

# ЕМКОСТНЫЕ МИКРОДИНАМИКИ НА DE-ОСНОВЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ЗВУКОВОГО СИГНАЛА

**Валяев В.В.<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Валяев Владислав Васильевич – студент пятого курса факультета  
информационных технологий и электроники Пензенского Государственного  
Университета*

*г. Пенза, Российская Федерация*

**Аннотация:** кремний является наиболее используемым материалом в микроэлектромеханических системах, из-за превосходных механических свойств. Но он имеет низкую производительность для создания слышимого звука емкостными микро-динамиками. В данной статье исследуется способность диэлектрического эластомерного материала способного генерировать направленный звук в режиме слуха человека. Диэлектрические эластомеры-это отрасль интеллектуальных материалов с высокими желательными и практическими характеристиками, такими как большая деформация, энергоэффективность, легкий вес, биосовместимость и быстрая реакция, которые имеют общие характеристики изменения их формы под действием приложенного электрического напряжения или заряда.

**Ключевые слова:** диэлектрические эластомеры, уровень звукового давления, диаграмма направленности, панель Бесселя, микро-динамик.

## DE-BASED CAPACITIVE MICRO-SPEAKERS FOR GENERATING DIRECTIONAL AUDIBLE SOUND

**Valyaev V.V.<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Valyaev Vladislav Vasilyevich – fifth year student of the Faculty of Information  
Technologies and Electronics of Penza State University  
Penza, Russian Federation*

**Abstract:** silicon is the most commonly used material in microelectromechanical systems, due to its excellent mechanical properties. But it has poor performance for creating audible sound by capacitive micro-speakers. This article examines the ability of a dielectric elastomeric material capable of generating directional sound in human

*hearing mode. Dielectric elastomers are a branch of intelligent materials with high desirable and practical characteristics, such as large deformation, energy efficiency, light weight, biocompatibility, and fast response, which share the characteristics of changing their shape under the action of an applied electrical voltage or charge.*

**Keywords:** *dielectric elastomers, sound pressure level, radiation pattern, Bessel panel, micro-speaker.*

**УДК 62-768**

Обычно ожидается, что применение интеллектуальных технологий приведет к более высокой совместимости между входными и выходными данными систем. Таким образом, растущее внимание технологий к миниатюризации систем, а также к повышению их производительности привело к расширению использования новых типов материалов, которые способны реагировать на определенное воздействие путем изменения их химических или физических свойств [1]. В последние годы SRM имеют широкий спектр потенциальных применений, от функциональных нанокompозитов до контролируемой доставки лекарств.

Существует растущая отрасль интеллектуальных материалов, которая признана диэлектрическими эластомерами. Они относятся к группе электроактивных полимеров. ЭАП-это полимеры, типичные характерные свойства которых включают большую активную деформируемость, быструю реакцию, низкую плотность и повышенную упругость. Другими словами, когда ВП приводятся в действие сильным электрическим полем, его реакция на стимул представляет собой изменение формы и размера в ответ на электрическое поле. Они чрезвычайно легкие, недорогие, устойчивые к разрушению и совместимые [2]. Исследования этого типа материалов показывают, что их наиболее распространенное применение в исполнительных механизмах и датчиках. Интерес научного общества к ЭАП обусловлен их большими возможностями деформации, низкой плотностью и разумным давлением срабатывания на выходе, что придает им свойства, аналогичные свойствам естественных мышц. ЭАП можно разделить на две группы в зависимости от их работы: ионные и

