
ВОПРОСЫ РОБОТОТЕХНИКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621

ПРИЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИМОРФНЫХ СЕНСОРОВ И АКТЮАТОРОВ

Статья поступила в редакцию 13.06.2014, в окончательном варианте 02.12.2014.

Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, Астраханский инженерно-строительный институт, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, e-mail: Irapet1949@gmail.com

Евдошенко Олег Игоревич, аспирант, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: Goronet@list.ru

Зарипова Виктория Мадияровна, кандидат технических наук, доцент, Астраханский инженерно-строительный институт, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, e-mail: vtempus2@gmail.com

Гурская Татьяна Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: gursk@aspu.ru

В статье кратко описаны состояние и перспективы развития современного рынка пьезоэлектрических устройств. Приведены основные конструктивные особенности биморфных пьезоэлектрических элементов. Проведен анализ современной технической литературы и патентной документации. Представлены результаты исследования патентной активности по биморфным пьезоэлементам для пяти ведущих стран в этой области (США, Япония, Германия, Франция, Россия). Цель работы – исследование патентной активности в области пьезоэлектрических устройств и выявление обобщенных приемов улучшения их эксплуатационных характеристик. Разработана классификация конструктивных приемов совершенствования для трех основных эксплуатационных характеристик биморфных элементов – чувствительность, механическая прочность и диапазон выходной величины. По результатам анализа определены наиболее часто встречающиеся приемы, позволяющие одновременно улучшать несколько эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: пьезоэлементы, биморфные элементы, эксплуатационные характеристики, приемы совершенствования, актюаторы, датчики, патентный поиск

METHODS IMPROVEMENT OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF BIMORPH SENSORS AND ACTUATORS

Petrova Irina Yu., D. Sc. (Engineering), Professor, Astrakhan Civil Engineering Institute, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: Irapet1949@gmail.com

Yevdoshenko Oleg I., post-graduate student, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: Goronet@list.ru

Zaripova Viktoriya M., Ph.D (Engineering), Astrakhan Civil Engineering Institute, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: vtempus2@gmail.com

Gurskaya Tatyana G., Ph.D (Engineering), Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: gursk@aspu.ru

In article authors review the state and prospects of development of the modern market of piezoelectric devices; give the main design features of bimorph piezoelectric elements; present results of the analysis of modern technical literature and patent documentation. Results of research of patent activity on bimorph piezoelements for five leading countries in this area (the USA, Japan, Germany, France, Russia) are presented. The purpose of work is to carry out a research review of patent activity in the field of piezoelectric devices and identification of the generalized methods of their capacity improvement. Authors have developed the classification of constructive methods of improvement for three main operational characteristics of bimorph elements – sensitivity, mechanical durability and range of output size. Analysis allowed to clear common receptions for improving of a set of operational characteristics at the same time.

Keywords: piezoelements, bimorph elements, operational characteristics, methods of improvement, actuators, sensor, patent search

В настоящее время производство пьезоэлектрических устройств, обладающих хорошими эксплуатационными характеристиками, широкими динамическими и частотными диапазонами, малыми размерами, высокой надежностью и не требующих источников питания, характеризуется высокими темпами роста. Актуальными направлениями являются разработка новых пьезоэлектрических устройств с улучшенными показателями эксплуатационных характеристик, а также расширение областей применения этих устройств. Для этого могут быть использованы конструктивные, технологические и схемотехнические обобщенные приемы.

Цель данной статьи – исследовать патентную активность в сфере биморфных пьезоэлементов и выявить наиболее эффективные приемы совершенствования конструкций этих устройств, которые позволяют улучшать одновременно несколько характеристик и могут быть использованы при проектировании.

Краткое описание пьезоэлектрических датчиков. Работа пьезоэлектрического датчика основана на пьезоэлектрическом эффекте. Различают *прямой* и *обратный* пьезоэлектрические эффекты. *Прямой* – состоит в том, что под влиянием механических напряжений на гранях некоторых кристаллов появляются электрические заряды. *Обратный* – при внесении пьезокристалла в электрическое поле, силовые линии которого совпадают с направлением пьезоэлектрической оси, происходит изменение геометрических размеров кристалла (сжатие или растяжение).

В качестве материалов для датчиков применяются кварц, титанат бария, сегнетова соль, ниобат лития, пьезокерамика, пьезополимеры и др.

Пьезоэлектрические датчики обладают следующими достоинствами:

- малыми габаритами;
- простотой конструкции;
- надежностью в работе;
- возможностью измерения быстропеременных нагрузок.

Характеристика рынка пьезоэлектрических устройств. Рынок пьезоэлектрических устройств очень разнообразен (гироскопы, зуммеры, акселерометры, биморфные актюаторы, резонаторы, генераторы, фильтры, датчики, пьезотрансформаторы ультразвуковые преобразователи для биомедицинских применений, гидролокаторы для военных и гражданских целей и др.) и динамично развивается.

По результатам исследований, опубликованным в октябре 2013 г. американской корпорацией Innovative Research and Products Inc. (IRAP Inc.), мировой рынок пьезоэлектрических устройств достиг 20,6 млрд долл. США в 2012 г. и, как ожидается, достигнет \$ 38,4

млрд к 2017 г. [20]. На рис. 1 показан прогноз развития мирового рынка этих устройств по видам продукции (данные Innovative Research and Products Inc., USA) [20].

Согласно исследованию Innovative Research and Products Inc. в 2012 г. Японии принадлежит самая высокая доля рынка, затем следуют Европа, Китай, Северная Америка, Корея. По прогнозу к 2017 г. Китай в отношении объемов производства будет занимать первое место, опередив Японию [20]. Однако кроме объемов производства важны и качественные характеристики устройств, совершенствование которых целесообразно исследовать по результатам патентной активности.

