

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТУАТОРА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛАСТОМЕРА ДЛЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

© 2025

- А. М. Базиненков** кандидат технических наук, доцент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
ambazinenkov@bmstu.ru
- В. С. Щербакова** студент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
viktoria.sherbakova97@gmail.com
- С. В. Сидорова** кандидат технических наук, доцент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
sidorova_bmstu@mail.ru
- А. Д. Купцов** инженер;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
alex-kouptsov@bmstu.ru
- А. А. Фельде** студент;
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
feldeaa@student.bmstu.ru

Рассматривается один из способов повышения точности технологического оборудования, а также повышения его устойчивости к внешним вибрациям – применение «интеллектуальных» материалов, среди которых перспективно использование диэлектрических эластомеров благодаря их низкому модулю упругости, виброизоляционным свойствам, высокому быстродействию, широкому диапазону деформации под действием электрического поля. Выявлены ключевые параметры, влияющие на создаваемые актуаторами на основе диэлектрических эластомеров перемещения, среди которых технология изготовления и состав диэлектрических эластомеров и актуаторов на их основе и геометрические параметры образцов. Изготовлены образцы актуаторов с разной толщиной активного слоя и экспериментально установлено влияние этого геометрического параметра на создаваемые перемещения.

Виброизоляция; диэлектрический эластомер; актуатор; деформация; электрод; вакуум; тонкопленочное покрытие

Цитирование: Базиненков А.М., Щербакова В.С., Сидорова С.В., Купцов А.Д., Фельде А.А. Исследование параметров актуатора на основе диэлектрического эластомера для системы активной виброизоляции // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 98-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-98-108

Введение

В настоящее время активно развиваются инновационные прецизионные механизмы микро- и наноперемещений, основанные на применении новых принципов преобразования электрической энергии в механическую. Применение механизмов позволяет улучшать характеристики оборудования в различных областях машиностроения. В современном технологическом и аналитическом оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений, в частности, наибольшее распространение получили устройства на основе «интеллектуальных» материалов, пьезоэлектриков. Принцип их действия основан на преобразовании электрической энергии в механическую за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта. Диапазон перемещений (ход), создаваемый столбчатым пьезоэлектрическим элементом, определяется его размерами и составляет от 1 до 100 мкм [1]. При малой величине хода пьезоэлектрические меха-

низмы перемещений на сегодняшний день имеют беспрецедентную точность позиционирования в точку, которая достигает величины 0,1 нм [2].

Большое влияние на точность микроперемещений оказывают тепловые и вибрационные возмущения, которые при больших диапазонах перемещений объектов, как правило, не учитывались. Амплитуда вибрационных возмущений может достигать 200 мкм на низких частотах вибрационных возмущений до 10 Гц [3]. Однако при малых ходах механизма виброперемещения от внешних воздействий на несколько порядков выше чувствительности к перемещениям пьезоактуаторов.

Традиционные электромеханические исполнительные устройства в данном направлении свои возможности исчерпали и необходим переход на другой технологический уровень создания устройств с применением новых материалов, обладающих высокими быстродействием, виброустойчивостью, точностью позиционирования.

Материалом со схожим с пьезоэлектриками принципом действия, но имеющим низкий модуль упругости и большой эффект внутренней виброзащиты является диэлектрический эластомер (ДЭ).

Актуатор на основе диэлектрического эластомера

Исследуемый материал относится к электронным электроактивным полимерам (ЭАП), которые управляются электростатическими кулоновскими силами и силами от эффекта электрострикции в активном слое, однако для их эффективной работы требуются высокие управляющие напряжения (> 10 В /мкм), что ограничивает их применение [4].

Электронные ЭАП стимулируются электрическим полем между электродами, покрывающими полимер. Материалы, активируемые полем, удерживают созданное смещение при работе от постоянного напряжения, что является большим преимуществом для многих сфер применения, включая прецизионные механизмы перемещений. Кроме того, они имеют более высокую плотность механической энергии и могут без ограничений активироваться в воздухе. Однако для них требуется высокое электрическое поле, которое может быть близко к уровню пробоя диэлектрика.