электронные ЭАП. Электронные ЭАП приводятся в действие сильными электрическими полями, которые приводят к большой деформации или изменению формы материала. Они являются известны как плоские приводы из-за их больших деформаций в плоскости. Обычно им требуется очень высокое напряжение активации в диапазоне нескольких киловольт. Обширные исследования показали, что это маломощные приводы с идеальной плотностью энергии, их реакция на стимул относительно быстрая, они обладают свойствами быть чрезвычайно гибкими, легкими, тонкими, прозрачными и могут быть спроектированы для любого размера или формы, следовательно, они могут быть использованы в качестве подходящей альтернативы в инновациях приводов. ДЭ в качестве исполнительного механизма способен преобразовывать электрическую энергию в большие механические деформации. Совместимые электроды играют важную роль в их работе. Их стандартная конфигурация (их начальное состояние) включает центральный эластомер, который зажат между двумя совместимыми электродами. Когда центральный эластомер приводимый в действие сильным электрическим полем между электродами, его ответом на стимул является электромеханическое давление, которое сжимает композитную структуру в направлении ее толщины. Поскольку эластомеры сохраняют свой объем постоянным во время деформации (коэффициент Пуассона близок к 0,5), осевые и поперечные деформации могут быть видны во время электромеханического давления [3]. Это расширение в плоскости используется для создания движения или сил в приводах DE. DEs положительно влияет на ряд исполнительных устройств, таких как мобильные мини-и микророботы, контроль вибрации, микронасосы и микроклапаны, микро-воздушные транспортные средства, сбор энергии, дисководы, датчики, протезные устройства и плоские громкоговорители (акустика).

С другой стороны, быстрый рост технологий в мультимедийных и электронных устройствах требует небольших динамиков, которые генерируют высококачественные звуковые волны. В связи с быстрым ростом ощущается потребность в новых и интеллектуальных материалах для увеличения

использования и производительности микро-динамиков. Для обеспечения слышимости человека идеальный динамик или наушники должны генерировать постоянный уровень звукового давления (SPL) в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц [4]. В последние годы возрос интерес к использованию сплавов с памятью формы – сплавов, которые меняют фазу при нагреве или охлаждении и могут деформироваться из – за разницы в расположении кристаллов в мартенситной и аустенитной фазах (SMA-приводы). Они обладают несколькими положительными характеристиками, такими как большая сила приведения в действие, высокая плотность работы и механическая надежность. Несмотря на это, в настоящее время хорошо установлено, что электромагнитные громкоговорители Movingcoil обладают сложностью изготовления, потребностью в тепле, плохой реакцией и низкой эффективностью [5].

За последнее столетие произошел резкий рост технологий MEMS, особенно с движущимися частями. Технология MEMS создает микроразмерные структуры, которые включают в себя комбинацию миниатюрных механических структур с электронными. В мире миниатюрного оборудования возможности MEMS использовались для производства крошечного оборудования, такого как датчики, приводы, динамики, микрофоны, камеры и т.д. [5]. Важной мотивацией в использовании технологии MEMS для создания новых типов громкоговорителей и преобразователей являются их небольшие размеры и низкое энергопотребление на слуховых аппаратах или электроакустических преобразователях.

Как известно, кремний является наиболее доминирующим материалом, используемым в MEMS. Он обладает очень отличными механическими свойствами, которые побуждают исследователей сосредоточиться о микроструктурах на основе кремния. Но в случае динамиков, из-за его высокой твердости и плотности, он не показал желаемой производительности, и поэтому более мягкие материалы, такие как DEs, могут быть хорошей альтернативой для них.

Если громкоговорители стимулируются переменным напряжением, звуковые волны распространяются во всех направлениях. Можно сказать, что они имеют меньший механический импеданс и их диафрагмы способны достигать больших перемещений. Их механизмы деформации аналогичны монополярным источникам и имеют лучшие характеристики направленности, чем традиционные громкоговорители. Смещение их диафрагм определяется законом давления Максвелла, и, следовательно, они принципиально нелинейны [6]. Некоторые из основных преимуществ динамиков DE сводятся к следующему: они могут быть выполнены в самых разнообразных формах, могут быть плоскими, как отдельно стоящие или настенные электростатические динамики, но они также могут легко соответствовать произвольно изогнутым поверхностям; амплитуды колебаний у них значительно больше, чем у обычных электростатических громкоговорителей; потенциально полезны как в качестве недорогих недорогих громкоговорителей, так и в качестве подходящих динамиков для создания высококачественного звука.