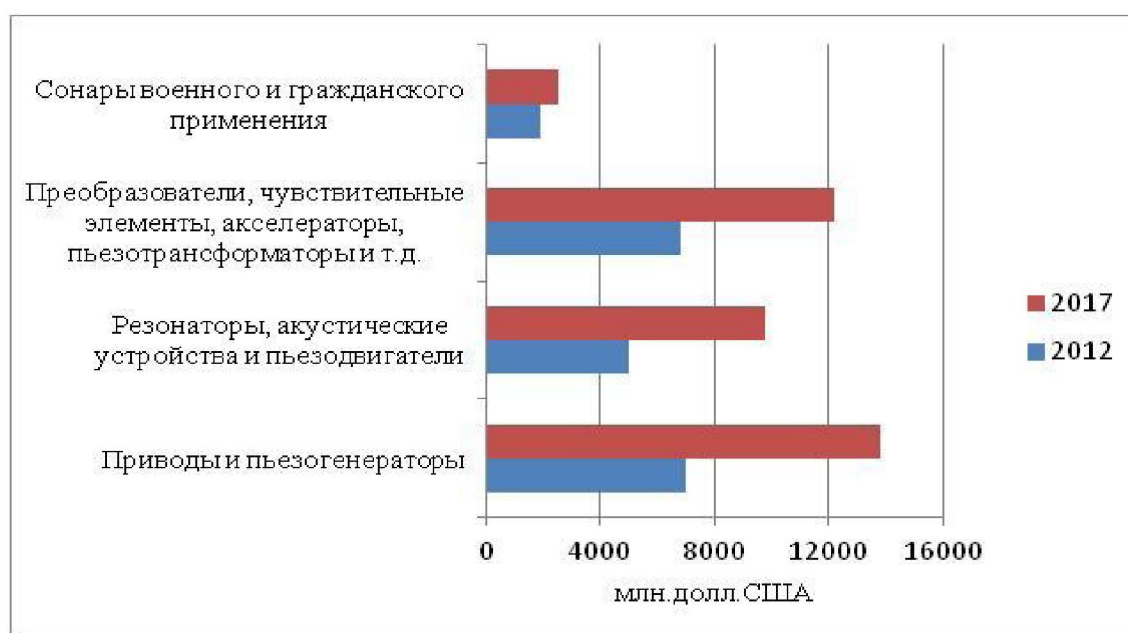


Рис. 1. Прогноз развития мирового рынка пьезоэлектрических устройств по видам продукции (данные IRAP Inc., USA)

Результаты исследования патентной активности в сфере биморфных пьезоэлементов. Для выявления обобщенных (используемых в нескольких патентах) приемов улучшения эксплуатационных характеристик авторами был проведен анализ патентной документации с использованием информационных ресурсов Роспатента (www.fips.ru); Всемирной организации интеллектуальной собственности (<http://patentscope.wipo.int/>); служб международного патентного поиска (www.espacenet.com). Предметом поиска были пьезоэлектрические устройства на основе биморфных элементов. Поиск патентов осуществлялся по следующим странам-заявителям: Великобритания, Франция, Япония, Германия, США, Россия.

В ходе исследований особое внимание уделялось приемам, которые позволяют улучшать одновременно несколько эксплуатационных характеристик и не ухудшают при этом значения других.

В результате патентного анализа по базам данных Всемирной организации интеллектуальной собственности (<http://patentscope.wipo.int/>) по запросу «биморфные пьезоэлектрические устройства» было найдено 1216 патентов за период 2004–2014 г. При аналогичном запросе в базе данных служб международного патентного поиска (www.espacenet.com) – 2495 патентов. Дальнейший анализ патентной активности проводился в рамках найденной информации.

Исследования в области разработки устройств на основе биморфных элементов ве-

дуются в различных странах. Распределение количества патентов по странам мира показано на рис. 2 (по данным сайта <http://patentscope.wipo.int>). Как следует из этой диаграммы, наибольшее количество патентов принадлежит США (35,12 %) и Японии (29,44 %). Доля России составляет только 3,13 %.

В результате патентного анализа по данным, взятым с сайта Федерального института промышленной собственности (ФИПС) и служб международного патентного поиска, были построены гистограммы, отображающие динамику роста выданных в России и действующих на данный момент патентов на технические устройства с использованием биморфных элементов (рис. 3).

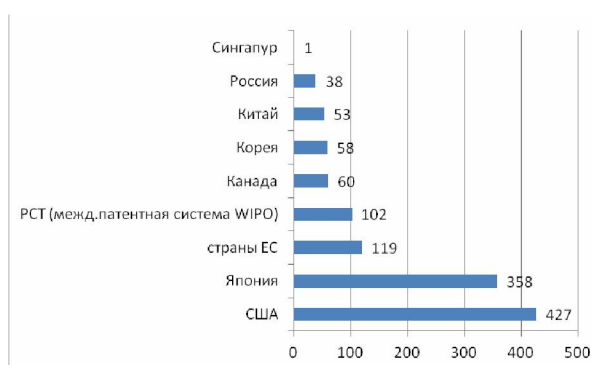


Рис. 2. Количество выданных патентов по биморфным элементам по странам мира

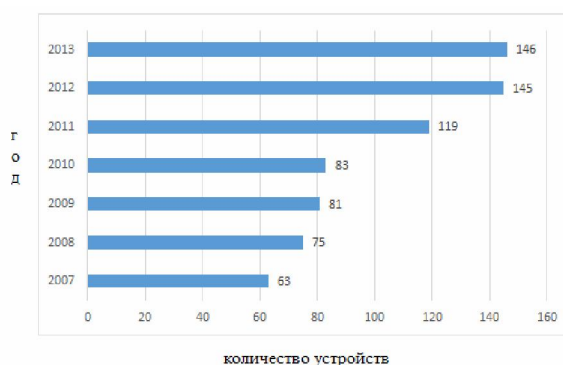


Рис. 3. Динамика роста количества выданных патентов по биморфным элементам в России

Основное количество патентов, выдаваемых как в России, так и за рубежом, относится к классу H01L международной патентной классификации (МПК) – полупроводниковые приборы; электрические приборы на твердом теле, не отнесенные к другим классам или подклассам и H04R – громкоговорители, микрофоны, адаптеры или аналогичные электромеханические преобразователи звука; слуховые аппараты; звукоусилительные устройства (получение звуковых сигналов с частотой, не определяемой частотой сети).