ДЭ работают благодаря электростатическим силам. Простейшие актуаторы на их основе обычно представляют собой плёнку активного материала, установленную между двумя электродами, по аналогии с конденсатором, как показано на рис. 1. Когда диэлектрик подвергается действию электрического поля, на его поверхностях появляются положительные и отрицательные электрические заряды, между которыми начинает действовать кулоновская сила, которая создает напряжение, что и приводит к деформации активного материала. Податливость эластомера позволяет зарядам электродов сближаться, сжимая диэлектрик конденсатора. Также вклад в деформацию ДЭ вносит эффект электрострикции, под действием которого даже в отсутствии какой-либо внешней силы на краях ДЭ возникает сжимающее напряжение.

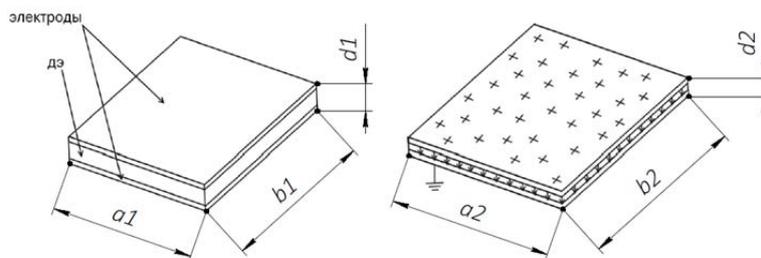


Рис. 1. Принцип действия актуатора на основе диэлектрического эластомера

Когда на электроды подаётся напряжение, электрическое поле между электродами изменяется, форма эластомера также изменяется. Его толщина уменьшается ($d1 > d2$), площадь поверхности увеличивается ($a1 < a2, b1 < b2$). Сохранение объёма заставляет эластомер расширяться поперёк электрического поля, увеличивая площадь активного материала. В результате даже в отсутствии какой-либо внешней силы на краях ДЭ возникает сжимающее напряжение, которое обычно называют напряжением Максвелла [4; 5], вычисляемое по формуле:

$$p = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2, \quad (1)$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость материала; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Кл²/м²·Н; E – напряжённость электрического поля, В/м.

Создаваемая под действием электрического поля относительная деформация определяется как

$$\varepsilon = \frac{p}{Y}, \quad (2)$$

где Y – модуль упругости материала первого рода, МПа.

Таким образом, деформацию за счёт электростатики можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 E^2}{Y}. \quad (3)$$

Варьировать величину ε возможно за счёт изменения упругости материала, его толщины и диэлектрической проницаемости, а также максимального электрического поля, которое может выдержать ДЭ. К основным факторам, определяющим деформацию ДЭ под действием электрического поля, относятся: состав ДЭ, технология его изготовления, геометрические размеры, жёсткость элементов конструкции, а также толщина и свойства используемых электродов и их совместное влияние. Из-за своих свойств ДЭ могут быть использованы в качестве исполнительных механизмов.

Из (3) видно, что для повышения деформации ДЭ под действием электрического поля необходимо стремиться к уменьшению толщины ДЭ. Однако изготовление тонкоплёночных ДЭ значительно усложняет процесс изготовления актуаторов на основе ДЭ [6; 7]. Также с уменьшением толщины ДЭ увеличивается влияние электродов на жёсткость конструкции, что сказывается на деформации под действием электрического поля. Так, в работе [8] для исследования свойств актуаторов на основе ДЭ были изготовлены образцы из силиконовых плёнок с номинальными толщинами 20, 50 и 100 мкм. При проведении испытания на удлинение под нагрузкой для образцов различной толщины (с электродами и без них) наблюдался эффект повышения жёсткости, а также увеличение относительной вязкоупругости для образцов с относительно толстыми электродами, толщина которых составляет больше 7% от толщины ДЭ. Кроме того, результаты исследования показали, что электромеханическую чувствительность образца можно улучшить, используя более тонкие электроды. Поэтому, чтобы свести к минимуму эффект жёсткости твердотельных электродов, авторы [8] рекомендуют, чтобы общая толщина электрода была как минимум в 15 раз тоньше, чем толщина пленки ДЭ. Также было показано, что более тонкие пленки имеют более низкую электромеханиче-

скую чувствительность, чем более толстые. Предполагается, что причиной такого снижения производительности является эффект повышения жёсткости электродов.

