

# Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели

Александр САМАРИН

В зависимости от степени миниатюризации используются различные типы микромоторов. Для макроуровня, где требуется большая мощность при относительно малых размерах, применяются миниатюрные электромагнитные двигатели и соленоиды. Для микроустройств в настоящее время широко используются интегральные приводы, созданные по MEMS-технологии.

Пьезоприводы проигрывают электромагнитным двигателям по мощности, а MEMS микромоторам — по степени миниатюризации. Однако основное преимущество микропьезомоторов — возможность прямого позиционирования с субмикронной точностью. Кроме того, эти приводы имеют и множество других преимуществ перед своими электромагнитными конкурентами.

Электромагнитные микроэлектродвигатели (коллекторные, шаговые и бесколлекторные) в настоящее время достигли предела миниатюризации. Например, серийно выпускаемый шаговый электродвигатель типа A0820 имеет диаметр 8 мм, весит 3,3 грамма и стоит около \$10. Двигатели этого типа довольно сложны и содержат сотни деталей. При дальнейшем уменьшении размеров усложняется процесс сборки, а также теряется эффективность двигателя. Для намотки катушек статора приходится использовать более тонкий провод, который имеет более высокое сопротивление. Так, при уменьшении размеров коллекторного микроэлектродвигателя до 6 мм гораздо большая часть подводимой электрической энергии преобразуется в тепло, нежели в механическую энергию. В большинстве случаев для получения линейных приводов на базе электродвигателей необходимо применение дополнительных механических передач и редукторов, которые преобразуют вращательное движение в поступательное и обеспечивают нужную точность позиционирования. При этом возрастают размеры

Области применения миниатюрных двигателей и приводов довольно обширны — это и приводы для измерительных устройств, таких как электронные и туннельные микроскопы, приводы манипуляторов различных сборочных роботов, а также исполнительные механизмы в технологическом оборудовании и бытовой технике. В качестве микромоторов могут использоваться коллекторные и бесколлекторные электромагнитные микродвигатели, пьезомоторы и интегральные приводы MEMS. В статье пойдет речь о пьезоэлектрических двигателях.

всего устройства в целом, а значительная часть энергии тратится на преодоление трения в механической передаче. Диаграмма, приведенная на рис. 1, показывает, что при размерах менее 7 мм (диаметр корпуса двигателя) выгоднее применять пьезоэлектрические двигатели, а не электромагнитные.

В настоящее время многими фирмами освоено серийное производство пьезомоторов. В статье рассматривается продукция двух производителей пьезоприводов: немецкого Physik Instrumente (PI) и американского New Scale Technologies. Выбор фирм не случаен. Американская фирма на данный момент производит самые маленькие в мире пьезодвигатели, а немецкая является одним из лидеров в секторе пьезоприводов для прецизионного оборудования. Производимые ею пьезомоторы имеют уникальные функциональные характеристики и пользуются заслуженной репутацией среди производителей прецизионного технологического и измерительного оборудования. Обе фирмы используют свои патентованные решения. Принцип работы двигателей обеих фирм, а также их конструкция различны.

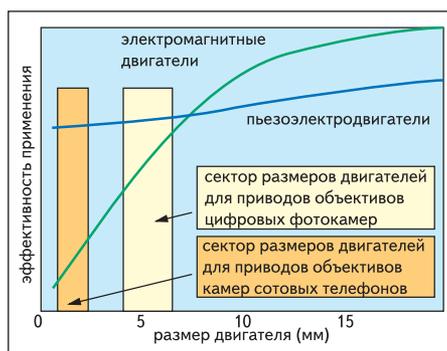


Рис. 1. При размерах менее 7 мм пьезоэлектродвигатели более эффективны, чем электромагнитные двигатели

## Конструкция и принцип работы пьезоэлектродвигателя SQUIGGLE

На рис. 2 показаны конструкция и принцип работы пьезопривода SQUIGGLE фирмы New Scale Technologies.

