7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials
SMART 2015
A.L. Araújo, C.A. Mota Soares, et al. (Editors)
© IDMEC 2015

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗО СИСТЕМ: БОЛЬШОЙ ХОД, ВЫСОКАЯ ЧАСТОТА, ВЫСОКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Aleksander Kras, Olivier Sosnicki, Steven Rowe, Francesca Battistello, Frank Claeyssen

Cedrat Technologies
59 Chemin du Vieux Chêne, 38246 Meylan, France
E-mail: [aleksander.kras] [olivier.sosnicki] [steven.rowe] [francesca.battistello] [frank.claeyssen]@cedrat-tec.com,
Web page: www.cedrat-technologies.com

Ключевые слова: пьезоэлектрический, актуатор, импульсный усилитель, высокая мощность.

Описание: *В данной статье представлены результаты научных исследований и разработок высокопроизводительных пьезоэлектрических актуаторов. Проведенные исследования были сосредоточены на усовершенствовании трех основных параметров: величина хода, максимальная частота возбуждения и рабочая температура. В данной работе были представлены и описаны два новых привода. Первый представленный актуатор обеспечил увеличение максимального хода. Этот актуатор удвоил ход стандартных актуаторов с увеличенным ходом. Улучшение второго актуатора было сосредоточено на повышении постоянной частоты возбуждения. И, наконец, специальная инкапсуляция, предназначенная для обоих приводов, позволяет использовать их при высоких температурах. Разработка этих двух новых актуаторов была проведена параллельно с улучшением электроники. Мощный усилитель, представленный в данной работе, обеспечивает ток, достаточный для управления обоими актуаторами на высоких частотах.*

1 ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что преимущества пьезоэлектрических актуаторов хорошо известны, количество задач, в которых могут быть использованы эти высокотехнологичные материалы по-прежнему ограничено. Основные недостатки вытекают из ограничений по величине хода и частоте переключений, перегрева керамики, максимальной рабочей температуры, силовой электроники и т.д. В последнее время Cedrat Technologies исследует решения для преодоления этих проблем.

До недавнего времени на рынке были доступны пьезоэлектрические приводы с самым большим ходом, ограниченным величиной 1 мм. Эту границу потребовалось расширить для того чтобы соответствовать более требовательным задачам. Была поставлена цель: удвоить ограничение хода при одновременном сохранении высокой резонансной частоты.

Другим ограничением является саморазогрев керамики при использовании исполнительных механизмов на высокой частоте в течение длительного времени. В зависимости от управляющей частоты это ограничивает время постоянного использования до нескольких минут или даже секунд. Разработанная система капсуляции в комплекте с системами охлаждения позволяет преодолеть ограничение, вызываемое перегревом. Проведенные предварительные испытания показали, что непрерывно приводящийся в движение при полной деформации на частоте 1000Гц капсулированный актуатор сохраняет температуру керамики ниже 85ºC. Без системы охлаждения стандартный актуатор при той же частоте достигнет точки температуры Кюри менее чем за одну минуту.

Потребляемая мощность пьезоэлектрических актуаторов возрастает пропорционально задающей частоте. Из-за этой корреляции требуется обеспечить высокий запас мощности, который позволит управлять исполнительными механизмами на высокой частоте.

В настоящем документе представлены последние разработки импульсных усилителей и их возможности в таких требовательных приложениях.

Разработанная технология капсулирования для обоих приводов позволяет использовать их в условиях высоких температур. С защитным слоем актуаторы могут быть использованы при температурах до 250 °C. Высокотемпературные провода с водонепроницаемым электрическим разъемом обеспечивают подачу питания для исполнительных механизмов, даже в самых жестких условиях.

В данной статье представлены результаты разработки и тестирования новых пьезоэлектрических актуаторов, которые преодолевают привычные ограничения с точки зрения хода, частоты и температуры.