Однако минимальная толщина ДЭ ограничена не только технологическими возможностями изготовления, но и электрическим полем. Под действием электрического поля ДЭ уменьшается в толщине и увеличивает свою площадь. Такие изменения вызывают усиление электрического поля в диэлектрическом эластомере. При достижении критического значения электрического поля слой ДЭ разрушается. Такой отказ функционирования устройства известен как нестабильность материала, которая оказывает существенное влияние на способность ДЭ как исполнительного механизма [9]. Напряжение, при котором устройство выходит из строя, называется напряжением пробоя.

В работе [10] было выявлено влияние толщины и предварительного растяжения эластомера на напряжённость электрического поля, соответствующую электрическому пробую. Исследовались листы акрилового ДЭ двух исходных толщин: один толщиной 0,5 мм (VNB 4905), другой толщиной 1,0 мм (VNB4910) (оба листа имеют одинаковый полимерный состав; последние две цифры в обозначении показывают толщину листа). Относительное растяжение λ определяется как отношение длины после растяжения к исходной длине эластомера. Растяжения исследуемых образцов были одинаковыми – двухосными. Была получена зависимость напряжённости электрического пробоя от толщины ДЭ H :

$$E_{\text{пр}} = 51H^{-0,25} \lambda^{1,13}. \quad (4)$$

Однако неизвестно, как растяжение и конфигурация электродов влияют на физические и электрические свойства актуатора.

В работе [11] рассмотрены образцы с разной толщиной, было показано, что чем тоньше ДЭ, тем больше перемещение актуатора на его основе под действием электрического поля. Однако при толщинах 0,10 и 0,05 мм пробой изоляции происходил при низких напряжениях (4 кВ и менее), а при толщинах 0,25 мм произошёл пробой изоляции при напряжении 10 кВ. Показано, что важными факторами актуатора на основе ДЭ являются толщина, модуль упругости и диэлектрическая проницаемость эластомера.

Для достижения более высокой грузоподъёмности и высоких деформаций можно использовать многослойные конструкции актуаторов на основе ДЭ [8; 12].

Значительное влияние на деформацию актуатора на основе ДЭ оказывают тип и свойства электродов. Они должны быть достаточно податливыми и растяжимыми, чтобы не повышать жёсткость ДЭ. Они должны выдерживать большие деформации, сохраняя при этом свою проводимость в течение множества повторяемых циклов. В работах [8; 13] рассмотрены различные типы применяемых электродов для актуаторов на основе ДЭ. Наиболее часто используемыми электродами являются материалы на основе углерода, такие как углеродная смазка и углеродный порошок, из-за их простоты нанесения и относительно низкой себестоимости. Однако углеродная смазка сложна в обработке и недолговечна из-за возможности отрыва проводящих частиц от эластомера, такие электроды не в состоянии полностью покрыть поверхность образца без образования пустых пространств в проводящем слое, а порошок имеет плохую растяжимость.

Перспективными являются металлические тонкие плёнки, они могут быть сформированы с использованием стандартных процессов микрообработки, имеют очень низкое поверхностное сопротивление и хорошую адгезию к эластомеру. Однако они менее податливы, чем альтернативные варианты на основе углерода, и могут иметь ограничения из-за повышенной жёсткости конструкции.

Наиболее доступными и простыми в плане реализации являются листовые металлические электроды, которые по сравнению с тонкоплёночными электродами повышают жёсткость конструкции, однако имеют более высокую проводимость.

Целью работы является сравнение влияния двух типов электродов и толщины ДЭ на величину перемещений актуатора под действием электрического поля.

Исследуемые образцы актуаторов

Для исследования влияния толщины слоя ДЭ, а также типов электродов на деформацию актуатора на основе ДЭ в лаборатории кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана были изготовлены образцы. В качестве упругой матрицы был выбран силиконовый компаунд СИЭЛ 159-322А, а для увеличения деформации актуатора за счёт повышения диэлектрической проницаемости использовался высокодиэлектрический наполнитель – порошок титаната бария марки ТБК-1 ТУ 20.59.59-057-48591565-2018Т.

Изготовление ДЭ происходило в три этапа: 1) смешивание всех компонентов в мерной ёмкости (с массовым отношением компаунда к наполнителю 1:1); 2) обезгаживание смеси в течение 20 минут при нормальной температуре; 3) полимеризация эластомера в печи при температуре 150°C в течение 40 минут с использованием разъёмной алюминиевой формы, полость которой определяет размеры ДЭ.

