Силовой Шаговый Пьезо Актуатор: моторизованное решение для задач позиционирования с высоким разрешением с устойчивостью к воздействию внешних сил

C. Belly, F. Barillot
Cedrat Technologies SA, Meylan, France

Аннотация:
Обычно удерживающая сила пьезоэлектрических двигателей определяется силой трения, необходимой для осуществления движения. Тем не менее, увеличение силы трения не является логичным для улучшения характеристик двигателя с точки зрения скорости, максимальной движущей силы и срока службы (трибология).
В данной публикации рассматривается новый двигатель, который обеспечивает высокоточное позиционирование и возможность удержания позиции при отключенном питании. На основе Шагового Пьезо Актуатора [1] по своей сути, эта новая конструкция распределяет внешние силы от наиболее чувствительных частей двигателя. Это позволяет двигателю обеспечивать высокое отношение сила / масса и выдерживать еще более высокие нагрузки при выключенном напряжении питания. Представленные далее результаты, полученные на прототипе, предоставляют читателю информацию о преимуществах предлагаемой технологии.

Ключевые слова: пьезоэлектрический, двигатель, высокое разрешение, сила, удержание положения

Введение

В публикации рассматриваются современные двигатели и существующий интерес в увеличении разрешающей способности шаговых двигателей и увеличении силы (блокирующей силы и удерживающей силы при выключенном питании). Инновационная конфигурация реализуется в двух прототипах различных размеров, на основе хорошо проверенных двигателей. В публикации приведены экспериментально полученные результаты. В конце публикации перечислены преимущества применения FSPA для некоторых областей применения.

Основа пьезоэлектрического двигателя

Как хорошо известно, форма APA® обладает преимуществами для конструирования пьезо двигателей [2]. Рычажный механизм и механическая преднагрузка являются ключевыми моментами, которые обеспечивают получение хороших характеристик шагового двигателя. Шаговые Пьезо Актуаторы (Stepping Piezo Actuators - SPA) являются шаговыми двигателями инерционного типа. Они состоят из четырех основных элементов: актуатор, шток, масса, и зажим. Принцип таких двигателей прост и основан на эффекте прерывистого скольжения с применением асимметричных ускорений. На ***Рис. 1*** показаны два последовательных действия, необходимые для получения одного шага. При многократном повторении этой последовательности действий может быть получен ход в несколько миллиметров. Обратное движение осуществляется путем инвертирования двух последовательностей. Это движение называется «шаговый режим».

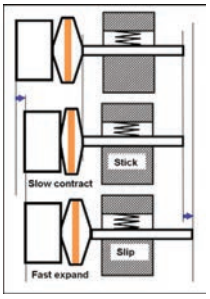

Рис. 1*: Принцип двигателя SPA*

Были разработаны линейные (LSPA) и поворотные (RSPA) конфигурации, механизмы для фокусировки следящих камер, пьезо шторки с большой величиной хода и даже системы для медицинских применений [3]. Тем не менее, применение для некоторых задач может быть ограничено величиной удерживающей силы при выключенном питании. Эта сила ограничена осевой силой трения. Возможность улучшения производительности связана с увеличением предварительной нагрузки двигателя. Это приводит к увеличению силы трения, но также может иметь сильное влияние на характеристики двигателя. Поскольку имеется оптимальное соотношение скорости и силы двигателя, то легко понять, что если сила трения бесконечна, то двигатель не сможет выполнить шаги и поэтому становится неэффективным. В предлагаемом новом двигателе FSPA используется механическая конфигурация, позволяющая отделить внешнюю силу от собственно двигателя. Таким образом, обеспечивается возможность двигателя противостоять внешним экстремальным силам при сохранении компактных размеров. Речь идет о том, что сопротивление к внешним силам должно быть больше, чем движущая сила. Это позволит не использовать дополнительные фиксирующие механизмы во время запуска. Кроме того, могут быть достигнуты более высокое разрешение и большая рабочая сила. Далее эти аспекты описаны более подробно.

Прототип 1

Для определения потенциала технологии FSPA были разработаны два прототипа. Первый прототип изготовлен на основе трех APA40SM и в соответствии с техническим заданием, должен обеспечить: разрешение с целевым значением до 100 нм, рабочую силу более 40 Н и возможность выдерживать воздействие внешней силы до 1,8 кН на вале. Высота двигателя 85мм, а его диаметр 67мм (см. ***Рис.2***). Соответствие требованиям по возможности выдерживать воздействие внешней силы на вал двигателя, обеспечивается с помощью механической конструкции и при наличии запасов надежности. При разработке данной конструкции FSPA принимались во внимание стандартные запасы надежности из правил по разработке космических механизмов Европейской кооперации по стандартизации в области космической техники (ECSS) [4]. Для соответствия требованиям ESCC требуется пятикратный запас по рабочей силе. Прототип 1 демонстрировал наличие перемещения при рабочей силе 200 Н. Таким образом, достигается задача обеспечить рабочую силу 40 Н в соответствии с требованиями ECSS.