2 АКТУАТОР С БОЛЬШИМ ХОДОМ

Обычно многослойные пьезоэлектрические актуаторы обеспечивают смещения на уровне около 0,1%, что является недостаточным для многих задач. Самым простым способом увеличения удлинения актуатора является увеличение длины пакета пьезокерамики. К сожалению, это приводит к увеличению габаритных размеров, массы и объема актуатора.

Вторая технология заключается в использовании механического рычага с целью увеличения максимального хода актуатора. Этот метод позволяет получить актуаторы с большой величиной хода в компактных габаритах. Компания Cedrat Technologies имеет большой опыт производства актуаторов с механическими рычагами. Такой тип актуаторов называется APA® (сокр. от «Amplified Piezoelectric Actuator»), что может переводиться как Пьезоэлектрический Актуатор с интегрированным Рычажным механизмом (Рисунок 1). Весь механизм состоит из двух основных частей: пьезоэлектрическая керамика, которая генерирует силу и металлический корпус, который за счет механической редукции увеличивает смещение керамики. Общий ход привода зависит от расширения пьезокерамики и коэффициента редукции корпуса.

Стандартные актуаторы обеспечивают свободный ход на уровне от 0,5 мм до 1 мм [1]. Идея этого исследования состояла в том, чтобы увеличить максимальную длину хода до 2 мм. Было решено разработать новый APA® на основе актуаторов серии L. Эта серия использует 6 пакетов пьезо керамики (10x10x20 мм³) для обеспечения смещения. Длина и ширина практически одинакова для всех актуаторов в серии (145x10 мм²), в то время как высота изменена и имеет влияние на коэффициент механической редукции.

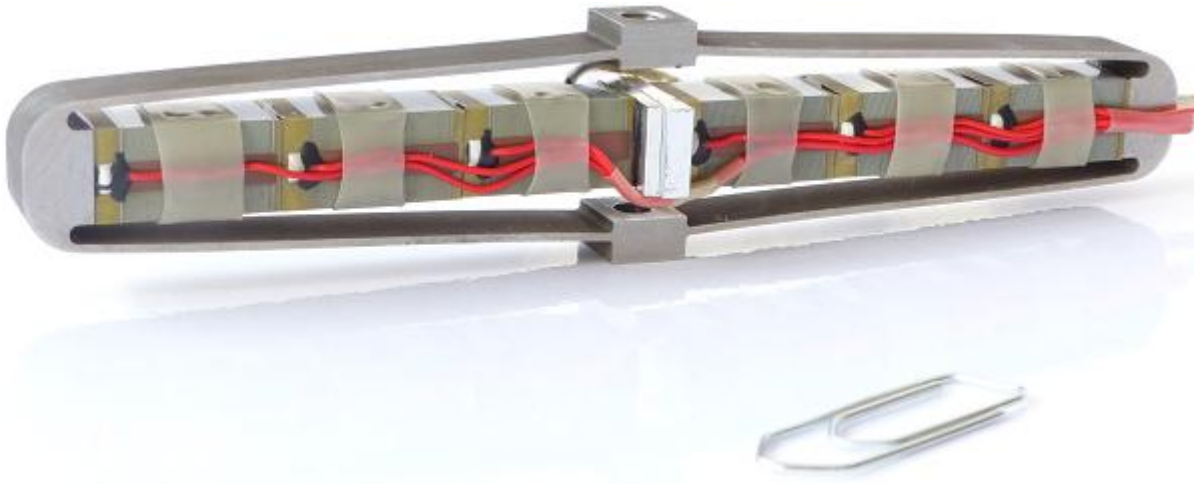

Рисунок 1: Пьезоэлектрический Актуатор с интегрированным Рычажным механизмом APA®, обеспечивающий ход 2мм.

Разработанный актуатор получил название APA2000L и обеспечивает ход 1968 мкм. Резонансная частота 90Гц в режиме с одной заблокированной стенкой (Blocked-Free) и 487Гц в режиме с двумя свободными стенками (Free-Free). Блокирующая сила актуатора составляет 60Н. ри свободном ходе и силе, генерируемая мощность этого актуатора составляет 15 Дж. Коэффициент редукции корпуса равен 15, что является наибольшей из величин, когда-либо полученных ранее.

