

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.Шарапов, д.т.н., Ж.Сотула, к.т.н. v_sharapov@rambler.ru

Важнейший компонент электроакустических приборов и многих других систем и устройств – пьезоэлектрические датчики. Основа такого датчика – пьезокерамическая пластина с нанесенными на нее электродами. Используя традиционные методы, невозможно спроектировать датчики с широким диапазоном рабочих характеристик, не меняя параметры самой пластины (ее размер, форму и материал). Новые технологии позволяют получать из однотипных пластин датчики с самыми различными характеристиками для многих областей применения.

Пьезоэлектрические преобразователи и датчики широко применяются в гидроакустике, электроакустике, в ультразвуковой, медицинской, измерительной технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях и в других областях [1, 2]. Особое место пьезоэлектрические преобразователи занимают в гидроакустических системах, являясь, по существу, "ушами" и "глазами" подводных и надводных кораблей.

Как известно, преобразователь – это устройство, которое преобразует одну физическую величину или энергию в другую физическую величину или энергию, например, тепловую энергию – в электрическую, силу – в перемещение, давление – в электрическое напряжение или ток, электрическое напряжение одного уровня – в электрическое напряжение другого уровня и т.д. [3].

Датчик (сенсор) – это преобразователь измеряемой физической величины в электрический сигнал (напряжение, ток, частоту, фазу и т.п.) [3, 4]. Другими словами, датчик – это преобразователь для получения измерительной информации. В гидроакустике такие преобразователи называют приемниками звука или излучателями [30].

При проектировании пьезокерамических преобразователей обычно используют пьезоэлемент определенной формы и размеров, из определенного пьезокерамического материала с определенными электрофизическими свойствами (характеристиками). Вектор действующей на пьезоэлемент силы F (давления и т.п.) параллелен вектору поляризации P . В то же время вектор силы F параллелен вектору электрического поля E выходного сигнала датчика, т.е. перпендикулярен электродам, которые нанесены на поверхность пьезоэлемента (рис.1а) [1, 2].

Это связано, очевидно, с тем, что при изготовлении пьезоэлемента электроды применяют для его поляризации. Они также применяются для снятия полезного сигнала при измерении физических величин (силы, давления, ускорения и др.) и для введения в пьезоэлемент электрического напряжения при использовании пьезоэлемента в качестве излучателя. Такой тип преобразователя назван традиционным [1]. В этом случае из определенного пьезоэлемента можно получить только один преобразователь с определенными характеристиками (резонансной частотой, чувствительностью, диапазоном рабочих частот и др.). Для получения преобразователя с другими характеристиками необходимо

использовать пьезоэлемент иных размера, формы и/или из иного пьезоматериала.

ВАРИАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ СТРУКТУРЫ

В работе [1] было предложено при проектировании преобразователей учитывать взаимное расположение векторов F , P и E . Это расположение векторов было названо пространственной энергосиловой структурой пьезоэлемента (ПЭСС).

Рассмотрим пьезоэлемент в форме прямоугольного параллелепипеда (рис.1). Пусть электроды нанесены на все грани параллелепипеда и не соединены между собой, а пьезоэлемент поляризован между гранями 1-1'. Пусть также измеряемая сила F приложена параллельно вектору поляризации P (перпендикулярно к грани 1), а выходное напряжение снимается с граней 1-1'. Таким образом, для данного преобразователя все три вектора параллельны оси Z ($F \downarrow P \downarrow E \downarrow$) (см. рис.1а). Как уже отмечено, это – известный (традиционный) вариант расположения векторов F , P , E (пространственной энергосиловой структуры). Реже используются преобразователи, в которых пьезоэлемент располагается таким образом, что вектор силы F перпендикулярен вектору поляризации P (см. рис.1б). Такой тип преобразователя был назван поперечным [5]. Очень интересен вариант преобразователя, у которого выходной сигнал снимается с электродов 2-2'