Основа привода — муфта прямоугольного сечения с внутренней резьбой и ходовой винт (червяк). На гранях металлической муфты смонтированы пьезоэлектрические пластины актуаторов. При подаче двухфазных сигналов на пары пьезоэлектрических актуаторов создаются вибрационные колебания, которые передаются в массу муфты. Для более эффективного преобразования электрической энергии в механическую актуаторы работают в резонансном режиме. Частота возбуждения зависит от размеров пьезопривода и находится в диапазоне от 40 до 200 кГц. Механические колебания, действующие на границе двух рабочих поверхностей муфты и винта, вызывают появление сил сдвливания с поворотом (типа вращения хула-хупа). Результирующая сила обеспечивает вращение червяка относительно неподвижного основания — муфты. При движении винта и происходит преобразование вращательного движения в линейное перемещение. В зависимости от сдвига фаз управляющих сигналов можно получать вращение винта как по часовой, так и против часовой стрелки.

В качестве материалов винта и муфты используются немагнитные материалы, такие как бронза, нержавеющей сталь, титан. Резьбовая пара муфта-червяк не требует смазки для работы.

Пьезоприводы практически безынерционные, обеспечивают отличную приемистость (движение с ускорением до 10 g), практически бесшумны в звуковом диапазоне (30 Гц — 15 кГц). Точность позиционирования может достигаться без использования датчиков положения — благодаря тому, что движение происходит без проскальзывания (при усло-

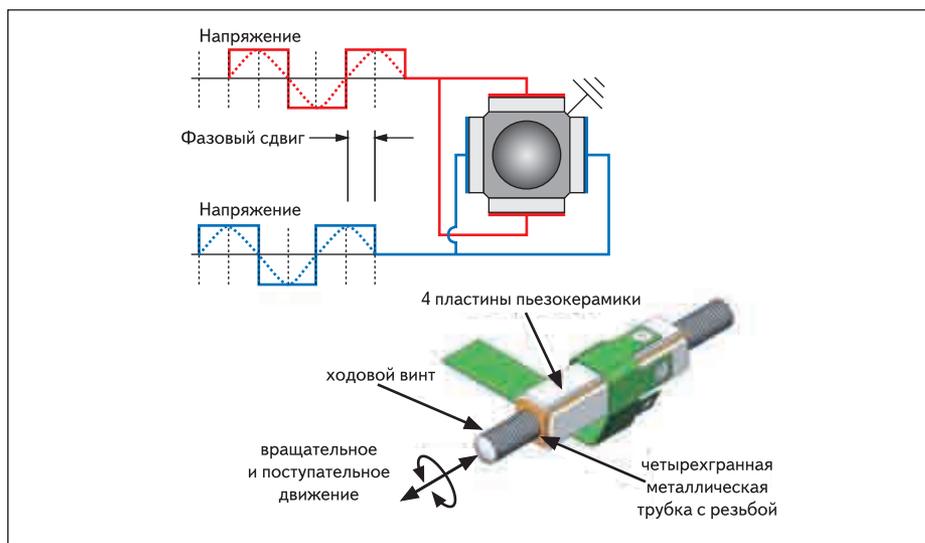


Рис. 2. Конструкция и принцип работы микропривода SQUIGGLE

вии, что нагрузка на рабочий винт находится в рабочих пределах), и перемещение прямо пропорционально числу импульсных сигналов, приложенных к пластинам актуатора. Пьезоприводы имеют практически неограниченный срок службы, разве что со временем за счет износа винтовой передачи может быть частично потеряна точность позиционирования. Пьезопривод может выдерживать режим блокировки движения за счет приложения сил торможения, превосходящих усилие тяги привода. В этом случае будет происходить проскальзывание без разрушения винтовой передачи.

Сегодня микромоторы серии SQL признаны самыми маленькими электродвигателями в мире, которые производятся серийно.