Разработанный механизм представляет очень хорошие результаты с точки зрения резонансной частоты и блокирующей силы. Он обеспечивает самый большой ход в наиболее компактном размере из всех стандартно доступных актуаторов на рынке.

3 ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АКТУАТОР

Хорошо известно, что пьезоэлектрические актуаторы являются идеальным решением для высоко динамических приложений. К сожалению, самонагревание керамики и низкая точка температуры Кюри не позволяет использовать их при высокой частоте в течение длительного периода времени. Для того, чтобы преодолеть эти ограничения были исследованы системы охлаждения для пьезоэлектрического привода. Для изготовления прототипа был выбран Параллельно Преднагруженный Актуатор (PPA – Parallel Prestressed Actuator). Специальная капсула была разработана и изготовлена для данного типа актуатора. Вид актуатора и разработанная капсула представлена на рисунке 2.

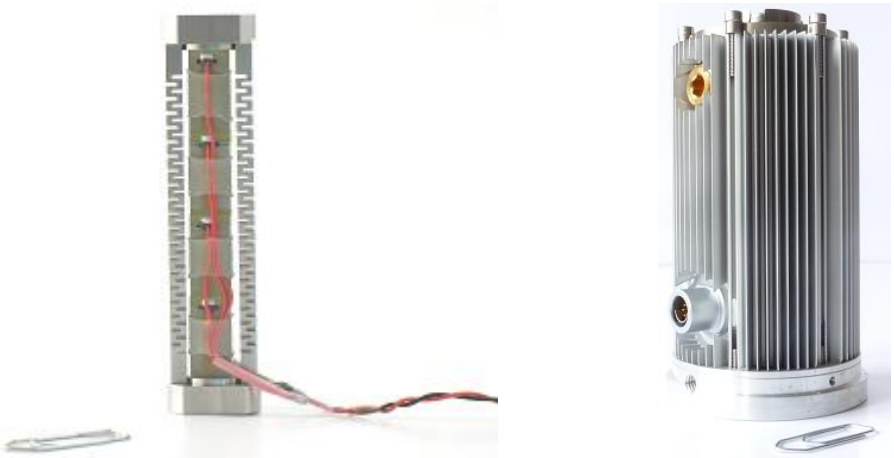

Рисунок 2: Вид PPA80L актуатора (слева) и разработанная капсула для системы охлаждения (справа).

Предлагаемая капсуляция была разработана для того, чтобы использовать два типа систем охлаждения. Первая система охлаждения была основана на специальной жидкости, которая забирает тепло непосредственно от керамики. Вторая система использует теплоотводящие пластины и сжатый воздух для отбора тепла от жидкой среды через капсулу. Капсулированный PPA получил код PPA-E. На актуаторах был проведен ряд испытаний для того, чтобы описать капсулу и системы охлаждения.

Первый выполненный тест показал возможности систем охлаждения. Этот тест проверяет повышение температуры различных актуаторов. Первый испытанный актуатор был обычным PPA80L. Этот актуатор собран из 4-х пакетов пьезокерамики и имеет общие габаритные размеры 80x10x10 мм³. Втором актуатором был капсулированный PPA80L, в котором в качестве системы охлаждения использует только жидкость. В заключение был испытан актуатор, который использует обе системы охлаждения: жидкость и сжатый воздух.

Все три актуатора были запитаны с теми же параметрами частоты (230Гц) и напряжения (170В размах амплитуд). Температура каждого актуатора регистрировалась и контролировалась во времени. Было важно уберечь актуаторы от чрезмерного перегрева, который мог привести к разрушению керамики. Температура на поверхности MLA пакетов керамики [2] должна была оставаться ниже 85 °C. Температура поверхности PPA80L контролировалась с помощью ИК камеры. Тот же метод не может быть использован для капсулированных актуаторов, поэтому на поверхности керамики для измерения температуры была установлена термопара (Рисунок 3).