Анализируя диаграмму (рис. 3), можно сделать вывод, что количество устройств, использующих биморфные элементы ежегодно растет. Причинами роста и непрерывного расширения сферы применения биморфных пьезоэлементов являются: снижение стоимости, повышение долговечности, прочности, быстродействия, надежности, точности и чувствительности; упрощение конструкций технических устройств; увеличение их функциональных возможностей по сравнению с обычными пьезоэлементами.

Анализ приемов совершенствования эксплуатационных характеристик биморфных элементов. Проведенный авторами анализ научно-технической и патентной документации показал, что к основным технико-экономическим показателям биморфных элементов можно отнести: чувствительность, точность, механическую прочность, быстродействие, надежность, диапазон изменения выходной величины, вибрационную усталость.

В таблице приведена классификация конструктивных приемов совершенствования эксплуатационных характеристик биморфных элементов для трех эксплуатационных характеристик (чувствительность, механическая прочность и диапазон выходной величины).

Таблица 1

Пример классификации отдельных приемов улучшения эксплуатационных характеристик биморфных пьезоэлементов

Обобщенные методы	Обобщенные цели					
	Повышение чувствительности					
Конструктивные	Изготовление биморфа без прокладки (склеивание пластин [2])	Стандартная свободная длина биморфа консольного типа должна составлять около 85 % от общей длины [2]	Изменение соотношения модулей продольной упругости E_2 пластинчатого электрода (сплав 42 % свинца) и каждой пьезоэлектрической пластины E_i (PZT керамика) [22]	Введение третьего слоя (триморф) из слабо-упругого материала [8]	Треугольная форма электродов консольного биморфа [23, 24, 19]	Биморфный пьезоэлектрический элемент выполнен в виде одновитковой спирали Архимеда [12]
	Соединение пьезоэлектрической и металлической (аморфной) пластин в ассиметричный биморф увеличивает чувствительность в 10–20 раз [17, с. 290]	Поляризованные участки биморфного элемента малой толщины с повышенной чувствительностью находятся внутри неполяризованной рамки [9]	Биморфный дисковый пьезоэлемент с электродами, нанесенными на его поверхности. При этом электроды выполнены в форме колец, внутренний размер которых равен радиусу цилиндрического опорного элемента, а наружный – 0,3–0,6 радиуса пьезоэлемента [1]			
Схемотехнические	Параллельная схема соединения биморфа [4, 17]	Введение параллельной отрицательной обратной связи по вспомогательному каналу, который создается с помощью дополнительной системы электродов или дополнительного пьезоэлемента, располагаемого по отношению к основному пьезоэлементу планарно или компланарно [14]		Биморфный пьезоэлемент в плоскости расположения первого электрода снабжен двумя дополнительными электродами, связанными с выходами согласующего усилителя [10, 11]		

Обобщенные методы	Обобщенные цели					
	Повышение механической прочности			Расширение диапазона выходной величины		
Конструктивные	Применение прокладки из нержавеющей стали. Результат 25 % [16]	Ассиметричный биморф, состоящий из металлической пластины с приклеенным к ней поляризованным по толщине плоским пьезоэлементом [3]	Поляризованные участки биморфного элемента малой толщины с повышенной чувствительностью находятся внутри неполяризованной рамки [9]	Изменение соотношения модулей продольной упругости E_2 пластинчатого электрода (сплав 42% свинца) и каждой пьезоэлектрической пластины E_i (PZT керамика) [22]	Треугольная форма электродов консольного биморфа [23]	Многосекционный биморфный элемент (2 или несколько секций), каждая секция многослойный биморф (слои пьезокерамики и электродов) [19]
	Использование высокотемпературного пьезокерамического материала ЦТС-21, который представляет собой твердый раствор цирконата-титаната свинца с большим содержанием титаната свинца [15]	Пьезокерамические материалы ТКС-21 и ТКС-22 спекают методом горячего прессования, обеспечивающим получение материала с низкой пористостью и высокой прочностью. Из них изготавливают тонкие пьезоэлементы на частоты до 30 МГц [15]	Центральная прокладка изготавливается из бериллиевой бронзы [2]	Схемотехнические	Расширение рабочего диапазона частот за счет вычитания или деления двух напряжений, которые образуются в одном пьезоэлементе от электродов с разными размерами и формой. Преобразователь оборудован делителем напряжения, а электроды на пьезоэлементе выполнены в виде диска и кольца, которые подключены к входам делителя напряжения [9]	Введение отрицательной обратной связи с помощью пьезоэлектрического трансформатора, причем входная система электродов пьезотрансформатора подключена к выходу усилителя, а входная - к входу, образуя цепь отрицательной обратной связи [15]

Ниже рассмотрены некоторые наиболее эффективные приемы.