Основные характеристики пьезопривода SQUIGGLE:

- масштабируемые размеры (можно получать заказные приводы с заданными размерами);
- минимальные габариты привода 1,55×1,55×6 мм;
- простота конструкции (7 составных частей);
- низкая цена;
- высокая технологичность изготовления составных компонентов и сборки привода;
- прямой линейный привод, не требующий применения дополнительных механических передач;
- субмикронная точность позиционирования привода;
- бесшумность работы;

- широкий рабочий температурный диапазон (−30...+70 °С).
- Параметры микромоторов серии SQL:
- мощность потребления — 500 мВт (только в процессе перемещения штока);
  - вес — 1,7 г;
  - разрешение — 0,5 мкм;
  - скорость перемещения — 5 мм/с (под нагрузкой 100 г);
  - усилие перемещения — более 200 г;
  - частота возбуждения пьезоактуаторов — 116 кГц;
  - электрическая емкость каждой из четырех фаз пьезопривода — 1,35 нФ;
  - коннектор (кабель) — печатный шлейф (6 проводников — 4 фазы и 2 общих);
  - рабочий ресурс — 300 тыс. циклов (при длине хода якоря 5 мм);
  - диапазон линейных перемещений якоря:
    - модель SQL-3.4 — 10–40 = 30 мм (40 мм — длина ходового винта);
    - модель SQL-3.4 — 10–30 = 20 мм (30 мм — длина ходового винта);
    - модель SQL-3.4 — 10–15 = 5 мм (15 мм — длина ходового винта).



Рис. 4. Серия SQL микропьезоприводов для портативной аппаратуры

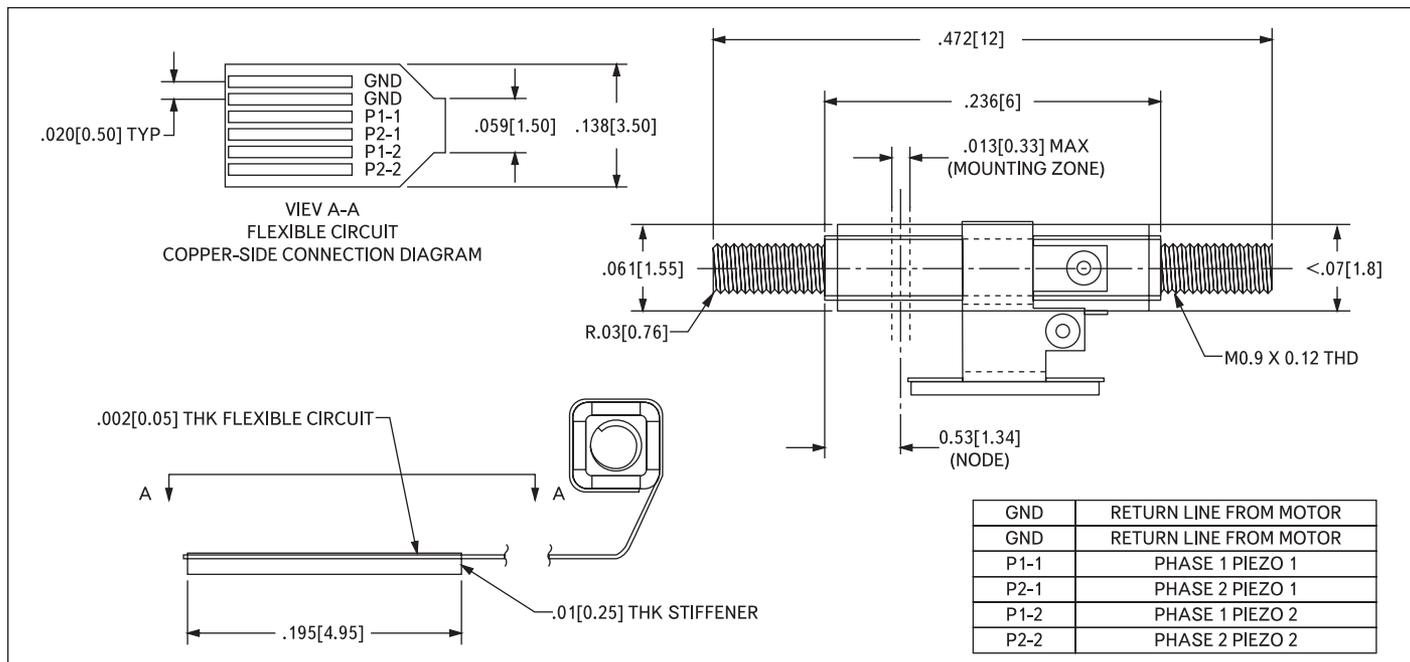


Рис. 3. Рабочий чертеж промышленного пьезомотора серии SQL



Рис. 5. Микросхема драйвера пьезопривода

- крепление привода — фланцевое соединение или опрессовка.