Были изготовлены эластомеры толщиной 1,0 и 0,2 мм. На основе обоих образцов изготовлены актуаторы с медными жёсткими листовыми электродами и с тонкоплёночными медными электродами. Диаметр вырезанных эластомеров 35 мм, диаметр электродов 32 мм.

Жёсткие электроды вырезались из медного листа толщиной 0,5 мм. Соединение с ДЭ происходило с помощью тонкого слоя силиконового компаунда и полимеризации его в печи в течение 40 минут при температуре 150°C.

Тонкоплёночные электроды толщиной 370 нм наносились на аналогичные ДЭ с двух сторон методом магнетронного распыления с предварительной ионной обработкой для повышения адгезионных свойств в едином вакуумном цикле.

Для фиксирования конструкции, удобства подвода контактов, изоляции и удобства измерения деформации, с обеих сторон осуществлялось клеевое соединение с оснасткой из поливинилхлорида, осуществляемое механическим способом. Модель такой конструкции представлена на рис. 2.

Выдержка для фиксации клеевого соединения составляла один час. Провода с электродами соединялись с помощью токопроводящего клея на основе серебра, время сушки которого при комнатной температуре составляло 24 часа. Было получено 4 образца с варьируемыми параметрами толщины и типом электродов. С помощью изолирующей оснастки удалось зафиксировать актуаторы для удобства измерений, однако клеевые слои вносят неравномерность толщины в конструкцию устройств.

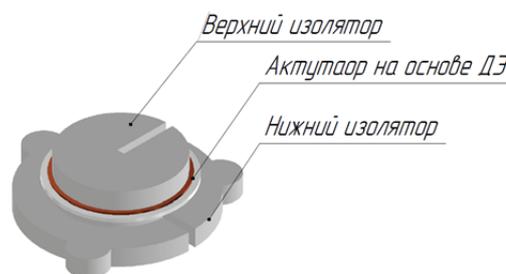


Рис. 2. Модель изготавливаемого актуатора на основе диэлектрического эластомера

Исследовательское оборудование

С помощью лабораторного стенда на кафедре МТ11 было проведено измерение перемещения изготовленных актуаторов на основе ДЭ. Стенд, схема которого представлена на рис. 3, располагался на антивибрационном столе. На каждый из образцов с высоковольтного блока питания (ВВБП) на 6 кВ подавалось напряжение от 0 до 3 кВ. С помощью цифрового вольтметра и делителя напряжений (ДН) осуществлялся контроль подаваемого напряжения. Перемещение актуатора считывалось в моменты медленного увеличения напряжения с помощью измерительной системы, состоящей из емкостного датчика высокого разрешения 10 нм, блока питания (БПДП), блока управления (БУДП) и персонального компьютера (ПК).

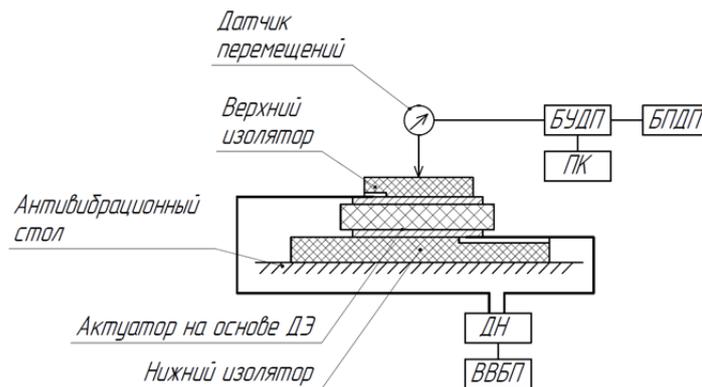


Рис. 3. Схема измерения перемещения актуаторов под действием электрического поля

Результаты исследования

В результате проведенных исследований были получены графики перемещения изготовленных актуаторов под действием электрического поля.

На рис. 4 представлен график перемещения актуатора на основе ДЭ толщиной 0,2 мм с жесткими медными электродами. Максимальное перемещение актуатора составило 2,35 мкм, относительная деформация 1,175%.