Схемы включения биморфных пьезоэлементов

Последовательная и параллельная схемы включения биморфного элемента. При одинаковых размерах пьезоэлементов чувствительность преобразователя по параллельной схеме и его собственное сопротивление в четыре раза меньше соответствующих характеристик преобразователя по последовательной схеме. При параллельном соединении развиваемые механические усилия выше, но существует опасность деполяризации слоев пьезоэлемента [2].

Введение обратной связи (ОС). Положительная ОС позволяет возбудить в пьезопреобразователях резонансные колебания и строить на этой основе датчики различных физических величин. Отрицательная ОС дает возможность линеаризовать их градуировочные характеристики, повысить точность, температурную и временную стабильность, расширить рабочий диапазон частот [16]. В [16, 17] приведены примеры применения отрицательной ОС в симметричном биморфе с помощью одного из пьезоэлементов или с помощью дополнительного электрода. Введение электромеханической отрицательной обратной связи также позволяет обеспечить стабильность чувствительности от образца к образцу [10, 11]. Отрицательная ОС может быть введена с помощью дополнительных электродов на пьезоэлементе или с помощью дополнительных пьезоэлементов, расположенных планарно или компланарно с основным пьезоэлементом.

Другие схемные решения:

1) электрическое демпфирование колебательной системы добавочными резисторами или встречное включение дополнительных пьезоэлементов различной толщины используется для линеаризации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезокерамических датчиков. Это приводит к расширению рабочего диапазона всей контрольно-измерительной системы [18];

2) введение делителя напряжения, а также выполнение электродов на пьезоэлементе с разными размерами или формой (например, в виде диска и кольца) и их подключение к входу делителя напряжения, позволяет расширить рабочий диапазон частот [7].

Многослойные биморфные элементы позволяют достигать одновременного улучшения нескольких эксплуатационных характеристик: быстродействия, надежности, уменьшения потребляемой мощности.

В простейших биморфах прокладка вводится для увеличения механической прочности элемента, но при этом уменьшается чувствительность устройства. Наилучшим материалом для изготовления прокладки являются нержавеющая сталь, бифункциональные сополимеры, электропроводящие полимеры, которые улучшают прочность до 25 % по сравнению с другими материалами. На прочность также влияет и общая толщина биморфного элемента, между этими параметрами существует прямо пропорциональная зависимость. В некоторых случаях для повышения чувствительности устройства пьезоэлектрические пластины размещаются с зазором, заполненным материалом с низкой упругостью (например поролон в а.с.№ SU 613526) [8]

Многослойный биморфный элемент описан, например, в патенте США № 20110120843 [24]. В этом устройстве формируется симметричный стек пьезоэлектрических слоев (рис. 4), в котором электрическое поле всегда прикладывается в том же направлении, что и направление поляризации пьезоэлектрических слоев. Кроме того, вводится центральный нейтральный слой диэлектрика. Эти меры предотвращают деполяризацию пьезоэлектрического слоя и повышают срок службы устройства, а также существенно снижают влияние температуры окружающей среды.

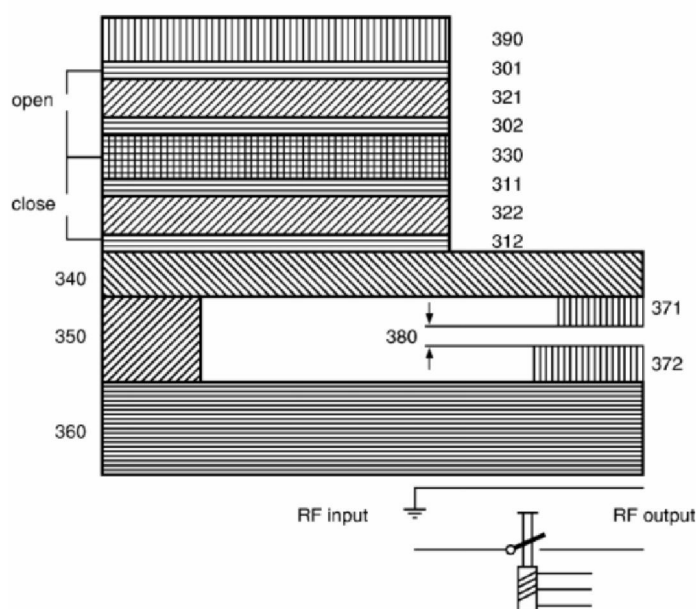


Рис. 4. Многослойный пьезоэлектрический биморфный переключатель (патент США № 20110120843): верхний электрод (301), нижний электрод (312), два пьезоэлектрических слоя (321, 322), центральные слои металл-диэлектрик-металл (302, 330, 311). Материал и толщины проводящих слоев (301, 302, 311 и 312) одинаковы, так же как и для слоев пьезодиэлектрика (321 и 322). Дополнительный слой (390) способствует снижению градиента остаточных напряжений. Биморфный переключатель активирует дополнительные металлизированные контакты (371 и 372). Кремниевая подложка (360), якорь (350) и слой с низкой проводимостью (340) служат для разделения металлизированных контактов и биморфного элемента

Изменение геометрических размеров биморфного элемента и их соотношений также позволяет улучшать одновременно несколько эксплуатационных характеристик. Известно, что для повышения точности и улучшения чувствительности стандартная свободная длина (длина активной т.е. рабочей части) биморфа должна составлять около 85 % от общей длины ($L_p/L = 0,85$) [2]. Быстродействие биморфа определяется значением статической выходной емкости, величина которой зависит от геометрических параметров элемента [2].