По заказу фирмы New Scale Technologies разработан интегральный драйвер для пьезоприводов серии SQL (рис. 4). Таким образом, потребитель имеет возможность использовать набор готовых компонентов для получения своего OEM электромеханического модуля.

Микросхема драйвера привода (рис. 5) содержит преобразователь напряжения и выходные драйверы, работающие на емкостную нагрузку. Входное напряжение 3 В. Уровни выходных напряжений формирователей — до 40 В.

### Области применения пьезоприводов SQUIGGLE Привод для объективов фото- и видеокамер

Один из самых больших секторов применения микроэлектроприводов — цифровые фотокамеры и видеокамеры (рис. 6). Микропривод используется в них для управления фокусировкой объектива и оптическим зумом.

На рис. 7 показан пьезопривод SQUIGGLE для применения во встроенных фотокамерах



Рис. 6. Прототип привода оптического зума для цифровой фотокамеры



Рис. 7. Модель объектива с приводом SQUIGGLE для камеры, встроенной в сотовый телефон

сотовых телефонов. Привод производит смещение двух линз вдоль направляющих вверх-вниз и обеспечивает автофокусировку (длина хода оптики 2 мм) и зум (ход перемещения линз до 8 мм).

### Медицинский шприц-дозатор

Во всем мире насчитывается сотни миллионов людей, нуждающихся в периодических дозированных инъекциях медицинских препаратов. В этом случае следить за временем, дозами, а также проводить процедуру инъекции должен сам пациент. Этот процесс можно значительно упростить и тем самым облегчить жизнь пациента, если создать программируемый шприц-дозатор (рис. 8). На базе пьезопривода SQL уже реализован программируемый насос-шприц для инъекций инсулина. Дозатор состоит из микроконтроллерного модуля управления, емкости с препаратом, шприца и управляемого привода. Управление дозатором осуществляется встроенным микроконтроллерным модулем с батарейным питанием. Элемент питания — литиевая батарея. Модуль дозатора может быть встроен в одежду больного и размещен, например, в области рукава. Временные интервалы между инъекциями и дозы медикамента программируются под конкретного клиента.

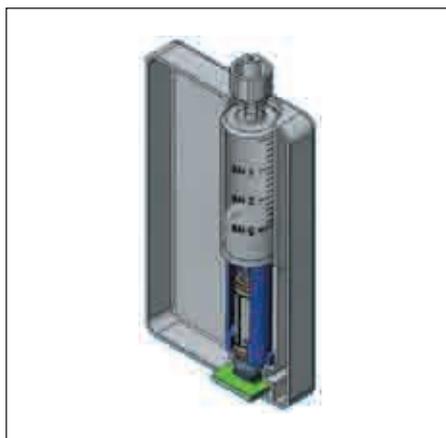


Рис. 8. Использование привода в программируемом шприце-дозаторе

Величина дозы прямо пропорциональна длине перемещения штока привода.

Предполагается использование микрошприцев с противошоковым препаратом, вмонтированных в «интеллектуальную броню» военнослужащего. Защитная одежда, кроме армированных силовых элементов, содержит также интегрированные датчики пульса, температуры, датчики механических повреждений текстильной «брони». Активация шприцев происходит как по инициативе самого бойца, так и по команде из блока носимой электроники или же по радиоканалу из командного терминала на основании показаний датчиков при потере бойцом сознания, например, после ранения или в результате контузии.

### Немагнитные двигатели

Поскольку в пьезоприводах SQL не используются ферросплавные материалы, а также электромагнитные поля, двигатели этого типа могут использоваться для создания носимых медицинских диагностических устройств, совместимых с методом магниторезонансной томографии. Данные приводы также не будут вносить помехи при размещении в рабочих зонах оборудования, использующего ядерный магнитный резонанс, а также вблизи электронных сканирующих микроскопов, микроскопов с фокусированием ионных потоков и т. п.

### Лабораторный микронасос

На базе пьезопривода могут быть созданы микронасосы для дозированной подачи жидкостей в лабораторном исследовательском оборудовании. Основные достоинства микронасоса такой конструкции — высокая точность дозирования и надежность работы.