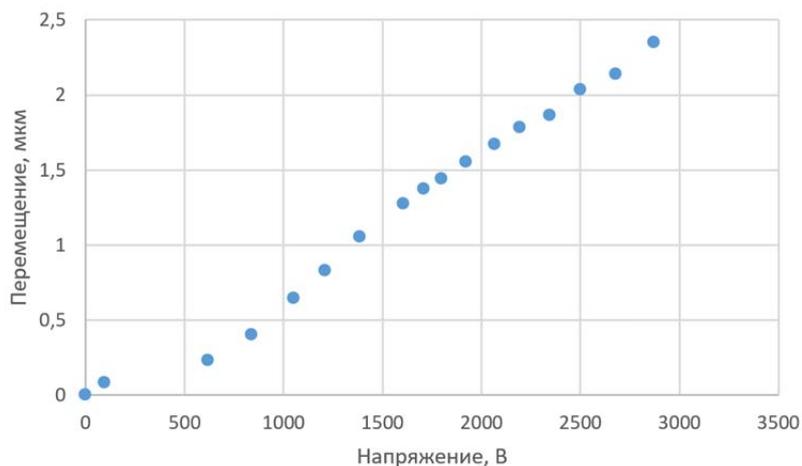


Рис. 4. Зависимость деформации под действием электрического тока от подаваемого напряжения для актуатора с жесткими электродами и диэлектрическим эластомером толщиной 0,2 мм

На рис. 5 представлен график перемещения актуатора на основе ДЭ толщиной 0,2 мм с тонкоплёночными медными электродами. Максимальное перемещение актуатора составило 1,4 мкм, относительная деформация 0,7%.

Максимальное перемещение при 3 кВ у образцов на основе ДЭ толщиной 0,2 мм с жёсткими электродами в 1,7 раза больше, чем с тонкоплёночными электродами.

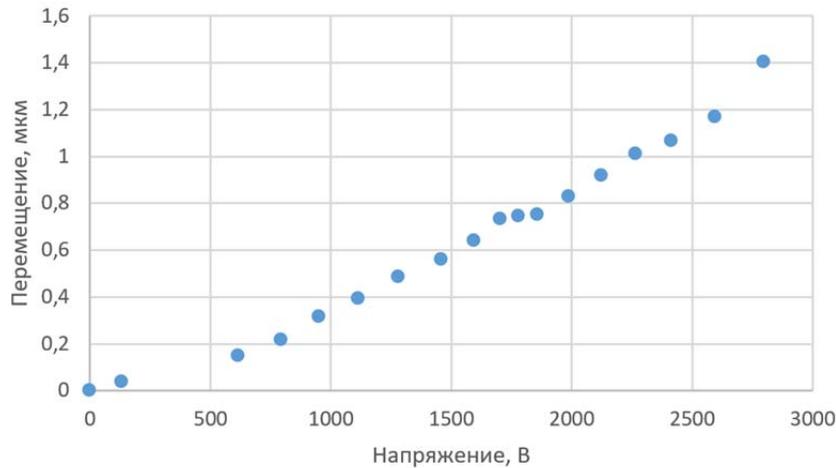


Рис. 5. Зависимость деформации под действием электрического тока от подаваемого напряжения для актуатора с тонкоплёночными электродами и диэлектрическим эластомером толщиной 0,2 мм

На рис. 6 показано перемещение актуатора на основе ДЭ толщиной 1 мм с тонкоплёночными медными электродами. Максимальное перемещение составило 3,8 мкм, относительная деформация 0,38%.