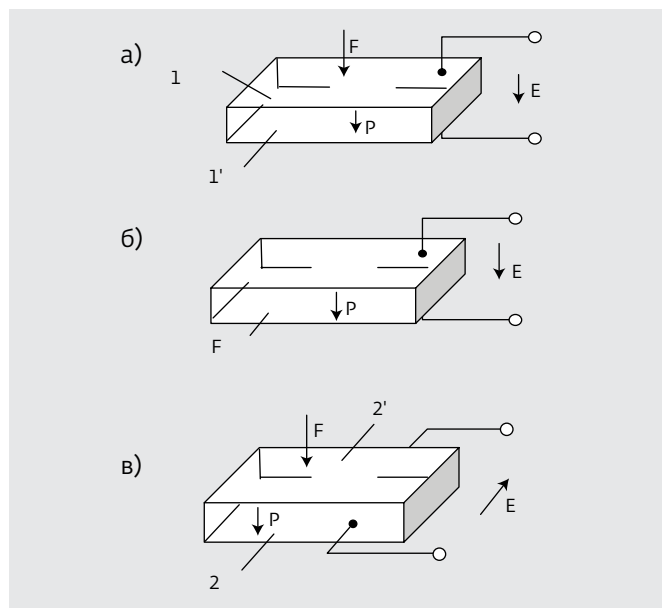


Рис.1. Тип пространственной энергосиловой структуры пьезоэлемента: традиционный (а), поперечный (б), доменно-диссипативный (в)

(см. рис.1в). В этом случае вектор E перпендикулярен вектору P . Такой тип преобразователя был назван (возможно, не совсем удачно) доменно-диссипативным [1, 2, 6]. Физика процессов, происходящих в этих преобразователях, изучена недостаточно. Предполагается, что влияние на их характеристики могут оказывать следующие факторы [1, 2, 6, 7]: рассеяние энергии на доменах; изменение электрической емкости между электродами; возникновение в пьезоэлементе других типов колебаний. Определение возможного вклада каждого из перечисленных факторов требует дальнейшего изучения.

Приведенные на рис.1 конструктивные схемы преобразователей, естественно, не исчерпывают все возможные варианты их исполнения. Всего же для одного пьезоэлемента в виде прямоугольного параллелепипеда можно получить 27(!) вариантов преобразователей с различными характеристиками [1, 2, 6, 7].

На рис.2 показаны экспериментальные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) преобразователей, изображенных на рис.1. Эти преобразователи были изготовлены из пьезоэлемента

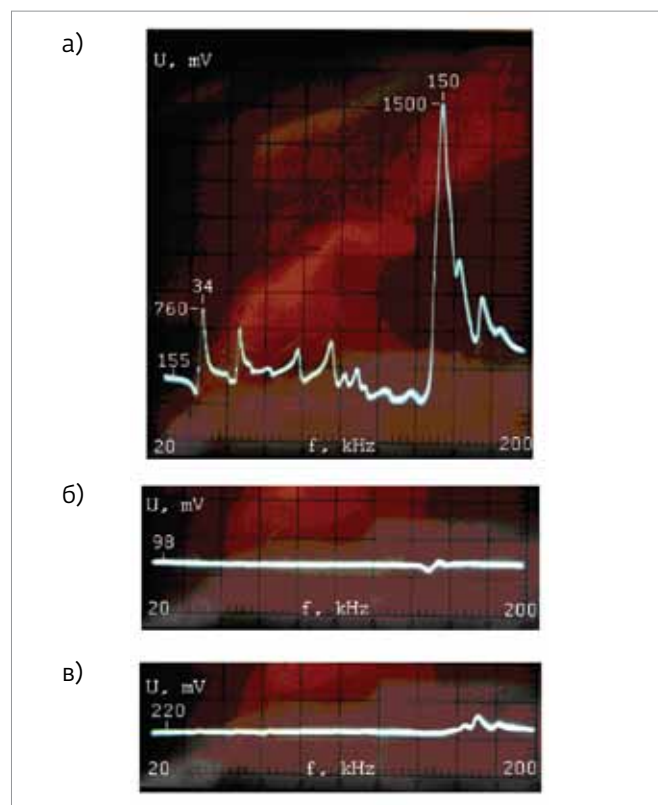


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики преобразователей, показанных на рис.1: а) рис.1а; б) рис.1б; в) рис.1в