### Двигатель для вакуумного оборудования

Пьезопривод подходит для создания механических устройств, работающих в условиях как высокого, так и сверхвысокого вакуума, и обеспечивающих высокую точность позиционирования (рис. 9). Материалы привода обладают малым газовыделением в вакууме. При работе привода в режиме микроперемещений выделяется мало тепла.

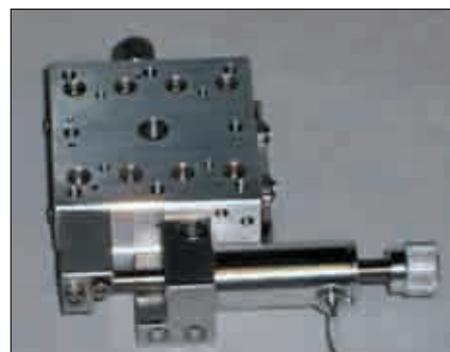


Рис. 9. Привод для вакуумного оборудования на базе микромотора серии SQL

В частности, такие двигатели найдут широкое применение при создании новых поколений сканирующих электронных микроскопов, ионных сканирующих масс-спектрометров, а также в технологическом и тестирующем оборудовании для электронной промышленности, в оборудовании, применяемом в ускорителях частиц, таких как синхротроны.

### Приводы для криогенного оборудования

Уникальные параметры пьезопривода позволяют использовать его при очень низких температурах. Фирмой уже выпускаются варианты исполнений приводов для коммерческих и космических применений при низких температурах.

В настоящее время на базе микромоторов SQL созданы приводы для различных функциональных узлов в криогенном лабораторном оборудовании, а также механические



Рис. 10. Исполнение пьезопривода для работы при температурах от комнатной до 4 К (жидкий гелий)

приводы для подстройки параметров космических телескопов.

На рис. 10 показан пьезопривод для работы при температурах жидкого гелия.

Работа при низких температурах требует других частот и амплитуд сигналов для возбуждения пьезоактуаторов.

#### Оценочный набор

Фирма New Scale Technologies выпускает оценочный набор, который содержит: пьезодвигатель SQL (рис. 11), плату привода, программное обеспечение, интерфейс с компьютером, а также дополнительный пользовательский пульт управления приводом.



Рис. 11. Оценочный набор для пьезопривода SQL

В качестве интерфейса с ПК может использоваться USB или RS-232.

#### Пьезоприводы фирмы PI

Немецкая фирма Physik Instrumente (PI) ([www.physikinstrumente.com/en](http://www.physikinstrumente.com/en)) была образована в 1970 году. В настоящее время имеет подразделения в США, Великобритании, Японии, Китае, Италии и Франции. Основной сектор — оборудование для нанопозиционирования и обеспечения контроля движения с высокой точностью. Фирма является одним из ведущих производителей оборудования данного профиля. Используются уникальные запатентованные реше-

#### О фирме New Scale Technologies

Фирма специализируется на разработке и производстве керамических микроэлектродвигателей для применения в миниатюрных устройствах. Компания New Scale Technologies Inc. ([www.NewScaleTech.com](http://www.NewScaleTech.com)) была основана в 2002 году группой специалистов, имеющих десятилетний опыт в области проектирования пьезоэлектрических приводов. Первый коммерческий образец привода SQUIGGLE был создан уже в 2004 году. Созданы специальные исполнения привода для работы в экстремальных условиях, для работы в вакууме, в криогенных установках при сверхнизкой температуре, а также для работы в зоне сильных электромагнитных полей.

За короткое время пьезодвигатели SQUIGGLE нашли широкое применение в лабораторном оборудовании для нанотехнологий, в технологическом оборудовании микроэлектроники, устройствах лазерной техники, медицинском оборудовании, приборах аэрокосмического назначения, установках оборонного назначения, а также в промышленных и бытовых устройствах, например, таких как цифровые камеры и сотовые телефоны.

Так, в отличие от большинства пьезоприводов, в том числе и SQUIGGLE, в приводах PI обеспечивается принудительная фиксация каретки после останова. За счет отсутствия смещения эти устройства обладают высокой точностью позиционирования.