В последние несколько десятилетий направленные громкоговорители значительно расширились из-за необходимости контроля мощности звука и структуры излучения в личных сообщениях, звонках, автомобильных развлечениях, играх, кинозалах, театральных залах, стадионах и даже военных объектах. Направленные громкоговорители быстро становятся ключевым инструментом в мировых аудионосителях. Структурно-акустические характеристики направленного громкоговорителя приводят к тому, что звуковые волны направляются только в определенном или желаемом направлении [7]. Другими словами, направленный громкоговоритель создает частную или личную зону прослушивания (персонализированный звук) для целевой аудитории. Естественно, большой громкоговоритель может производить более направленную звуковую волну из-за своих больших диафрагм, в то время как с массивом небольших громкоговорителей он может получить эквивалентную направленность в качестве большого громкоговорителя. Более направленный луч громкоговорителя или решетки зависит от определенных факторов,

например, от максимизации радиуса поршня и/или минимизации длины волны. Применение массива громкоговорителей приводит к достижению направленного луча, когда его размер значительно превышает длину волны звука (т. е. более метра в диаметре) на низких частотах менее 200 Гц [8].

Схематическое изображение микродинамика с электростатическим приводом и эластичной круглой микропластиной, подвешенной над неподвижной проводящей пластиной, показано на рис.1. Фактически, он демонстрирует один из монополярных источников в массиве панелей Бесселя.

Изоляционный материал, такой как воздух, обычно помещается в свободное пространство между параллельными двухпластинчатыми конденсаторами. Подвижная круглая микропластина состоит из диэлектрической эластомерной пленки, зажатой между двумя совместимыми электродами (сверху и снизу), и приложенного между ними электрического напряжения (диэлектрического напряжения) [9].

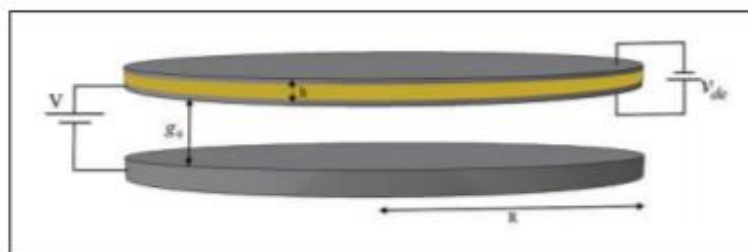


Рисунок 1. Схематический вид круглой микропластинки с электростатическим приводом

Приложенное диэлектрическое напряжение на верхней пластине обеспечивает электростатическое напряжение на эластомерной пленке за счет эффекта электромеханической связи.

Деформация микропластинки под действием электростатической нагрузки состоит из двух частей: статического прогиба и небольших колебаний вокруг нее. Первый из них вызван напряжением смещения постоянного тока, а второй – возбуждением переменного напряжения [10].

Чтобы иметь мощные микродинамики с хорошим акустическим качеством, важно определить физику звукового в качестве источников звука. Звуковой излучатель преобразует электрический сигнал в звук. Для лучшего понимания звукового излучения и получения уравнения его акустического давления от упругой круглой микропластинки в пространстве он рассматривается как поршень со средним радиусом  $R$  в стенке бесконечной протяженности (полупространство). Излучаемый звук от упомянутого поршня излучается только в акустическом поршне, который движется с равномерной (одинаковой) скоростью. Благодаря использованию принципов механики сплошных сред, если акустическая поверхность поршня разделена на бесконечно малые элементы, каждый из элементов действует как прямой излучатель [11]. Затем, объединяя излучаемый звук от каждого из элементов путем интегрирования, чтобы получить значение для каждой конкретной точки в пространстве, получают полное давление акустического поршня. Цель этой комбинации состоит в том, чтобы рассчитать формулу звукового давления.

Соотношение давления состоит из двух частей; первая часть включает такие компоненты, как амплитуда скорости поршня, размер поршня и расстояние от источника. Вторая часть - это функция направленности поршня, которая является производной от первого типа функции Бесселя [13]. Функция направления звука имеет несколько нулей. Поведение направленности звука или диаграммы направленности излучения в различных поршнях зависит от отношения размера радиуса к длине волны.