***Рис. 2**: Двигатель FSPA на основе APA40SM*

Шаговое разрешение

Для обеспечения высокого разрешения, на двигатель подаются шаговые импульсы, а выходное положение контролируется с помощью емкостного датчика. Эти датчики находятся перед выходной осью двигателя и обладают коэффициентом усиления 50 мкм/В.

На ***Рис. 3*** представлены результаты, полученные на двигателе с использованием сигнала с размахом амплитуд 75 В на частоте 1 Гц. Зафиксировано разрешение шагов менее 20 нм, что соответствует скорости 1,2 мкм/мин. На частоте 20 Гц и при полном напряжении (размах амплитуд 150 В) скорость составит 75 мкм/мин. На двигателе продемонстрирована возможность управления по скорости.

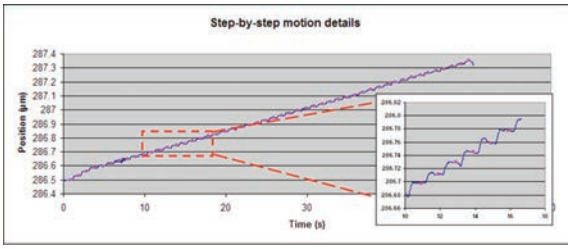

***Рис. 3**: Разрешение двигателя (средний шаг 20 нм)*

Другие экспериментальные результаты, такие как максимальная сила и другие характеристики, полученные в результате кратковременных циклических испытаний, будут представлены в окончательной технической спецификации.

Гаусовское распределение величины шага

Данные о распределении величины шага представлены на ***Рисунке 4***. Можно отметить, что размер шага соответствует распределению Гаусса (*красный - отрицательный, фиолетовый - положительный*). Это означает, что разомкнутый контур не может рассматриваться в качестве стратегии управления (по сравнению с электрическим шаговым двигателем), но средняя скорость остается постоянной. Во-вторых можно отметить разницу между движениями в направлениях вперед и назад. Это также видно на ***Рис. 5*** и можно отметить, что наблюдается несимметричность. Такое поведение отмечается у некоторых пьезоэлектрических двигателей [5].

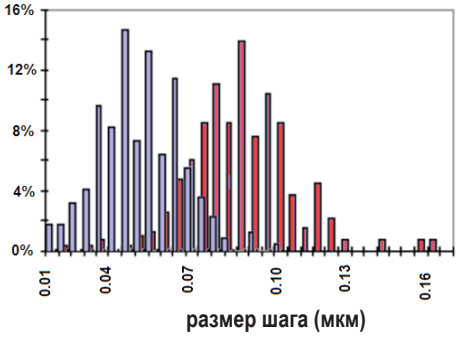

***Рис.4**: Распределение размера шага двигателя*

Кратковременные испытания на срок службы

Можно выделить некоторые очень требовательные области применения, такие как тонкая настройка оптики и / или аппаратура для оценки деформации конструкции. В этих задачах может использоваться (но не обязательно) очень ограниченное количество срабатываний. Было проведено испытание на приведение в действие при максимальной амплитуде и при ограниченном количестве срабатываний. Выполненные 110 срабатываний с передним и задним ходом показали следующие характеристики (*см.* ***Рис. 5***).

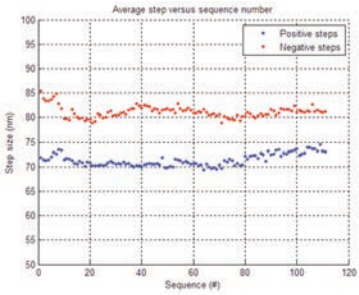

***Рис. 5**: Результаты циклических испытаний*

Можно увидеть, что при циклических испытаниях размер шага является практически постоянным и присутствуют только небольшие отклонения. Также просматривается диссимметрия шага, связанная с изменением направления движения (классическая в шаговых пьезо двигателя), что не является критичным в рассматриваемых областях применения пьезо двигателя.

Прототип # 2

Второй прототип основан на меньших пьезоэлектрических актуаторах, полученных на основе стандартных APA35XS. Задачей этого двигателя является не достижение наименьшего разрешения, а оценка последствий уменьшения габаритов. Технические характеристики обеспечивают выполнения субмикронных шагов с максимальной силой при ограниченных габаритах. Высота пьезо двигателя 50 мм и диаметр 44мм (Рис. 6). Он обеспечивает ход штока 6 мм.