#### Конструкция и принцип работы пьезоприводов PI

На рис. 12 показана конструкция пьезодвигателя фирмы PI.

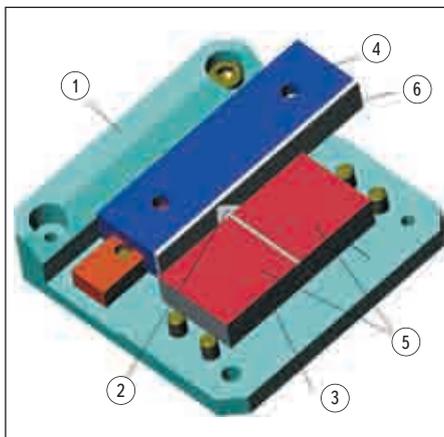


Рис. 12. Конструкция пьезопривода фирмы PI

- 1 — неподвижное основание (керамика)
- 2 — алюминиевый наконечник толкателя
- 3 — керамический пьезоактуатор (неподвижный)
- 4 — подвижная каретка
- 5 — возбуждающие электроды
- 6 — приклеенная полоска фрикциона

PILine — патентованная конструкция пьезопривода, разработанная фирмой PI. Сердцем системы является прямоугольная монолитная керамическая плата — статор, которая разделена с одной стороны на два электрода. В зависимости от направления движения, левый или правый электрод керамической платы возбуждается импульсами с частотой в десятки и сотни килогерц. Алюминиевый фрикционный наконечник (толкатель) прикреплен к керамической плате. Он обеспечивает передачу движения от колеблющейся пластины статора к фрикциону каретки. Материал фрикционной полоски обеспечивает оптимальную силу трения при работе в паре с алюминиевым наконечником.

Благодаря контакту с полоской фрикциона обеспечивается сдвиг подвижной части привода (каретки, платформы, поворотного столика микроскопа) вперед или назад. С каждым периодом колебаний керамического статора выполняется сдвиг каретки на несколько нанометров. Движущая сила возникает из продольных колебаний пластины актуатора. В настоящее время ультразвуковые пьезоприводы могут обеспечивать движение с ускорением до 20 g и скорость движения до 800 мм/с! Усилие привода пьезодвигателя может достигать 50 Н. Приводы PLine могут работать без обратной связи и обеспечивать разрешение 50 нм.

На рис. 13 показана конструкция пьезокерамического статора PLine.

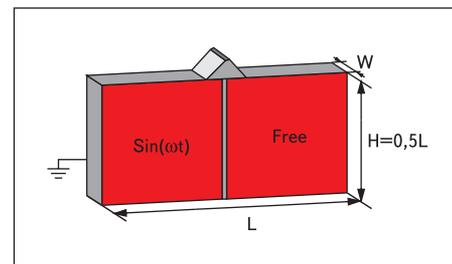


Рис. 13. Конструкция керамического статора пьезопривода PLine

При отсутствии сигнала наконечник толкателя прижат к полоске фрикциона и сила трения, действующая на границе между наконечником и фрикционом, обеспечивает фиксацию каретки.

#### PILine — серия пьезоприводов с линейным перемещением

Фирма PI выпускает серию линейных пьезоприводов по технологии PLine с различными функциональными параметрами. В качестве примера рассмотрим характеристики конкретной модели P-652 (рис. 14).

Пьезопривод PLine P-652 может использоваться в OEM приложениях, для которых важны малые габариты и масса. Модуль привода P-652 может заменить классический привод на основе двигателя с вращающимся валом и механической передачей, а также другие линейные электромагнитные приводы.



Рис. 14. Вариант реализации пьезопривода P-Line P-652 (рядом для сравнения мяч для гольфа)

Самофиксация каретки при останове не требует дополнительной энергии. Привод предназначен для перемещения малых объектов с высокой скоростью и точностью.

Компактный пьезомотор с интегрированной схемой управления может обеспечивать движение с ускорением до 2,5 g и скоростью до 80 мм/с. При этом выдерживается высокая точность позиционирования каретки и достаточно высокий уровень силы фиксации в неподвижном состоянии. Наличие фиксации каретки обеспечивает возможность работы привода в любых положениях и гарантирует фиксацию положения каретки после остановки даже под действием нагрузки. В схеме драйвера для возбуждения пьезоактуаторов используются короткие импульсы амплитудой всего 3 В. Схема обеспечивает автоподстройку резонансного режима под конкретные размеры керамических актуаторов.