Идеальный динамик или наушники должны генерировать постоянный уровень звукового давления в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. Большие динамики имеют широкую диафрагму, которая своим движением создает высокие уровни звукового давления, что приводит к серьезным искажениям звука, а также их производство чрезвычайно дорогое [14]. Таким образом, компоновка динамиков, такая как массив микродинамиков, может излучаться с одинаковой суммарной мощностью несколькими микродинамиками. Одним из

способов повышения приемлемого уровня звукового давления является использование массива панелей Бесселя.

Массив панелей Бесселя можно рассматривать как квадратную матричную форму, которая имеет количество ячеек (битов). Строки и столбцы квадратной матрицы имеют одинаковую длину и ширину и расположены в одной плоской плоскости. Каждый бит состоит из одного и того же звукового преобразователя (излучателя). Расположенные радиаторы на Массиве панелей Бесселя имеют равное расстояние друг от друга (в строке или столбце), которые могут производить радиально распределенный звук, так что угловое распространение звука напоминает распространение от одного динамика. Массив динамиков также имеет тенденцию концентрировать звуковые лучи в пучок на более высоких частотах и не с другой стороны, ширина луча становится тоньше. Одним из преимуществ централизации звукового луча в луч (функция направленности) является снижение потребления энергии в нежелательных направлениях и возможность направлять звуковую энергию в то место, где она необходима, а именно в зону аудитории [15].

SPL, генерируемый динамиком на основе DE, значительно выше, чем динамик на основе кремния. Таким образом, можно сделать вывод, что материал DE может быть лучшим выбором для создания более высоких звуков с помощью микродинамиков.

Ожидается, что увеличение приложенного диэлектрического напряжения приводит к увеличению SPL. При подаче 30В в качестве диэлектрического напряжения SPL увеличивается по мере увеличения частоты возбуждения колебаний.

Чем выше диэлектрическая проницаемость, тем выше амплитуда, которая является желательным фактором для генерации более высокого звука SPL. Это связано с уменьшением общей жесткости системы под действием силы сжатия, вызванной эластомером.

Стоит отметить, что для повышения диэлектрической проницаемости полимера 38% титаната цирконата свинца (PZT) может быть добавлен к



полимеру, а затем диэлектрическая проницаемость DE может быть увеличена до 30,1 (модуль Юнга может измениться) [16]. Более высокая диэлектрическая проницаемость DE приводит к более высокой амплитуде срабатывания. Ясно, что по мере увеличения амплитуды колебаний производимый SPL будет увеличиваться.

Подходящий SPL (в диапазоне человеческого слуха) и диаграмма направленности могут быть достигнуты с помощью большой диафрагмы. Другими словами, больший радиус получает более высокую скорость SPL и диаграмму направленности, чем меньший радиус, и нарушает большой объем воздуха, что приводит к значительному звуку, который излучается через электроды [16]. Стоит отметить, что подходящая картина SPL и направленности достигается за счет увеличения виртуального радиуса поршня, но, с другой стороны, площадь панели Бесселя чрезвычайно увеличилась.

Наблюдается, что, если расстояние между элементами является постоянной величиной, а частота возбуждения и количество элементов увеличиваются, значение SPL увеличивается. Допустимая величина для отношения  $d = k$  может быть меньше или равна  $1/2$ , и в этом состоянии основной лепесток существует в видимом пространстве, без каких-либо других лепестков решетки. С переходом соотношения от  $1/2$  вторичные лепестки появляются шаг за шагом. Увеличение расстояния между элементами приводит к увеличению площади панели Бесселя. Кроме того, это приводит к личной зоне прослушивания, которая происходит на большом расстоянии от источников [17].