Рисунок 3: Вид термопары, установленной на пьезоэлектрической керамике, использованной для измерения температуры.

На основании испытаний были получены и показаны на одном графике три кривых нагрева (Рисунок 4). Можно заметить, что PPA80L нагревается до температуры выше 80 °C за время около одной минуты. Чтобы предотвратить разрушение актуатор должен быть остановлен.

Капсулированный актуатор без системы воздушного охлаждения достигает такой же температуры 80 °C на 53-й минуте после начала работы усилителя. Было отмечено, что при более длительном периоде времени работы температура этого актуатора не увеличивается и стабилизируется на уровне 82 °C. В этой конфигурации актуатор осуществил более 170 миллионов циклов в непрерывном режиме на частоте 230 Гц при полном напряжении.

Далее проводились испытания капсулированного актуатора с системой воздушного охлаждения. Система воздушного охлаждения актуатора может быть подключена к системе сжатого воздуха на производстве. Для лучшего контроля потока непосредственно перед разъемом актуатора был установлен игольчатый клапан. Были оценены различные значения давления воздуха. Естественно, что повышение эффективности охлаждения наблюдалось при увеличении воздушного потока. Значительное улучшение наблюдалось при давлении воздуха на уровне в 0,25 бар. При использовании этого значения давления воздуха было отмечено, что температура поверхности керамики при постоянной работе на 230Гц не превышает 60 ° C. На основании результатов испытаний предлагаемое значение давления воздуха улучшает охлаждение привода и предотвращает избыточные потери в сети сжатого воздуха.

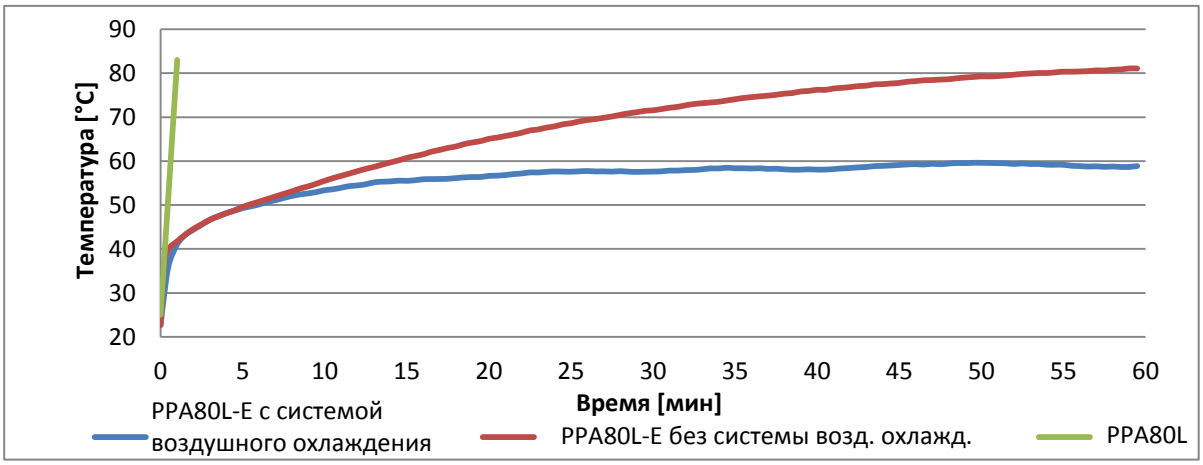

Рисунок 4: График нагрева PPA80L и капсулированного актуатора (PPA80L-E).

Преимущества системы охлаждения привода на основе сжатого воздуха были проверены после выключения питания. График охлаждения поверхности керамики представлен на рисунке 5. Было обнаружено, что применение актуатора с системой воздушного охлаждения позволяет за 15 минут уменьшить температуру керамики от 82 °C до температуры окружающей среды 25 °C.

За тот же период времени керамика капсулированного привода без системы воздушного охлаждения охлаждается до температуры 57 °C.