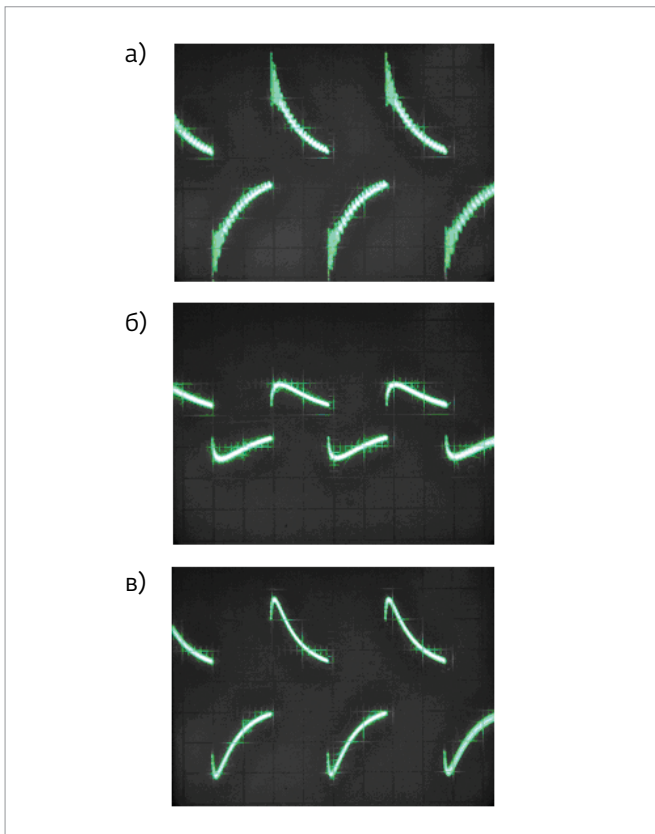


Рис.3. Переходные характеристики преобразователей, показанных на рис.1: а) рис.1а; б) рис.1б; в) рис.1в

с размерами 9×10×90 мм из пьезокерамики ЦТС-19. Измерения АЧХ проводились в пьезотрансформаторном режиме прибором для исследования АЧХ Х1-46, а фотографирование характеристик – цифровой камерой Nikon D90.

Как видно из рис.2 и 3, при изменении взаимного расположения векторов P , F и E в пространстве динамические характеристики преобразователей существенно изменяются. Это открывает широкие возможности при проектировании преобразователей [1, 2, 7].

ВАРИАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА

Первые пьезоэлементы (например, использованные П.Ланжевром в гидролокаторах) представляли собой прямоугольные кварцевые пластины с металлическими съемными накладками [1]. Они выполняли две функции. Во-первых, с их помощью собирались электрические заряды, возникающие при действии звукового давления, либо (для излучателей) подводилось электрическое напряжение, во-вторых – понижалась рабочая частота пьезоэлемента. В дальнейшем

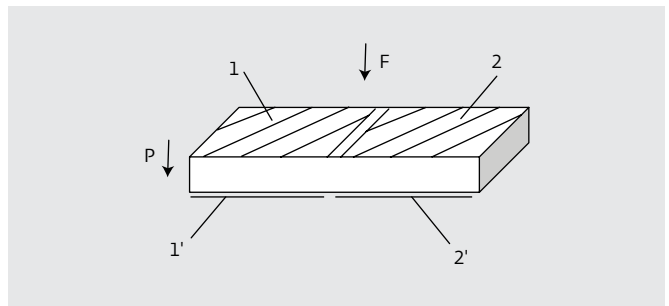


Рис.4. Пьезоэлемент с разделенными электродами

электроды на кварц и пьезокерамику наносились методами вжигания, напыления и т.п., а пьезоэлементы стали иметь два постоянных электрода. Такие пьезоэлементы получили название "пьезорезонаторы" [21, 28].