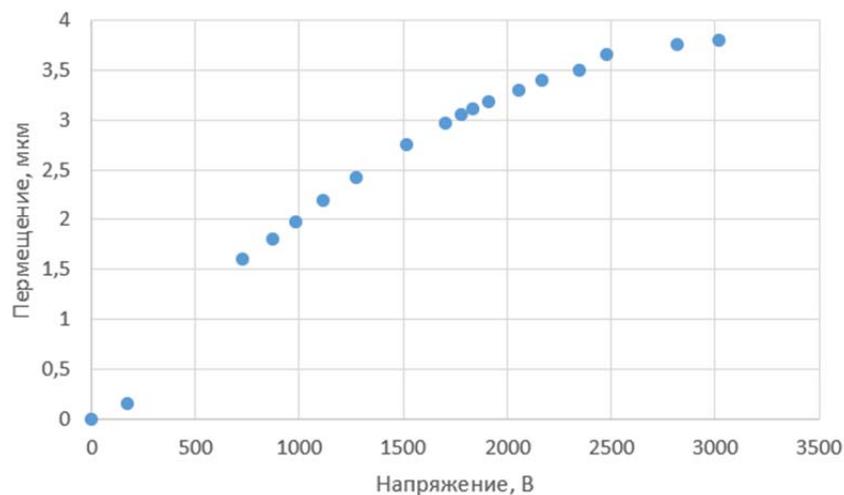


Рис. 6. Зависимость деформации под действием электрического тока от подаваемого напряжения для актуатора с тонкоплёночными электродами и диэлектрического эластомера толщиной 1 мм

На рис. 7 показано перемещение актуатора на основе ДЭ толщиной 1 мм с жёсткими медными электродами. Максимальное перемещение составило 6,55 мкм, относительная деформация 0,655%.

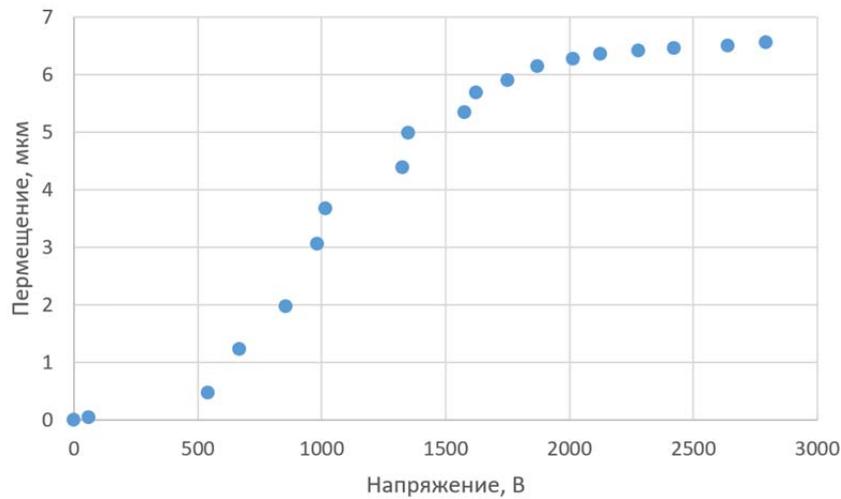


Рис. 7. Зависимость деформации под действием электрического тока от подаваемого напряжения для актуатора с жёсткими электродами и диэлектрического эластомера толщиной 1 мм

Максимальное перемещение при 3 кВ у образцов на основе ДЭ толщиной 1 мм с жёсткими электродами в 1,7 раза больше, чем с тонкоплёночными электродами.

Перемещение актуаторов при напряжении 3 кВ у образцов с толщиной ДЭ 1 мм больше, чем у образцов толщиной ДЭ 0,2 мм, а относительная деформация, наоборот, меньше.

Причиной меньшего перемещения актуаторов с тонкоплёночными электродами по сравнению с актуаторами с жёсткими электродами могут являться разрывы на тонкой медной плёнке, образованные за счёт впадин и трещин на поверхности ДЭ. Рекомендуется увеличить толщину наносимых тонкоплёночных электродов, чтобы обеспечить заполнение разницы топологии ДЭ между впадинами и выпуклостями.

Заключение

Перспективным аналогом пьезоэлектриков, способным повысить виброзащитные свойства механизмов микро- и наноперемещений, является диэлектрический эластомер. Он обладает упругими свойствами, высоким быстродействием и обеспечивает широкий диапазон перемещений.

Анализ результатов проведённых исследований показал, что основными параметрами, влияющими на перемещения актуатора на основе диэлектрического эластомера, являются материалы, конструкция и геометрические размеры компонентов устройства, в том числе толщина эластомера. С помощью состава диэлектрического эластомера контролируется диэлектрическая проницаемость и упругость материала, а с помощью электродов и геометрии – электростатические свойства и жёсткость актуатора.