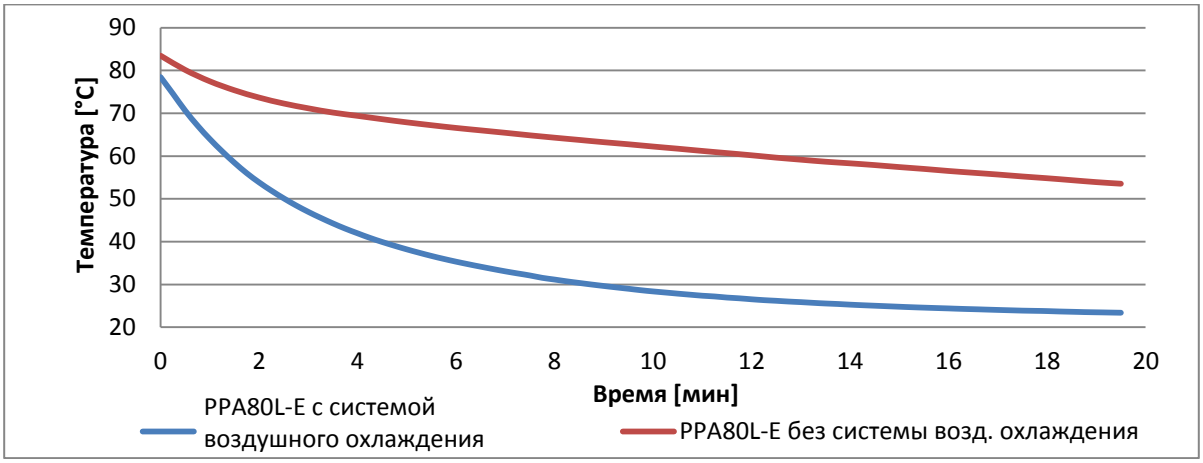

Рисунок 5: График охлаждения капсулированного актуатора (PPA80L-E) с системой и без системы сжатого воздуха.

Высокая эффективность системы воздушного охлаждения позволяет увеличить рабочую частоту актуаторов. Давление воздуха поддерживали на уровне 0,25 бар, в то время как частоту увеличивали. Было отмечено, что капсулированный актуатор может работать непрерывно даже на частоте 1000 Гц. Тот же актуатор без капсулирования может быть использован только при частоте 50 Гц. Контроль температуры для обоих актуаторов подтвердил, что температура поверхности керамики не превышала 90 °C (Рисунок 6).

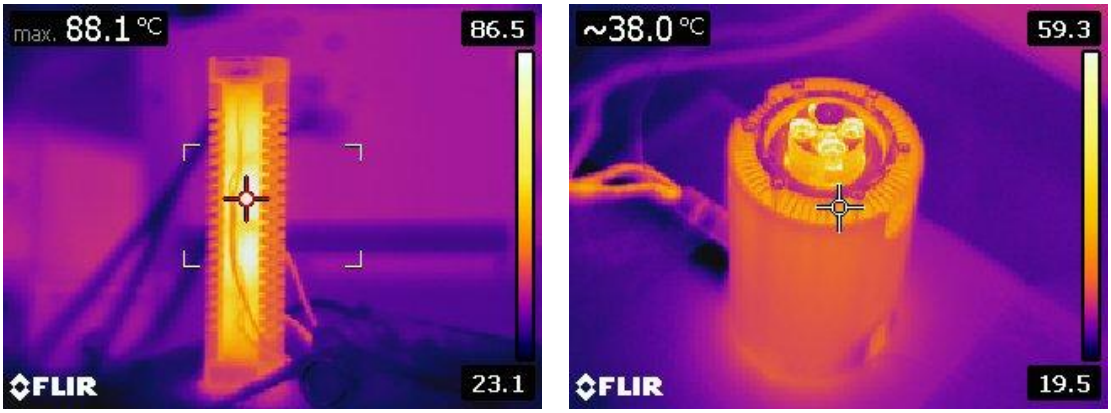

Рисунок 6: PPA80L (слева) и PPA80L-E (справа) работают на разных частотах, но нагревается одинаково.