Позднее появились устройства на основе пьезорезонаторов с двумя системами электродов – входной и выходной [16, 21]. Такие устройства выполняли функции трансформаторов напряжения или тока с коэффициентом передачи (трансформации) до 1000 и более [16]. Необходимо отметить, что функция пьезотрансформатора не является единственной для этих устройств. Действительно, каждая система электродов создает собственную колебательную систему, которая отличается от параметров колебательной системы всего пьезоэлемента. Например, в [29] описан излучатель, представляющий собой пьезоэлемент с несколькими системами электродов. Соединение этих систем в определенном порядке дает возможность создать излучатели с различными диаграммами направленности.

Не менее интересные результаты можно получить, если подключить к измерительному прибору или генератору электроды из разных систем, например, 1-2' или 1'-2 (рис.4). Это изменяет пространственную энергосиловую структуру пьезоэлемента, а следовательно, и характеристики преобразователя.

Если разделить электроды пьезоэлемента на две равные части, то чувствительность датчика по заряду уменьшится вдвое, так как при равномерном воздействии на пьезоэлемент заряд пропорционален площади электродов. Чувствительность же по напряжению останется такой же, как и для пьезоэлемента с неразделенными электродами, так как при уменьшении величины заряда при делении электродов уменьшается и величина емкости между электродами.

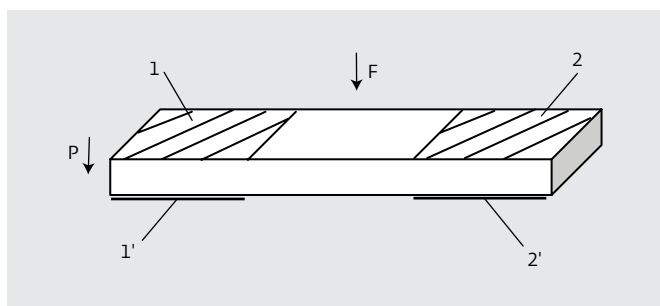


Рис.5. Пьезоэлемент с тремя системами электродов

Вполне очевидно, что емкость между электродами 1-2' (или 1'-2) будет меньше, чем емкость между электродами 1-1' (2-2'), поэтому в зависимости от толщины пьезоэлемента на них можно получить электрическое напряжение в несколько раз большее, чем на электродах 1-1' или 2-2' [7]. Если теперь разнести электроды 1 и 2 и 1' и 2' друг от друга, чувствительность пьезопреобразователя по напряжению увеличится еще больше (рис.5).

Следует отметить, что пространственное расположение электродов друг относительно друга и их коммутация приводит не только к изменению емкости между электродами и чувствительности, но и к изменению динамических характеристик (АЧХ, импульсной и переходной). Для датчиков могут использоваться также пьезоэлементы дисковой формы с электродами в виде полудисков, дисков и колец, пьезоэлементы в форме полых цилиндров и др. [7].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Обратная связь (ОС) позволяет изменять характеристики систем автоматического регулирования (входное и выходное сопротивление, постоянную времени, динамические характеристики и т.д.) [8]. ОС также широко используется и в измерительной технике [1, 2, 9]. Например, положительная ОС позволяет возбудить в пьезопреобразователях резонансные колебания и строить на этой основе датчики различных физических величин [10], а отрицательная ОС дает возможность линеаризовать их градуировочные характеристики [11, 26]. Обратная связь обладает уникальными свойствами и позволяет улучшать параметры измерительных устройств. В виду того, что выходная величина пьезодатчиков (заряда или напряжения) зависит не только от механического воздействия (силы, давления, ускорения, т.е. от прямого пьезоэффекта), но и от электрического напряжения

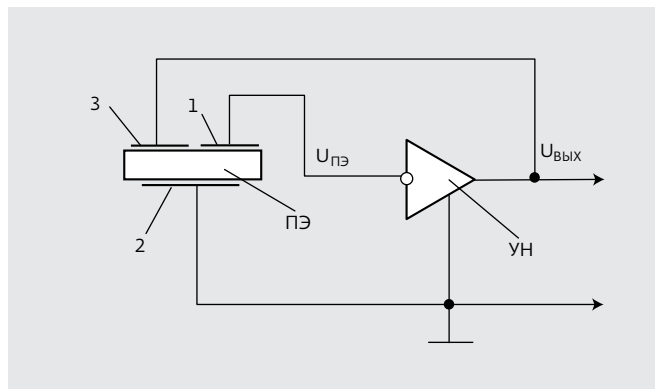


Рис.6. Пьезоэлектрический преобразователь с обратной связью

(обратного пьезоэффекта), было предложено вводить отрицательную обратную связь по вспомогательному каналу. Он создавался с помощью дополнительной системы электродов или дополнительного пьезоэлемента, располагаемого по отношению к основному пьезоэлементу планарно или компланарно.

