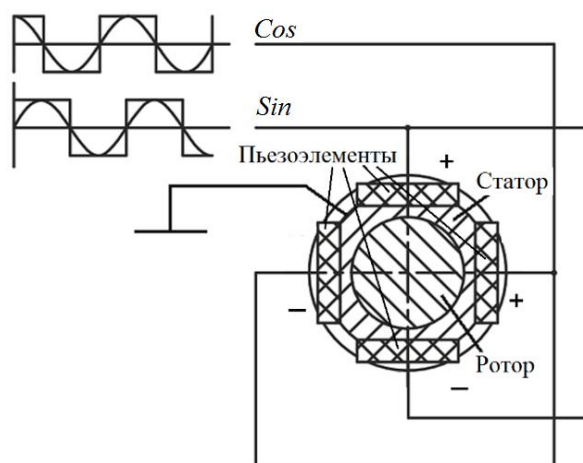


Рис. 6. Конструкция УЗПД и его электрическое подключение

Обычно на обкладки четырёх пьезоэлементов УЗПД, размещённых на статоре, подают четыре синусоидальных напряжения с частотой, равной резонансной частоте статора и сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  ( $Sin$ ,  $Cos$ ,  $-Sin$ ,  $-Cos$ ). В такой конструкции требуется пять электрических проводов для подачи этих сигналов (четыре управляющих и один общий). Соответственно, требуется сформировать управляющие сигналы по четырём каналам.

В разработанном устройстве достаточно трёх проводов для подачи двух управляющих сигналов ( $Sin$ ,  $Cos$ ) на УЗПД, так как сигналы, подаваемые на противоположные пьезоэлементы, имеют сдвиг фазы  $180^\circ$  ( $Sin$  и  $-Sin$ ,  $Cos$  и  $-Cos$ ) и на них можно подавать одинаковый сигнал ( $Sin$ ,  $Cos$ ), если расположить эти пьезоэлементы с разным направлением поляризации («+» и «-»). Эти же цепи сигналов ( $Sin$ ,  $Cos$ ) служат для передачи сигнала с УЗПД на вторичный преобразователь (оптопару с резистивным выходным элементом), а сам УЗПД при этом выполняет функцию первичного преобразователя (датчика).



Блок формирования и регулировки частоты вращения вырабатывает по двум каналам (четырем выходам) управляющие импульсы, сдвинутые по фазе, причем сигналы в каналах (на первом и втором, третьем и четвертом выходах) сдвинуты на  $180^\circ$ , а между каналами (на первом и третьем, втором и четвертом выходах) сдвинуты на  $90^\circ$ . Далее эти сигналы поступают на входы двух усилителей тока, с выхода которых усиленные сигналы подаются на первичные обмотки двух трансформаторов. Трансформаторы усиливают входящие сигналы по напряжению, преобразуют четыре однополярных сигнала (по два сдвинутых на  $180^\circ$  в каждом канале) в два двухполярных сигнала, сдвинутых на  $90^\circ$ , и осуществляют гальваническую развязку УЗПД от цифровой части схемы. С первых выходов вторичных обмоток каждого из трансформаторов сигналы подаются на первые контакты пьезоэлементов УЗПД соответственно. Причём сигнал с первого трансформатора подается на первую пару пьезоэлементов, а со второго трансформатора – на вторую пару пьезоэлементов, имеющих разные направления поляризации (+ и –). То есть, первые и вторые пьезоэлементы каждой пары имеют одинаковое направление поляризации. Вторые выходы вторичных обмоток трансформаторов объединены в одну цепь со вторыми контактами пьезоэлементов и являются общими.

Под действием управляющих сигналов, поступающих на пьезоэлементы УЗПД, в нем возбуждаются колебательные движения и его подвижная часть (ротор) начинает совершать перемещение (вращение) относительно неподвижной части (статора). Так как пьезоэлементы УЗПД электрически представляют собой емкость, то они вместе со вторичными обмотками трансформаторов образуют колебательный

контур. При этом на резонансной частоте УЗПД происходит увеличение амплитуды напряжения и тока, протекающего через пьезоэлементы УЗПД. Установлено, что амплитуда сигнала ( $U_{\text{ампл}}$ ), измеренная во время работы пьезодвигателя между первыми выходами вторичных обмоток трансформаторов на резонансной частоте, больше, чем на других частотах примерно на 20% и имеет зависимость от частоты управляющего сигнала ( $f_{\text{раб}}$ ), представленную на рис. 7. Так как пьезоэлементы УЗПД реагируют на резонансную частоту, то их можно использовать в качестве чувствительного элемента датчика сигнала обратной связи. При подаче этого сигнала на вход вторичного преобразователя (оптопару с резистивным выходным элементом) на её выходе получается гальванически развязанный низковольтный сигнал, пропорциональный входному.