Отработка экспериментальной технологии изготовления актуаторов на основе диэлектрического эластомера выявила сложность контроля равномерности толщины клеевого слоя соединений актуатора с верхним и нижним изоляторами. Кроме того, выявлена сложность контроля толщины силиконовых клеевых соединений жёстких ли-

стовых электродов с эластомером, а также повторяемой реализации этих соединений без возникновения воздушных пространств внутри них.

Экспериментальные исследования перемещения актуаторов на основе диэлектрического эластомера показали, что перемещение актуаторов на основе эластомера толщиной 1 мм больше, чем у актуаторов на основе эластомера толщиной 0,2 мм в 2,7 раза для обоих типов электродов. Однако относительная деформация почти в 2 раза увеличивается у образцов с обоими типами электродов при увеличении толщины, что соответствует исследованиям других авторов. Основными причинами могут являться увеличение жёсткости диэлектрического эластомера и напряжённости электрического поля с уменьшением толщины эластомера.

Максимальное перемещение при напряжении 3 кВ у актуаторов с жёсткими медными электродами в 1,7 раз больше, чем у актуаторов с тонкоплёночными электродами. Основной причиной может являться наличие разрывов и несплошности тонкой плёнки, вызванные микронеровностями поверхности эластомера и, как результат, неравномерным распределением потенциала по поверхности образцов.

Библиографический список

1. Spanner K., Koc B. Piezoelectric motors, an overview // *Actuators*. 2016. V. 5, Iss. 1. DOI: 10.3390/act5010006
2. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
3. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2017. 134 с.
4. Bar-Cohen Y., Anderson I.A. Electroactive polymer (EAP) actuators – background review // *Mechanics of Soft Materials*. 2019. V. 1. DOI: 10.1007/s42558-019-0005-1
5. Кузнецов Н.М., Банин Е.Е., Крупнин А.Е., Крашенинников С.В., Вдовиченко А.Ю., Чвалун С.Н. Влияние наполнителя на деформацию полидиметилсилоксановых композитов под действием электрического поля // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*. 2022. № 6 (105). С. 123-143. DOI: 10.18698/1812-3368-2022-6-123-143
6. Zhao Y., Yin L.-J., Zhong S.-L., Zha J.-W., Dang Z.-M. Review of dielectric elastomers for actuators, generators and sensors // *IET Nanodielectrics*. 2020. V. 3, Iss. 4. P. 99-106. DOI: 10.1049/iet-nde.2019.0045
7. Hajiesmaili E., Clarke D.R. Dielectric elastomer actuators // *Journal of Applied Physics*. 2021. V. 129, Iss. 15. DOI: 10.1063/5.0043959
8. Hodgins M., Seelecke S. Systematic experimental study of pure shear type dielectric elastomer membranes with different electrode and film thicknesses // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25, Iss. 9. DOI: 10.1088/0964-1726/25/9/095001
9. Leng J., Liu L., Liu Y., Yu K., Sun S. Electromechanical stability of dielectric elastomer // *Applied Physics letters*. 2009. V. 94, Iss. 21. DOI: 10.1063/1.3138153
10. Li B., Lin Z.-J., Ryu S.-R., Lee D.-J. Effects of thickness, elastomer types and thinner content on actuation performance of electro active dielectric elastomers // *Composites Research*. 2014. V. 27, Iss. 1. P. 25-30. DOI: 10.7234/composres.2014.27.1.025
11. Абрамов И.В., Федоров Е.М., Волосков С.Н. Моделирование многослойных пакетных пьезоактуаторов // *Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2017. Интеграция науки,*

образования и производства» (22-24 ноября 2017 г., Ижевск). Ижевск: Изд-во ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова, 2018. С. 702-710.

12. Huang J., Shian S., Diebold R.M., Suo Z., Clarke D.R. The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer // *Applied Physics Letter*. 2012. V. 101, Iss. 12. DOI: 10.1063/1.4754549

13. Rosset S., Shea H.R. Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators // *Applied Physics A*. 2013. V. 110, Iss. 2. P. 281-307. DOI: 10.1007/s00339-012-7402-8

RESEARCH OF DIELECTRIC ELASTOMER ACTUATOR PARAMETERS FOR AN ACTIVE VIBRATION INSULATION SYSTEM

© 2025

- A. M. Bazinenkov** Candidate of Science (Engineering); Associate Professor;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
bazinenkov@bmstu.ru
- V. S. Shcherbakova** Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
viktoria.sherbakova97@gmail.com
- S. V. Sidorova** Candidate of Science (Engineering); Associate Professor;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
sidorova_bmstu@mail.ru
- A. D. Kuptsov** Engineer;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
alex-kuptsov@bmstu.ru
- A. A. Felde** Student;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;
feldeaa@student.bmstu.ru