Один из вариантов пьезокерамического преобразователя с обратной связью, реализующего предложенный метод (рис.6) [1, 2, 7], представляет собой замкнутую статическую следящую систему [8, 9] и состоит из пьезоэлемента (ПЭ) и согласующего усилителя напряжения (УН). На пьезоэлемент нанесены три электрода 1, 2 и 3, причем электрод 1 подключен к входу согласующего усилителя напряжения, электрод 2 – к общему проводу схемы, а электрод 3 (дополнительный электрод пьезоэлемента) – к выходу согласующего усилителя напряжения.

В связи с тем, что электроды могут располагаться на различных гранях пьезоэлемента, обратная связь в этом случае названа

пространственной. Передаточная функция такого устройства имеет вид:

$$W_{OC}(p) = W_1(p) \frac{W_{ПР}(p)}{1 + W_{ПР}(p)\beta(p)}, \quad (1)$$

где $W_1(p)$ – коэффициент передачи цепи прямого преобразования, не охваченной ОС; $W_{ПР}(p)$ – коэффициент передачи цепи прямого преобразования, охваченной ОС; $\beta(p)$ – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Относительную погрешность устройства, изображенного на рис.6, можно определить по формуле [1, 2]:

$$\gamma_{OC} = \gamma_w \frac{1}{1 + W(p)\beta(p)} - \gamma_w \left(1 - \frac{1}{1 + W(p)\beta(p)}\right), \quad (2)$$

где γ_w – относительная погрешность цепи прямого преобразования, охваченной ОС.

Из этого выражения нетрудно увидеть условие, при котором погрешность пьезодатчика с ОС будет равна нулю, т.е. $\gamma_{OC} = 0$:

$$W(p)\beta(p) = 1. \quad (3)$$

Нужно отметить, что чувствительность датчика при выполнении этого условия уменьшится вдвое. Также в этом случае различное расположение векторов F , P , $E_{ВХ}$, $E_{ОС}$ позволяет получить, например, для пьезоэлемента в форме параллелепипеда, десятки (!) вариантов датчиков с различными характеристиками.

ВКЛЮЧЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

В основу создания таких датчиков положена идея о том, что если пьезоэлемент (пьезоэлементы)

включить в схему электрического фильтра, то АЧХ датчиков будут соответствовать АЧХ фильтра [2, 7, 15]. Электрические фильтры достаточно хорошо изучены и описаны в литературе [12-14]. Они служат для выделения (или подавления) электрических напряжений или токов заданной частоты. В зависимости от характеристик известно несколько типов фильтров, из которых наибольший интерес для данного случая представляют фильтры нижних частот (ФНЧ) и фильтры верхних частот (ФВЧ) (рис.7, [7]). ФНЧ пропускают колебания всех частот от постоянного тока до некоторой верхней граничной частоты ω_v , а ФВЧ – колебания от некоторой нижней граничной частоты ω_n до бесконечно высокой.

Недостатком этих датчиков является использование в некоторых схемах двух пьезоэлементов или пьезоэлемента и конденсатора. Для устранения этого недостатка в схемах датчиков предложено применять пьезотрансформаторы, т.е. пьезоэлементы с двумя системами электродов. Электроды на пьезоэлементе должны располагаться таким образом, чтобы вектор электрического поля между электродами находился под углом α к вектору поляризации ($0 < \alpha \leq 90^\circ$), что позволяет получить на этих электродах напряжение, превышающее напряжение для традиционного случая, когда $\alpha = 0$ [7, 15] (рис.8).