В патенте США № 5382864 описан консольный биморфный привод (актюатор) с увеличенной чувствительностью – при постоянном поданном напряжении достигается наибольшее смещение свободного конца актюатора [22]. Отличительной особенностью этого элемента (рис. 5 а) является соотношение модулей продольной упругости пластинчатого электрода E_2 (сплав 42 % свинца) и каждой из пьезоэлектрических пластин E_i (PZT керамика):

Величина смещения пьезоэлектрического биморфного привода, как правило, выражается следующим уравнением:

$$\delta = NVL^2/2K, \quad (1)$$

где δ – величина смещения свободного конца биморфа; V – приложенное напряжение; L – эффективная длина пьезоэлектрического биморфного привода; K – жесткость на изгиб привода.

Величина N определяется по формуле:

$$N = d_{31}E_1W(t_1+t_2)/2, \quad (2)$$

где d_{31} – пьезоэлектрическая постоянная; E_1 – модуль Юнга каждой пьезоэлектрической пластины; W – ширина каждой пьезоэлектрической пластины; t_1 – толщина каждой пьезоэлектрической пластины; t_2 – толщина электродной пластины.

Уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\delta = A(N/K), \quad (3)$$

где постоянный коэффициент $A = (VL^2)/2$.

Таким образом, величина смещения δ будет зависеть от соотношения (N/K) , которое, в свою очередь, зависит от соотношения t_1/t_2 . В [25] приведен график этой зависимости (рис. 5 б), где видно, что это соотношение имеет максимум.

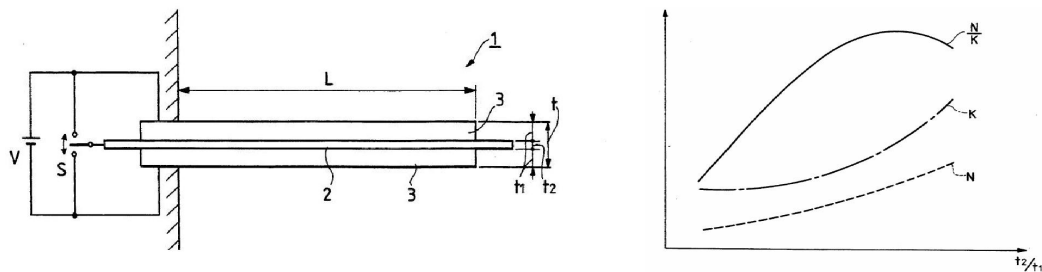


Рис. 5. Консольный биморфный актюатор (патент США № 5382864):

- а) конструкция биморфного актюатора
 б) графики зависимостей параметров K , N ,
 и их отношения N/K
- (1 – пьезоэлектрический биморф; 2 – пластинчатый электрод, 3 – пьезоэлектрические пластины)

В а.с. № SU 613526 [8] показано, что в триморфной мембране (средний слой – слабоупругий материал «поролон») колебания происходят на резонансной частоте мембраны, добротность которой обусловлена материалом, заполняющим зазор (поролон). Когда зазор между пластинами пьезодиэлектрика равен их толщине, деформация сдвига уменьшается более чем в 1,6 раза, что приводит к увеличению чувствительности на той же резонансной частоте мембраны также в 1,6 раза. Кроме того, устранение склейки пластин пьезоэлемента уменьшает потери на трение из-за деформации сдвига, наблюдающихся между склеенными пластинами. Если на добротность не наложено ограничение сверху, как это обычно бывает при задании полосы пропускания, то подобное конструктивное исполнение мембраны позволяет существенно увеличить добротность, а следовательно, и чувствительность на резонансной частоте.

Изменение формы элементов конструкции биморфа позволяет повысить чувствительность и диапазон выходной величины, а также уменьшить габариты устройства.

В патенте США № 4367504 [23] биморфный элемент сконструирован таким образом, что ширина электрода постепенно уменьшается от закрепленного конца в направлении подвижного конца, а ширина электродов, за исключением фиксированного конца, меньше, чем ширина пьезоэлектрического материала. Это позволило достигнуть максимума изгибающего момента на свободном конце биморфа (рис. 6).

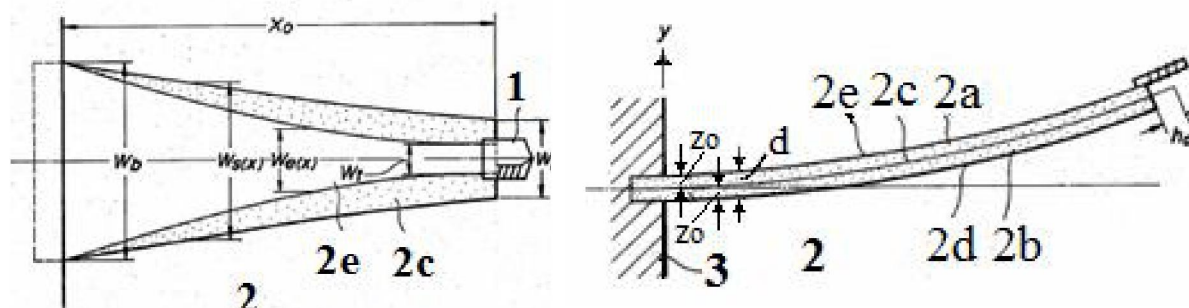


Рис. 6. Консольный биморф треугольной формы (патент США № 4367504):

а) вид сверху

б) вид сбоку

1 – магнитная головка записывающего устройства; 2 – пьезоэлектрический биморфный элемент;

2a и 2b – пьезоэлектрические керамические тонкие пластины из титаната бария,

2c, 2d и 2e – электроды; 3 – опорный элемент

Треугольная форма биморфного элемента была использована в лаборатории микророботов Гарвардского университета (США) для создания микроминиатюрного робота-пчелы (рис. 7). В статьях [19, 25] приведены математические модели расчета пьезоэлектрического биморфного актюатора, обеспечивающего высокую плотность энергии (2 Дж/Кг) при малой массе устройства (12 мг). Это на порядок больше, чем в обычных конструкциях биморфных элементов.