Основные характеристики линейного пьезомотора P-652 P-Line:

- низкая стоимость серийного производства;
- размер пьезомотора — 9,0×6,5×2,4 мм;
- рабочий ход перемещения каретки — 3,2 мм;
- скорость движения до 80 мм/с;
- самофиксация при останове;
- MTBF — 20 тыс. часов.

#### Модули приводов

##### со встроенным контроллером

Фирма PI производит модули управления (контроллеры) для своих пьезоприводов. Плата управления содержит интерфейс



Рис. 15. Модуль пьезопривода со встроенной платой управления

управления, преобразователь напряжения и выходной драйвер для возбуждения пьезо-керамического актуатора. В контроллерах приводов используется традиционная схема пропорционального управления. В зависимости от условий применения приводов в контроллере может использоваться цифровой или аналоговый тип пропорционального управления. Для управления самими актуаторами применяются синусоидальные сигналы, а также может использоваться обратная связь по датчикам положения. Фирма PI выпускает готовые модули с датчиками положения. Фирма PI разработала и производит емкостные датчики положений для своих интегральных модулей (рис. 15).

#### Цифровой (импульсный) режим управления

Импульсный режим управления движением подходит для приложений, требующих малых перемещений с большой скоростью, таких как микроскопия или автоматика. Двигатель управляется 5-вольтовыми TTL-импульсами. Ширина импульса определяет длину шага двигателя. Шаг перемещения в таком режиме — до 50 нм. Для реализации одного такого шага подается импульс напряжения длительностью около 10 мкс. Длительность и скважность импульсов управления зависит от скорости движения и величины выполняемого перемещения каретки.

#### Режим аналогового управления

В данном режиме в качестве входных сигналов управления положением используются аналоговые сигналы амплитудой  $\pm 10$  В. Величина перемещения каретки в этом случае прямо пропорциональна амплитуде управляющего сигнала.

Области применения прецизионных пьезоприводов:

- биотехнологии;
- микроманипуляторы;
- микроскопия;
- лабораторное оборудование контроля качества;
- тестовое оборудование для полупроводниковой промышленности;
- метрология;
- тестирование дисковых накопительных устройств;
- НИР и ОКР.

Преимущества ультразвуковых пьезодвигателей P-Line:

- *Малые габариты.* Например, модель M-662 обеспечивает рабочий ход 20 мм при габаритах корпуса 28×28×8 мм.
- *Малая инерция.* За счет этого достигается перемещение с большими скоростями, высокими ускорениями и сохраняется высокое разрешение. P-Line обеспечивает скорости движения до 800 мм/с и ускорение до 20 g. Жесткость конструкции обеспечивает очень малое время продвижения за один шаг и высокую точность позиционирования — 50 нм.

- *Отличный показатель удельной мощности.* Привод P-Line обеспечивает высокие характеристики в минимальных габаритах. Никакой другой двигатель не может обеспечить такую же комбинацию ускорений, скоростей и точности.
- *Безопасность.* Минимальный момент инерции наряду с фрикционной муфтой обеспечивает безопасность при работе. Такой привод не может разрушиться и повредить окружающие предметы в результате нарушения режима работы. Использование фрикционной муфты предпочтительнее, чем червячная передача в двигателе SQUIGGLE. Несмотря на большие скорости перемещения каретки, риск повреждения, например, пальца оператора гораздо меньше, чем при использовании любого другого привода. Это означает, что пользователь может прикладывать меньше усилий, чтобы обеспечить безопасность работы привода.
- *Автофиксация каретки.*
- *Возможность работы привода в вакууме.*
- *Незначительный уровень ЭМИ.* Приводы P-Line при работе не создают магнитных полей и не имеют в конструкции ферромагнитных материалов.
- *Гибкость решений для OEM.* Приводы P-Line могут поставляться как с датчиками, так и без датчиков положения. Кроме того, могут поставляться и отдельные компоненты привода.