One of the ways of improving the characteristics of technological and analytical equipment is an application of “smart” materials, among which dielectric elastomers are promising due to their low elastic modulus and its high effect of internal vibration protection. The article focuses on a theoretical analysis of the studied materials and identifies the key parameters that influence the dielectric elastomer actuator’s deformation, including the manufacturing technology, geometric parameters and composition of dielectric elastomers. A manufacturing technology of dielectric elastomer actuators was developed successfully. Samples with different thicknesses of the dielectric layer were made by the research group. The results of the research suggest dependence of deformation on the effective layer thickness.

Vibroinsulation; dielectric elastomer; actuator; deformation; vacuum; thin film coating

Citation: Bazinenkov A.M., Shcherbakova V.S., Sidorova S.V., Kuptsov A.D., Felde A.A. Research of dielectric elastomer actuator parameters for an active vibration insulation system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 98-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-98-108

References

1. Spanner K., Koc B. Piezoelectric motors, an overview. *Actuators*. 2016. V. 5, Iss. 1. DOI: 10.3390/act5010006
2. Panich A.E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory: ucheb. posobie* [Piezoceramic actuators: tutorial]. Rostov-on-Don: Southern Federal University Publ., 2008. 159 p.
3. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V., Karev P.V. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy: ucheb. posobie* [Actuating devices and systems for micro-displacements: tutorial]. SPb: ITMO University Publ., 2017. 134 p.

4. Bar-Cohen Y., Anderson I.A. Electroactive polymer (EAP) actuators – background review. *Mechanics of Soft Materials*. 2019. V. 1. DOI: 10.1007/s42558-019-0005-1
5. Kuznetsov N.M., Banin E.E., Krupnin A.E., Krashennnikov S.V., Vdovichenko A.Yu., Chvalun S.N. Effect of filler on the deformation of polydimethylsiloxane composites under an electric field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2022. No. 6 (105). P. 123-143. (In Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2022-6-123-143
6. Zhao Y., Yin L.-J., Zhong S.-L., Zha J.-W., Dang Z.-M. Review of dielectric elastomers for actuators, generators and sensors. *IET Nanodielectrics*. 2020. V. 3, Iss. 4. P. 99-106. DOI: 10.1049/iet-nde.2019.0045
7. Hajiesmaili E., Clarke D.R. Dielectric elastomer actuators. *Journal of Applied Physics*. 2021. V. 129, Iss. 15. DOI: 10.1063/5.0043959
8. Hodgins M., Seelecke S. Systematic experimental study of pure shear type dielectric elastomer membranes with different electrode and film thicknesses. *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25, Iss. 9. DOI: 10.1088/0964-1726/25/9/095001
9. Leng J., Liu L., Liu Y., Yu K., Sun S. Electromechanical stability of dielectric elastomer. *Applied Physics Letters*. 2009. V. 94, Iss. 21. DOI: 10.1063/1.3138153
10. Li B., Lin Z.-J., Ryu S.-R., Lee D.-J. Effects of thickness, elastomer types and thinner content on actuation performance of electro active dielectric elastomers. *Composites Research*. 2014. V. 27, Iss. 1. P. 25-30. DOI: 10.7234/composres.2014.27.1.025
11. Abramov I.V., Fedorov E.M., Voloskov S.N. Modelling of multilayered package piezoactuators. *Sbornik Materialov XIII Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Priborostroenie v XXI Veke - 2017. Integratsiya Nauki, Obrazovaniya i Proizvodstva» (November, 22-24, 2017, Izhevsk)*. Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2017. P. 702-710. (In Russ.)
12. Huang J., Shian S., Diebold R.M., Suo Z., Clarke D.R. The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer. *Applied Physics Letter*. 2012. V. 101, Iss. 12. DOI: 10.1063/1.4754549
13. Rosset S., Shea H.R. Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators. *Applied Physics A*. 2013. V. 110, Iss. 2. P. 281-307. DOI: 10.1007/s00339-012-7402-8