Представленная конфигурация капсулированных актуаторов демонстрирует множество преимуществ. По сравнению с обычной версией актуатора частота возбуждения увеличилась в 20 раз для капсулированного привода с системой воздушного охлаждения (1000 Гц). Капсулированный актуатор без системы воздушного охлаждения может использоваться на частоте, почти в 5 раз выше (230 Гц) по сравнению с обычными актуаторами (50 Гц для PPA80L).

4 МОЩНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Способность капсулированного привода, оборудованного системой воздушного охлаждения, работать на высоких частотах, ведет к необходимости разработки системы питания достаточного уровня. В целях повышения эффективности и снижения потерь мощности был разработан усилитель на основе импульсной топологии. Усилитель должен

быть достаточно мощным, чтобы управлять капсулированным актуатором (PPA80L-E) даже при 1000Гц. Разработанный усилитель получил название SA75 и доступен в 3-х конфигурациях, которые зависят от величины требуемого тока. Самая мощная конфигурация SA75D может обеспечить пиковый ток до 20А. Изображение усилителя SA75D в собранном виде в стандартной 19 дюймовой стойке представлено на рисунке 7. Импульсный усилитель предназначен для низковольтной пьезокерамики и может обеспечить напряжение от -20 В до +150В [170 В размах напряжения].

Рисунок 7: SA75D собранный в стандартной 19 дюймовой стойке.

Разработанный импульсный усилитель был испытан с капсулированным актуатором (Рисунок 8). По предварительным расчетам актуатор должен приводиться в движение на частоте 1000Гц с помощью усилителя SA75D. Для приведения в действие актуатора на этой частоте требуется максимальный ток на уровне 17 А. Так как усилитель был разработан, чтобы обеспечить 20А, то частота возбуждения актуатора была увеличена до 1300 Гц. На этой частоте ток достиг максимального значения 19А. В то же время измерения потребляемой мощности показали, что реальная потребляемая мощность усилителя составляет 100 Вт, благодаря функции рекуперации энергии.

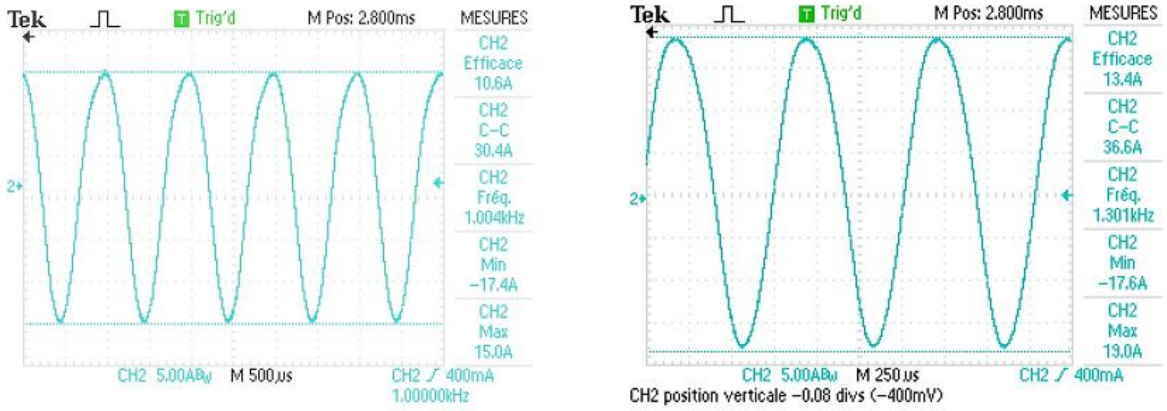

Рисунок 8: Испытания SA75D на частоте возбуждения актуатора 1 кГц и 1,3 кГц.

Кроме того импульсная топология позволяет получить компактные размеры усилителя. Объем усилителя составляет около 1дм³, общая масса 850г [3]. Представленные технические характеристики делают этот усилитель одним из самых мощных из имеющихся в настоящее время на рынке, при сохранении компактных размеров относительно обеспечиваемой мощности.