#### Линейные пьезоприводы типа NEXLINE

Пьезоприводы NEXLINE обеспечивают более высокую точность позиционирования. Конструкция привода содержит несколько актуаторов, работающих согласованно. В отличие от приводов P-Line, в этих устройствах актуаторы работают не в резонансном режиме. В этом случае получается многотактная схема перемещения подвижной каретки несколькими толкателями актуаторов. Тем самым не только повышается точность позиционирования, но и увеличиваются моменты сил движения и удержания каретки. Приводы этого типа, так же как и приводы P-Line, могут поставляться как с датчиками положения каретки, так и без них.

Основные преимущества серии пьезоприводов NEXLINE:

- Очень высокое разрешение, ограниченное только чувствительностью датчиков положения. В режиме аналогового перемещения с использованием датчиков положения достигается точность позиционирования 50 нм (0,05 мкм).
- Работа с высокой нагрузкой и большой силой фиксации каретки. Приводы NEXLINE могут обеспечивать усилия до 600 Н. Жесткая конструкция и применение резонансных частот возбуждения в диапазоне сотен герц позволяют конструкции подавлять вибрацию от внешних воздействий. Аналоговый

режим работы может активно применяться для сглаживания вибрации и дрожания основания привода.

- Может работать как в режиме с открытым контуром обратной связи, так и с обратной связью по датчикам положения. Цифровой контроллер NEXLINE может использовать сигналы положения от линейных энкодеров или же от лазерных интерферометров, а для очень высокой точности позиционирования использовать сигналы абсолютного положения от емкостных датчиков.
- Сохраняет стабильное положение каретки при выключении питания.
- Длительный срок службы — более 10 лет.
- Привод NEXLINE не содержит ферромагнитных деталей, не подвержен действию магнитных полей, не является источником электромагнитного излучения.
- Устройства работают в очень тяжелых условиях внешней среды. Активные части приводов NEXLINE выполнены из вакуумной керамики. NEXLINE также может ра-

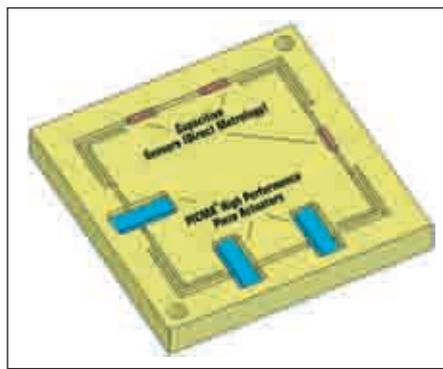


Рис. 16. Прецизионная двухкоординатная платформа с PISMA пьезоактуаторами и емкостными датчиками положения

ботать без нарушений при облучении жестким ультрафиолетом.

- Очень прочная конструкция. Приводы NEXLINE в процессе транспортировки могут выдерживать удары и вибрации до нескольких g.



Рис. 17. Платформа с пьезоприводами NEXLINE, имеющая 6 степеней свободы — микроробот HEXAPOD



Рис. 18. Низкопрофильная двухкоординатная платформа с параллельной кинематической схемой для микроскопии

## Гибкость дизайна для OEM

Приводы NEXLINE выпускаются в трех вариантах интеграции. Пользователь может заказать готовый OEM двигатель, только пьезоактуаторы для двигателя своей конструкции, либо комплексную систему под ключ, например такую, как многоосный поворотный столик или же сборочный микроробот с шестью степенями свободы. На рис. 16–19 показаны различные варианты реализации многокоординатных устройств позиционирования на базе пьезоприводов фирмы PI.

## Литература

1. SQL Series Piezo Motors for OEM Product Application. ([www.NewScaleTech.com](http://www.NewScaleTech.com))
2. MC-1000 Drive Card for SQUIGGLE Motors. ([www.NewScaleTech.com](http://www.NewScaleTech.com))
3. Simple Ceramic Motor... Inspiring Smaller Products D. A. Henderson New Scale Technologies, Inc. ([www.NewScaleTech.com](http://www.NewScaleTech.com))
4. PI Datasheet Details Fundamentals of Piezoelectricity ([www.physikinstrumente.com/en](http://www.physikinstrumente.com/en))



Рис. 19. Полностью независимый трехкоординатный пьезопривод для объектива микроскопа