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБАВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Суть этой технологии заключается в том, что к пьезоэлементу присоединяют дополнительные элементы, которые изменяют характеристики датчика. Здесь возможны как минимум два варианта. В первом случае, к пьезоэлементу механически присоединяется

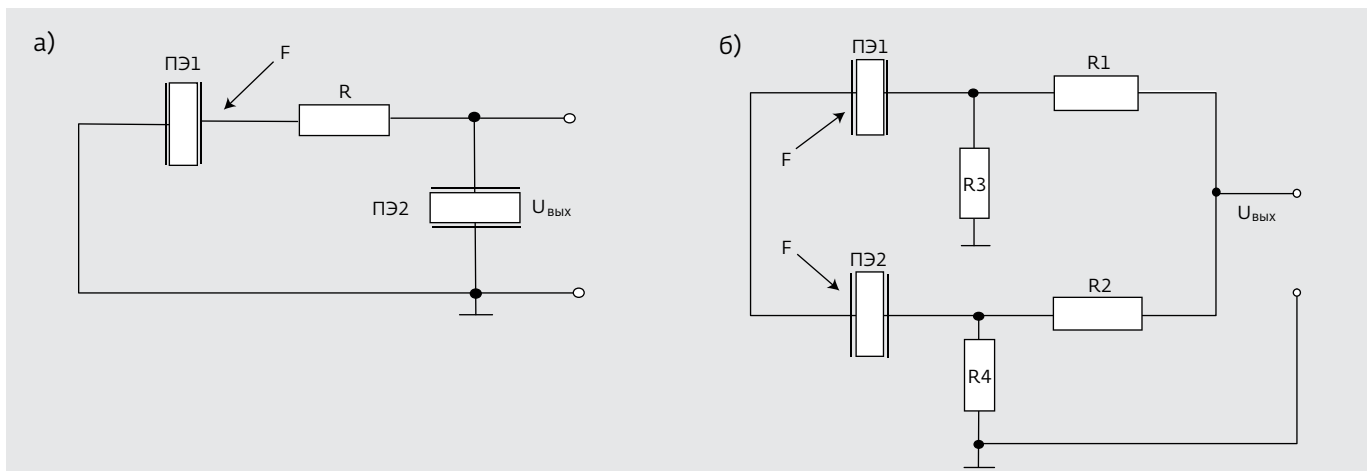


Рис.7. Датчики с пьезоэлементами в схемах электрических фильтров: а) в схеме ФНЧ; б) в схеме ФВЧ

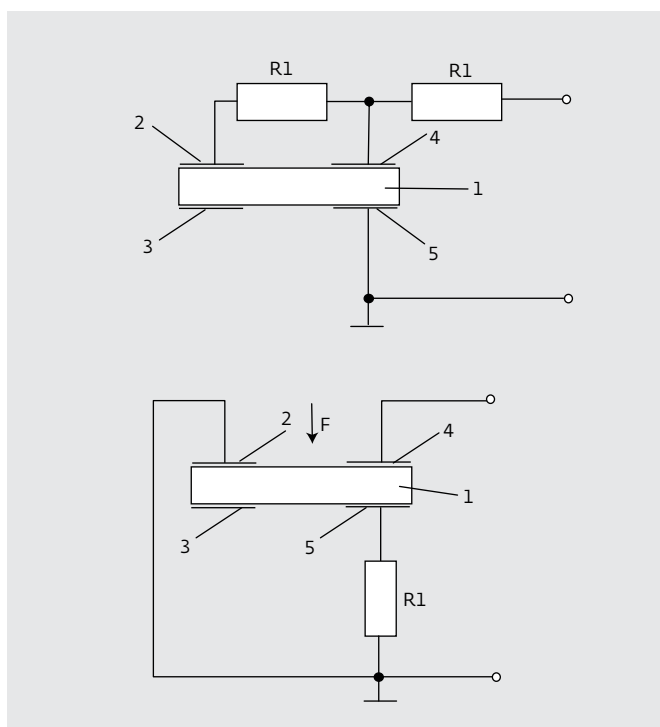


Рис.8. Датчики с пьезотрансформаторами в схемах электрических фильтров: а) в схеме ФНЧ; б) в схеме ФВЧ

второй пьезоэлемент, металлическая пластина или ультразвуковой концентратор [1, 7]. Во втором случае, к пьезоэлементу электрически присоединяется емкость, индуктивность, колебательный контур, пьезоэлемент или его часть [1, 7, 22].