6 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АКТУАТОРЫ

Разработанная капсуляция для пьезоэлектрических приводов обеспечивает дополнительные преимущества. Кроме использования капсуляции в качестве системы охлаждения она используются для защиты пьезоэлектрические керамики от жестких условий. В общей сложности два актуатора были заключены в капсулы: PPA80L и APA2000L (Рисунок 9). Оба актуаторы были подготовлены к высокой температуре окружающей среды и к условиям работы в жидкости.

Соединители для подачи питания герметичны и защищены от влаги (IP68). Провода с ПТФЭ изоляцией позволяют использовать их даже при температуре 250 ° C. На актуаторах была установлена высокотемпературная керамика, разработанная Noliac, которая может использоваться для эксплуатации при температуре до 200 °C. Испытания, запланированные на будущее, продемонстрируют возможности использования этих приводов в тяжелых условиях.

Рисунок 9: Капсулированные PPA80L и APA2000L.

8 ВЫВОДЫ

Разработанные актуаторы, представленные в этой статье преодолевают стандартные ограничения с точки зрения хода, частоты возбуждения и высокой температуры окружающей среды. Результаты испытаний подтвердили хорошие возможности обоих актуаторов. Разработанный APA2000L удвоил ход стандартных актуаторов со встроенным рычажным механизмом. При ходе 2 мм он обладает высокой рабочей частотой при наиболее компактном размере.

Капсулированный актуатор PPA обладает максимальной рабочей частотой. При использование обеих систем охлаждения (жидкостной и воздушной) этот актуатор может непрерывно работать даже на частоте 1000 Гц, что в 20 раз больше по сравнению с обычным актуатором. При использовании только одной системы охлаждения, этот актуатор может непрерывно работать на частоте 230 Гц. Ресурсные испытания не выявили потери производительности после 170 миллионов циклов.

Для того, чтобы управлять капсулированным актуатором на высокой частоте был разработан новый мощный усилитель на основе импульсной топологии. Испытания показали, что этот усилитель может обеспечить пиковый ток 20A и позволяет управлять актуатором PPA80L-E на частоте 1300 Гц. Измерения показали, что благодаря импульсной топологии и функции рекуперации энергии этот усилитель требует только 100 Вт для приведения в действие актуатора на этой частоте.

Капсуляция, предназначенная для обоих актуаторов, защищает керамику от влажности и высоких температур. Запланированные будущие испытания покажут возможности использования этих приводов в тяжелых условиях.

9 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

Разработка актуаторов и усилителя, представленных в этой статье, была сделана в рамках проекта Европейского Союза FP7: AEROPZT. Этот проект направлен на разработку пьезоэлектрической керамики, актуаторов и капсуляции для передовой системы ступенчатого возгорания топлива в авиационном газотурбинном двигателе. Проектируемая система приведения в действие должна быть способна работать при высокой температуре, будучи погруженной в жидкость.
Четыре партнера, участвующих в проекте AEROPZT:
1 Plant integrity LTD
2 Politecnico di Torino
3 Cedrat technologies
4 Noliac A/S

10 БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования, которые привели к этим результатам, получили финансирование В рамках Седьмой Программы Европейского Союза (FP7 / 2007-2013) для Совместной Технологической Инициативы Чистое Небо по гранту с номером соглашения n° [632604].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] C. Mangeot, B. Andersen, R. Hilditch, *Design of lightweight, temperature stable and highly dynamic amplified piezoelectric actuators*, 979-982, ACTUATOR 2010, Bremen, 2010

[2] Tokin Multilayer Piezoelectric Actuators Catalogue, p04, Vol. 08, 2015.

[3] M. Fournier, M. Brahim, T. Porchez, O. Sosnicki, *New design of high switching power amplifier for driving piezoelectric actuators in aeronautic applications*, EPE’14 ECCE conference, 2014.

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