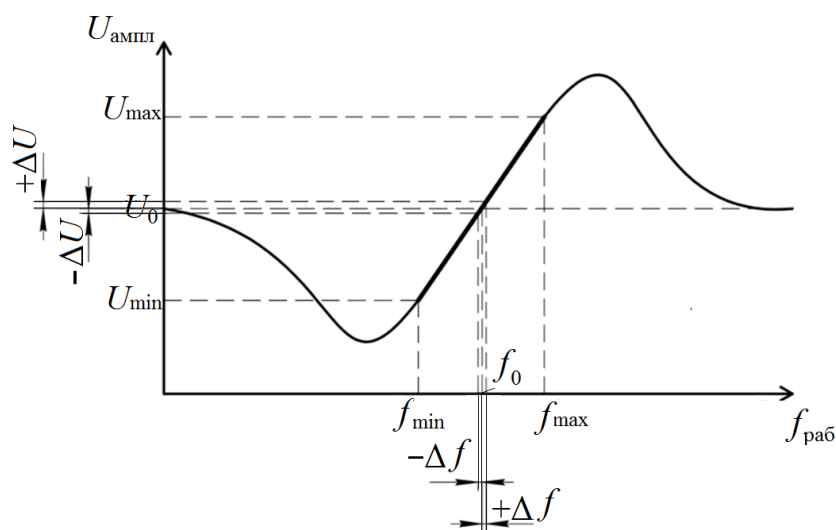


Рис. 7. График зависимости амплитуды сигнала на выходе оптопары с резистивным выходным элементом в зависимости от частоты сигнала, подаваемого на пьезоэлементы УЗПД.

На графике зависимости (рис. 7) имеется прямой участок между минимальным и максимальным значениями. Для эффективной работы пьезодвигателя значение

амплитуды получаемого сигнала должно находиться на этом участке между значениями  $U_{min}$  и  $U_{max}$  (им соответствует  $f_{min}$  и  $f_{max}$ ), оптимально в точке  $U_0$  (соответствует  $f_0$ ). В процессе управления УЗПД частота управляющего сигнала поддерживается вблизи точки  $f_0$  (резонансная частота) путём пошагового приближения к  $U_0$  в блоке формирования и регулировки частоты вращения. Для этого во время его работы выполняется сканирование аналого-цифровым преобразователем сигнала, получаемого от вторичного преобразователя (оптопары с резистивным выходным элементом); оцифрованный сигнал передается на элемент сравнения, где сравнивается текущее значение его амплитуды со значением амплитуды сигнала на резонансной частоте ( $f_0$ ) пьезодвигателя – УЗПД, после чего по разности этих сигналов в блоке формирования и регулировки частоты вращения корректируется частота сигнала на его выходах так, что если разность значений сигналов положительная ( $+\Delta U$ ), то частота сигналов с выходов блока формирования и регулировки частоты вращения уменьшается (на величину  $-\Delta f$ ), а если разность значений сигналов отрицательная ( $-\Delta U$ ), то она увеличивается (на величину  $+\Delta f$ ) пропорционально сигналу с выхода элемента сравнения.

Разработанная система управления скоростным приводом устройства позиционирования многофункционального тестового прибора, обеспечивает линейное перемещение тестируемого образца по одной координате с разрешением в доли микрометра со скоростью единицы мм/с. Предложенные схема и способ управления саморегулируемым УЗПД с амплитудно-частотной регулировкой существенно упрощают конструкцию, повышают эффективность и надёжность работы.

## Библиографический список

1. Chunsheng Zhao. Ultrasonic Motors Technologies and Applications. Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
2. Claeysen F., Le Letty R., Six M.F., Debarnot M., Lhermet N., Privat M. Versatile ultrasonic piezo drive for direct drive motorization, <http://www.cedrat-technologies.com>.
3. Каталог фирмы Physik Instrumente (PI), 2014:  
<http://www.physikinstrumente.com>.
4. Technical communication. New ultrasonic piezoelectric rotary motor provides superior resolution and dynamic range compared to conventional electromagnetic motors. Discovery Technology International, 2008: <http://www.discovtech.com>.
5. David Henderson. Smart electronics reduce energy consumption and improve performance of piezoelectric ultrasonic motors. New Scale Technologies, 2013:  
<http://www.newscaletech.com>.
6. Бардин В.А., Васильев В.А., Чернов П.С. Принципы построения и перспективы исследований пьезоактюаторов для нано- и микропозиционирования // Нано- и микросистемная техника. 2015. №1. С. 90 –93.
7. Самарин А. Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // Компоненты и технологии. 2006. № 10. С. 36 –41.
8. Henderson D.A. Novel piezo motor enables positive displacement microfluidic pump // New Scale Technologies, Victor, NY. NSTI Nanotech, 2007.
9. Henderson D.A., Sheryl L. Piezoelectric motors move miniaturization forward // New Scale Technologies, Victor, NY. URL:<http://www.newscaletech.com>

10. Henderson D.A. Simple ceramic motor. Inspiring smaller products // New Scale Technologies, Victor, NY. Actuator 2006, 10-th International conference on new actuators. 14-16 June 2006, Bremen, Germany (Late Submission).
11. Галий С.Н., Доля В.К. Оптимизация резонансного высокочастотного пьезоэлектрического элемента антенной решетки для задач неразрушающего контроля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 3 (23).С. 62–70.
12. Furuya S., Maruhashi T., Izuno Y, and. Nakaoka M. Load-adaptive frequency tracking control implementation of two-phase resonant inverter for ultrasonic motor. In 21st Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '90 Record, jun 1990. pp. 17 –24.
13. Hills C., Payne G. System and method for tracking drive frequency of piezoelectric motor. US 7545076. 2009.
14. Walker S. H., Lagally M. G., Lorenz R. D. Method and apparatus for improved control of piezoelectric positioners. US 5714831.1998.
15. Senjyu T., Nakamura M., Urasaki N., Sekine H., Funabashi T.. Mathematical model of ultrasonic motors for speed control. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE. March 2006. 6 p.