В а.с. № SU 718949 [12] биморфный пьезоэлектрический элемент выполнен в виде одновитковой спирали Архимеда, что позволило повысить чувствительность устройства и уменьшить его габариты (рис. 8).

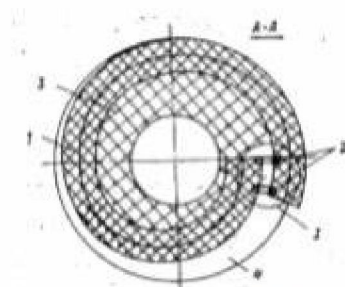


Рис. 8. Биморфный пьезоэлектрический элемент
в виде спирали Архимеда

Пьезоэлектрическую биморфную спираль изготавливают, например, из пьезокерамики типа ЦТС-23 с последующей поляризацией в поле 1–3 МВ/м.

Выводы:

1. Анализ научно-технической и патентной информации показал, что рынок биморфных сенсоров и актюаторов динамично развивается. Большая часть конструктивных изменений таких устройств направлена на повышение чувствительности и механической прочности.

2. Проведенный анализ патентной и научно-технической документации позволил выявить несколько приемов, позволяющих достигнуть одновременного улучшения двух эксплуатационных характеристик.

2.1. Изменение геометрических размеров биморфного элемента и соотношения модуля продольной упругости (E_2) пластинчатого электрода (сплав 42 % свинца) и модулей упругости каждой пьезоэлектрической пластины (E_1) (PZT керамика) позволяет повысить чувствительность, быстродействие и точность.

2.2. Изменение формы элементов конструкции биморфа, например, треугольная форма электродов консольного биморфа или выполнение элемента в виде одновитковой спирали Архимеда, позволяет повысить чувствительность и уменьшить габариты элемента.

2.3. Использование многослойных биморфов на основе современных материалов (бифункциональные сополимеры, электропроводящие полимеры) позволяет повысить быстродействие, надежность, уменьшить потребляемую мощность.

2.4. Введение отрицательной обратной связи в симметричном биморфе с помощью одного из пьезоэлементов или с помощью дополнительного электрода дает возможность линеаризовать градуировочные характеристики; повысить точность, температурную и временную стабильность; расширить рабочий диапазон частот биморфных пьезоэлектрических элементов.

3. Выявлены обобщенные приемы.

3.1. Использование треугольной формы электродов для достижения максимума изгибающего момента на свободном конце консольного биморфа.

3.2. Использование параллельной схемы соединения биморфа для увеличения чувствительности преобразователя.

3.3. Введение двух дополнительных электродов в плоскости расположения основного электрода биморфного пьезоэлемента, связанных с выходами согласующего усилителя для изменения чувствительности в широких пределах.

Сформулированные обобщенные приемы не являются исчерпывающими, работа по выявлению новых будет продолжена в дальнейших исследованиях.

Список литературы

1. Биморфный пьезоэлектрический сейсмоприемник и способ получения идентичных биморфных пьезоэлектрических сейсмоприемников : патент RU 2119678 Россия: МПК G01V1/16, H01R17/00, H01L41/22 / В.Н. Некрасов (Россия). – № 95118671/25; заявл. 31.10.1995; опубл. 27.09.1998, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 2.
2. Климашин В. Биморфные пьезоэлектрические элементы: актюаторы и датчики / В. Климашин, В. Никифоров, А. Сафронов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 4. – С. 10–15.
3. Комбинированный акустический приемник : патент RU 2245604 Россия: МПК H04R17/00 / Г. Н. Кузнецов, А. Е. Светославский (Россия). – № 2002125413/28; заявл. 11.09.2002; опубл. 27.01.2005, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 3.
4. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы : учеб. пос. / А. Е. Панич. – Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2008. – 159 с.
5. Петрова И. Ю. Микроэлементы систем управления с распределенными параметрами различной физической природы / И. Ю. Петрова. – Москва : Наука, 1979. – 111 с.
6. Петрова И. Ю. Приемы совершенствования электрокинетических преобразователей / И. Ю. Петрова, Т. Г. Гурская // Датчики и системы. – 2007. – № 10. – с. 18–21.
7. Пьезоэлектрический преобразователь механических величин : патент UA61501 Украина: МПК G01L 1/16, H01L 41/113, H01L 41/22, G01P 15/09 / Ю. Ю. Балковская, М. П. Мусиенко, В. М. Шарапов. – № 2003021379; заявл. 17.02.2003; опубл. 17.11.2003, Официальный бюллетень «Промышленная собственность» № 11/2003.
8. Пьезоэлектрический приемник звукового давления : а.с. SU 613526 СССР: МКИ H04R17/02 / В. Н. Банков, Г. Т. Левченко, А. А. През, В. А. Хращевский (СССР). – № 2446339/18-10; заявл. 25.01.1977; опубл. 30.06.1978, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 24.
9. Пьезоэлектрический прибор и способ его изготовления : патент RU 2472253 Россия: МПК H01L41/08, H01L41/24 / Д. А. Добрынин, В. А. Головин, А. В. Дайнеко, С. Л. Круглов, Б. Б. Педько, Р. М. Гречишкин (Россия). – № 2011134339/28; заявл. 17.08.2011; опубл. 10.01.2013, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 1.
10. Пьезоэлектрический приемник звукового давления : а.с. SU 1534760 СССР: МКИ H04R17/02 / А. А. Златкин, А. М. Алавердиев, О. М. Боев, В. М. Шарапов (СССР). – № 4180765/24-10; заявл. 13.01.1987; опубл. 07.01.1990, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 1.
11. Пьезоэлектрический приемник звукового давления : а.с. SU 1534759 СССР: МКИ H04R17/02 / А. А. Златкин, О. В. Круглов, О. М. Боев, В. М. Шарапов (СССР). – № 4179437/24-10; заявл. 13.01.1987; опубл. 07.01.1990, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 1.
12. Пьезоэлектрический приемник звука : а.с. SU 718949 (СССР) МКИ H04R17/02 / Г. Т. Левченко, В. Н. Банков, А. А. През (СССР). – № 2674556/18-10, заявл. 09.10.1978, опубл. 28.02.1980, Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 8.
13. Пьезоэлектрический преобразователь механических величин : патент № UA 34316 Украина: МПК G01L 1/16, G01P 15/09 / Ю. Г. Лега, Н. В. Саенко, В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко. – № 99063571; заявл. 24.06.1999; опубл. 15.02.2001, Официальный бюллетень «Промышленная собственность» № 1/2001.
14. Пьезоэлектрический преобразователь механических величин : патент UA № 34318 Украина: МПК G01L1/16, G01P15/09 / Ю. Б. Шевченко, Ю. Г. Лега, Н. В. Саенко, В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко (UA). – № 99063571; заявл. 24.06.1999; опубл. 15.02.2001, Официальный бюллетень «Промышленная собственность» № 1.
15. Сегалла А. Г. Высокоанизотропные пьезокерамические материалы и пьезокомпозиты ОАО «Элпа» для пьезопреобразователей и датчиков различного назначения / А. Г. Сегалла, М. А. Соловьев, А. А. Петрова. – Режим доступа: http://www.elpapierzo.ru/High_anisotropic_materials.pdf (дата обращения 15.07.2014), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
16. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические преобразователи. Новые технологии проектирования / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула // Электроника НТБ. – 2012. – Вып. 5. – С. 96–102.
17. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова ; под ред. В. М. Шарапова. – Москва : Техносфера, 2006. – 632 с. – ISBN 5-94836-100-4.