***Рис. 6:** FSPA двигатель на основе APA35XS*

Шаговый режим работы

Параметры шагового режима подтверждены для одного внутреннего компонента двигателя. Это определяет обычные характеристики шагового режима (***Рис.*** *7*). Можно увидеть, что в текущей тестовой последовательности, напряжение ограничено уровнем 80 Вольт, по сравнению с полным размахом амплитуд 170 В для пьезо компонента. При таком пониженном напряжении регистрируется сила на уровне 25 Н.

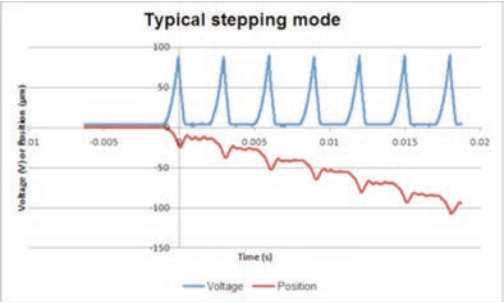

Рис. *7: Стандартный пример шагового движения*

На выходном валу двигателя в сборе смещение демонстрирует разрешение на уровне 250 нм. На ***Рис. 8*** можно увидеть выходное перемещение вала и размер шага. Изменение размера шага вполне сопоставимо с результатами распределения шагов, полученными на ***Рис 4***.

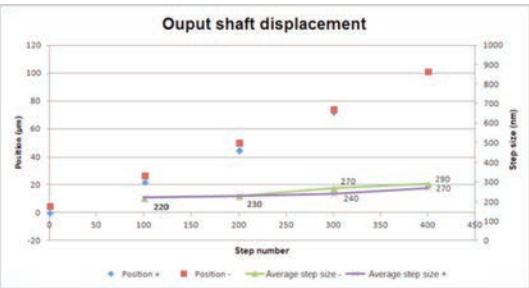

Рис.8 *Смещение выходного вала двигателя*

Сводная таблица по характеристикам и дальнейшая работа

Полученные на втором прототипе результаты соответствуют ожиданиям, что можно увидеть из таблицы.

Таблица 1*: сводная таблица характеристик 2-го прототипа*

	Ед. изм.	Цель	Измерение
Размер шага (ном.)	нм	<1000	250
Номин. частота шага	Гц	>50Hz <500Hz	333
Выходная скорость	мкм/с	>8.5 <88	82
	мм/мин	>0.5 <5.0	4.9

Дальнейшая работа по описанию характеристик будет проведена при полной амплитуде напряжения. Действительно, при увеличении напряжения, скорость и сила увеличатся. Как следствие, более высокое перемещение при постоянной рабочей частоте двигателя приведут к большей скорости.

В космических системах увеличение напряжения не приветствуется, но для других наземных приложений это может быть полезно.

Области применения

Применение FSPA двигателя просматривается в приборостроении, оптике и космосе. Потенциальное применение в термо-вакуумных средах [6] полностью коррелирует с поведением SPA в термо-вакуумных средах. Следовательно, преодоление ограничений связанных с тепловыми воздействиями и работой в вакууме, также является задачей для FSPA.

FSPA двигатель хорошо подходит, например, для подстройки интерферометров путем перемещения линз, для выравнивания чувствительных элементов, для контроля формы оптических компонентов (адаптивная оптика) и т.д.

Двигатель является самоблокирующимся и применим для работы вакууме. Он хорошо подходит для сред, предъявляющих высокие требования, которые содержатся в области применения космической техники и там где требуется обесточенная блокировка положения во время запуска. Немагнитная версия FSPA также может быть использована в большом магнитном поле (МРТ) или в высоко чувствительных приложениях.

Выводы

В данной публикации описаны два прототипа предлагаемой технологии. Эта технология обеспечивает большие силы (сила удержания без подачи питания и движущая сила) в сочетании с очень высоким разрешением (вплоть до нескольких десятков нанометров). Благодаря ключевым характеристикам, уже учтена возможность применения FSPA в области оптоэлектроники в космической среде.

Список литературы:

[1] F. Claeyssen et Al., Stepping Piezoelectric Actuators based on APAs, Actuator 2008

[2] C. Belly et Al., Benefits from Amplification of Piezo Actuation in Inertial Stepping Motors and application for High-performance Linear Micro Motors, Actuator 2010

[3] C. Belly et Al., Micro and Macro piezo stepper motors: from biomed to space applications, ISOT2011

[4] ECSS-E-30 Part 3A

[5] V. Bhatia et Al., Efficient and compact green laser incorporating adaptive optics for wide operating temperature range, SIS Intern. Syp. Digest of Technical papers, p962

[6] M. Buttery et Al., Thermal vacuum behaviourof stepping piezo actuator, ESMATS 2011

Контактные данные:

ООО "Промышленная метрология"
http://metrology-spb.ru/
тел. +7 (812) 438-17-18 (доб. 115)
факс +7 (812) 438-17-21
моб: +7 (950) 023-73-89
e-mail: karev_p@metrology-spb.ru