Емкостные микрошпикеры на основе DE могут генерировать желаемый направленный звук в режиме человеческого слуха и поэтому могут быть хорошей альтернативой для динамиков на основе кремния, предлагая меньший размер матрицы Бесселя [17]. Производительность динамика сильно зависела от частот возбуждения, радиусов диафрагмы, количество элементов в Панели Бесселя и межэлементного расстояния. Другими словами, результаты показали, что увеличение частот возбуждения оказывает значительное влияние на направленность и SPL, независимо от основных ограничений этого исследования

в отношении диапазона слышимых частот, но более высокие частоты возбуждения могут быть применены для применения ультразвука в био-MEMS. Большой радиус дает более высокую скорость SPL и диаграмму направленности, чем меньший радиус, и нарушает большой объем воздуха. Другими словами, небольшой виртуальный поршень или массив не позволяли эффективно использовать SPL и направление на целевую аудиторию (закрытую зону прослушивания). Следует отметить, что увеличение значения радиуса диафрагмы приводит к увеличению размера панели Бесселя, что может оказаться невозможным для использования в миниатюрных устройствах. Диаграмма направленности все больше увеличивалась с увеличением отношения  $d = k$ , в то время как звуковой канал имеет резкое снижение эффективного значения SPL. Этот подход окажется полезным для расширения нашего понимания того, как можно создавать направленные звуковые волны в слышимом человеком диапазоне.

#### *Список литературы*

1. Feng C, Jiang L and Lau WM. Dynamic characteristics of a dielectric elastomer-based microbeam resonator with small vibration amplitude. J Micromech Microeng 2011;
2. Zhao Y, Thorkelsson K, Mastroianni AJ, et al. Smallmolecule-directed nanoparticle assembly towards stimuli-responsive nanocomposites. Nat Mater 2009;
3. Hsu L, Weder C and Rowan SJ. Stimuli-responsive, mechanically-adaptive polymer nanocomposites. J Mater Chem 2011; 2812–2822;
4. Bar-Cohen and Yoseph. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges. Bellingham, WA: SPIE Press, 2004;
5. Bar-Cohen Y. Artificial muscles using electroactive polymers (EAP): capabilities, challenges and potential. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2005;
6. Wang T, Farajollahi M, Choi YS, et al. Electroactive polymers for sensing. Interf Focus 2016;
7. Shahinpoor M. Ionic polymer metal composites (IPMCs): smart multi-functional materials and artificial muscles. London, UK: Royal Society of Chemistry, 2015;
8. Kretzer M. Towards a new softness: the aesthetics of soft dielectric electroactive polymers and their application in an architectural context. In: International adaptive architecture conference, London, 3-5 March 2011;

9. Axel R. Smart materials in architecture, interior architecture and design. Basel: Birkhauser, 2007;
10. Chuc NH, Vuong NHL, Kim DS, et al. Fabrication and control of rectilinear artificial muscle actuator. *IEEE/ASME Transac Mechatron* 2010; 167–176;
11. Wissler M and Mazza E. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers. *Sensors Actuat A* 2005; 184–192;
12. Carpi F, De Rossi D, Kornbluh R, et al. Dielectric elastomers as electromechanical transducers: fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology. Amsterdam: Elsevier, 2011;
13. Pumphrey R. Upper limit of frequency for human hearing. *Nature* 1950;
14. Ali MM and Takahata K. Wireless microfluidic control with integrated shape-memory-alloy actuators operated by field frequency modulation. *J Micromech Microeng* 2011;
15. Heydt R, Kornbluh R, Eckerle J, et al. Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers. In: *Smart structures and materials: electroactive polymer actuators and devices (EAPAD)*, 2006, p. 61681M. Bellingham, WA: International Society for Optics and Photonics. [Electronic resource] – URL: <https://doi.org/10.1117/12.659700> (Date of the application: 11.06.2021).
16. Batra R, Porfiri M and Spinello D. Review of modeling electrostatically actuated microelectromechanical systems. *Smart Mater Struct* 2007;
17. Lin W-H and Zhao Y-P. Pull-in instability of microswitch actuators: model review. *Int J Nonlin Sci Numer Simul* 2008; 175–184.