18. Шарапов В. М. Новое поколение пьезокерамических датчиков физических величин / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2005. – № 5. – С. 15–17.
19. Double bimorph electromechanical element : pat. US № 6437485 USA: IPC H01L41/09 / S. Johansson. – № US09/739,906; declared 20.12.2000, publication date 20.08.2002.
20. Karpelson M., Wei G., Wood R.J. Driving high voltage piezoelectric actuators in microrobotic applications / M. Karpelson, G. Wei, R. J. Wood // *J. Sensors and Actuators A: Phys.* – 2012. – doi:10.1016/j.sna.2011.11.035.
21. Market for piezoelectric ceramic and polymer devices to almost double in five years, retrieved July 14, 2014. – Available at: http://www.innoresearch.net/Press_Release.aspx?id=12 (accessed 02.07.2014).
22. Piezoelectric bimorph type actuator : pat US № 5382864 USA: IPC H02N2/04, H02N2/02, H01L41/09 / Atsushi Morikawa, Jiro Inoue, Jun Tabota. – № US 08/014,895; declared 8.12.1993; publication date 17.01.1995.
23. Piezo-electric bimorph type transducer : pat. US № 4367504 USA: IPC H01L41/09, G11B5/53, G11B5/592 / Takeo Seki, Yukio Shinoda, Akio Kumada. – № US06/250,432; declared 02.04.1981; publication date 04.01.1983.
24. Piezoelectric bimorph switch : pat. US № 20110120843 USA: IPC H01H57/00/ Olaf Wunnicke, Klaus Reimann. – № US13/000,256; declared 18.06.2009, publication date 26.05.2011.
25. Wood R. J. Optimal energy density piezoelectric bending actuators / R. J. Wood, E. Steltz, R. S. Fearing // *J. Sensors and Actuators A: Phys.* – 2005. – № 119. – P. 476–488.

References

1. Bimorfnyy Bimorph piezoelectric geophone and a method for producing the piezoelectric bimorph identical geophones: patent RU 2119678 Russia: IPC G01V1/16, H01R17/00, H01L41/22 / V. N. Nekrasov (Russia). No. 95118671/25; appl. 31.10.1995; publ. 27.09.1998, Official Bulletin “Inventions. Utility Models” no. 2. (In Russ.)
2. Klimashin V., Nikiforov V., Safronov A. Bimorfnye pezelektricheskie elementy: aktyuatory i datchiki [Bimorph piezoelectric elements: actuators and sensors]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], no. 4, 2003, pp. 10–15.
3. Combined acoustic receiver: RU Patent 2245604 Russia: IPC H04R17 / 00 / G. N. Kuznetsov, A. E. Svetoslavsky (Russia). No. 2002125413/28; appl. 11.09.2002; publ. 27.01.2005, Official Bulletin “Inventions. Utility Models” no. 3. (In Russ.)
4. Panich A. Ye. *Pezokeramicheskie aktyuatory* [Piezoceramic Actuator]. Rostov on Don, South Federal Univ., 2008. 159 p.
5. Petrova I. Yu. *Mikroelementy sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami razlichnoy fizicheskoy prirody* [Microcells of control systems with the distributed parameters of various physical nature]. Moscow, Nauka, 1979. 111 p.
6. Petrova I. Yu., Gurskaya T. G. Priemy usovershenstvovaniya elektrokineticheskikh preobrazovateley [Methods of improvement of electrokinetic converters]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and system], 2007, no. 10, pp. 18–21.
7. The piezoelectric transducers of mechanical quantities: Patent UA61501 Ukraine: IPC G01L 1/16, H01L 41/113, H01L 41/22, G01P 15/09 / Yu. Yu. Balkovskaya, M. P. Musienko, V. M. Sharapov. No. 2003021379; appl. 17.02.2003; publ. 17.11.2003, Official Bulletin “Industrial Property” no. 11/2003. (In Russ.)
8. The piezoelectric receiver SPL: AS SU 613526 USSR MKI N04R17/02 / V. N. Banks, G. T. Levchenko, A. Prez, V. A. Hrashevsky (USSR). No. 2446339/18-10; appl. 25.01.1977; publ. 30.06.1978, Official Bulletin “Inventions. Utility Models” no. 24. (In Russ.)
9. The piezoelectric device and manufacturing method thereof: RU Patent 2472253 Russia: IPC H01L41/08, H01L41/24 / D. A. Dobrynin, V. A. Golovnin, A. V. Dayneko, S. L. Kruglov, B. B. Pedko, R. M. Grechishkin (Russia). No. 2011134339/28; appl. 17.08.2011; publ. 01.10.2013, Official Bulletin “Inventions. Utility Models” no. 1. (In Russ.)
10. The piezoelectric receiver SPL: AS SU 1534760 USSR MKI H04R17/02 / A. A. Zlatkin, A. M. Alaverdi, O. M. Loot, V. M. Sharapov (USSR). No. 4180765/24-10; appl. 01/13/1987; publ. 01.07.1990, Official Bulletin “Inventions. Utility Models” no. 1. (In Russ.)

11. The piezoelectric receiver SPL: AS SU 1534759 USSR MKI H04R17/02 / A. A. Zlatkin, O. V. Kruglov, O. M. Loot, V. M. Sharapov (USSR). No. 4179437/24-10; appl. 13.01.1987; publ. 01.07.1990, Official Bulletin "Inventions. Utility Models" no. 1. (In Russ.)
12. The piezoelectric sound receiver: AS SU 718949 (USSR) MKI N04R17/02 / G. T. Levchenko, V. N. Banks, A. A. Preez (USSR). No. 2674556/18-10, appl. 09.10.1978, publ. 28.02.1980, Official Bulletin "Inventions. Utility Models" no. 8. (In Russ.)
13. The piezoelectric transducer of mechanical quantities: Patent no. UA 34316 Ukraine: IPC G01L1/16, G01P15/09 / Yu. G. Lega, N. V. Saenko, V. M. Sharapov, M. P. Musienko. No. 99063571; appl. 24.06.1999; publ. 15.02.2001, Official Bulletin "Industrial Property" no. 1/2001.
14. The piezoelectric transducer of mechanical quantities: Patent UA № 34318 Ukraine: IPC G01L1/16, G01P15/09 / Yu. B. Shevchenko, G. Lega, N. V. Saenko, V. M. Sharapov, M. P. Musienko (UA). No. 99063571; appl. 24.06.1999; publ. 15.02.2001, Official Bulletin "Industrial Property" no. 1.
15. Segall A. G., Soloviev M. A., Petrov A. A. HIGHLY piezoceramic materials and piezocomposites of "Elpa" for piezoelectric transducers and sensors for different purposes. Available at: http://www.elpapiezo.ru/High_anisotropic_materials.pdf (accessed 15 July 2014).
16. Sharapov V. M., Sotula Zh. V. Pezoelektricheskie preobrazovateli. Novye tekhnologii proektirovaniya [Piezoelectric converters. New technologies of design]. *Elektronika NTB* [NTB Electronics], 2012, issue 5, pp. 96–102
17. Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova Ye. V. *Pezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow, Tekhnosfera, 2006. 632 p. ISBN 5-94836-100-4.
18. Sharapov V. M., Musienko M. P. Novoe pokolenie pezo-keramicheskikh datchikov fizicheskikh velichin [New generation piezo-ceramics of sensors of physical quantity]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and designing in the electronic equipment], 2005, no. 5, pp. 15–17.
19. Double bimorph electromechanical element: pat. US № 6437485 USA: IPC H01L41/09/ S. Johansson. No. US09/739,906; declared 20.12.2000, publication date 20.08.2002.
20. Karpelson M., Wei G., Wood R. J. Driving high voltage piezoelectric actuators in microrobotic applications. *J. Sensors and Actuators A: Phys.*, 2012, doi:10.1016/j.sna.2011.11.035.
21. Market for piezoelectric ceramic and polymer devices to almost double in five years, retrieved July 14, 2014. Available at: http://www.innoresearch.net/Press_Release.aspx?id=12 (accessed 02.07.2014).
22. Piezoelectric bimorph type actuator: pat US no. 5382864 USA: IPC H02N2/04, H02N2/02, H01L41/09/ Atsushi Morikawa, Jiro Inoue, Jun Tabota. No. US 08/014,895; declared 8.12.1993; publication date 17.01.1995.
23. Piezo-electric bimorph type transducer: pat. US no. 4367504 USA: IPC H01L41/09, G11B5/53, G11B5/592/ Takeo Seki, Yukio Shinoda, Akio Kumada. No. US06/250,432; declared 2.04.1981; publication date 04.01.1983.
24. Piezoelectric bimorph switch: pat. US no. 20110120843 USA: IPC H01H57/00/ Olaf Wunnicke, Klaus Reimann. No. US13/000,256; declared 18.06.2009, publication date 26.05.2011.
25. Wood R. J., Steltz E., Fearing R. S. Optimal energy density piezoelectric bending actuators. *J. Sensors and Actuators A: Phys.*, 2005, no. 119, pp. 476–488.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Статья поступила редакцию 25.07.2014, в окончательном варианте 07.12.2014.

Ермишин Константин Владимирович, аспирант, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: konstantin.ermishin@gmail.com

Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: voro@bmstu.ru