Два пьезоэлемента, соединенные между собой механически и электрически (симметричный биморфный пьезоэлемент), позволяют увеличить чувствительность в 10–20 раз и во столько же раз уменьшить резонансную частоту. Соединение пьезоэлемента с металлической пластиной (асимметричный биморфный пьезоэлемент) также на порядок увеличивает чувствительность и уменьшает резонансную частоту. В биморфных пьезоэлементах возникают изгибные колебания, что позволяет использовать их в микроэлектромеханических системах и устройствах (МЭМС), например, в сканерах наномикроскопов [17–19].

Присоединение ультразвукового концентратора к пьезоэлементу [20] увеличивает амплитуду колебательного смещения (или скорости), что дает возможность использовать такие устройства для ультразвуковой резки, мойки, распыления жидкости, а также в измерительных устройствах на основе резонансных

пьезоэлементов [2, 7]. Не менее перспективно использование концентраторов для увеличения мощности ультразвуковых излучателей, а также полуволновых объемных резонаторов [22].

В связи с тем, что пьезоэлемент является электромеханическим устройством, которому соответствует электрическая цепь (в частном случае – последовательно-параллельный колебательный контур), подключение к нему электрических элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) меняет характеристики преобразователей. Например, подключение последовательно с пьезоэлементом резистора уменьшает добротность пьезоэлемента и расширяет рабочую полосу частот [26, 27]. Включение емкости между входной и выходной системами электродов пьезотрансформаторного датчика также позволяет расширить рабочий диапазон частот [7]. Подключение индуктивности последовательно увеличивает уровень акустической мощности пьезоизлучателя, расширяет полосу пропускания датчика и т.д. [22]. Результаты исследований в этой области будут опубликованы в следующих номерах журнала.

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ФОРМУ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Изменение формы электрического сигнала, поступающего на преобразователь, может привести к изменению его технических характеристик. Например, если подать на электроакустический преобразователь электрическое напряжение в форме меандра, АЧХ такого преобразователя расширяется в сторону низких частот [27]. При подаче на пьезоэлемент одновременно двух сигналов могут быть получены новые свойства и функции преобразователя. Например, если подать на пьезоэлемент с двумя входами два сигнала синусоидальной формы, близкие к его резонансной частоте, может быть получен низкочастотный сигнал достаточно высокой мощности [23–25].

Итак, при использовании описанных выше технологий из одного пьезоэлемента могут быть получены сотни (!) вариантов преобразователей с различными характеристиками, среди которых можно выбрать вариант с необходимыми или наилучшими характеристиками (повышение точности, стабильности, чувствительности, расширение рабочего диапазона частот и т.д.) Сегодня разработаны технологии

проектирования (синтеза) преобразователей с использованием пространственной энергосиловой структуры, пространственной электромеханической обратной связи, пространственного расположения и коммутации электродов пьезоэлемента, технологии включения пьезорезонаторов и пьезотрансформаторов в схемы электрических фильтров и технологии присоединения к пьезоэлементу добавочных элементов и т.д. По результатам работ по этой тематике получено около 100 патентов СССР, РФ и Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.** Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006.
2. **Sharapov V.** Piezoceramic sensors. Springer Verlag, 2010.
3. Датчики./Под ред. **В.М. Шарапова и Е.С. Полищука.** – М.: Техносфера, 2012.
4. **Фрайден Дж.** Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005.
5. **Кудряшов Э.А., Магер В.Е., Рафиков Ш.М.** Поперечные пьезоэлементы для датчиков силы и давления. – Приборы и системы управления, 1989, №9, с.9–10.
6. **Sharapov V., Vladisauskas, Bazilo K., Kunitskaya L., Sotula Zh.** Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. – Ultrasound, 2009, №4(64), с.44–50.
7. **Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г.** Пьезокерамические трансформаторы и датчики./Под ред. В.М. Шарапова. – Черкаси: Вертикаль, 2010.
8. **Макаров И.М., Менский Б.М.** Линейные автоматические системы. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977.
9. **Островский Л.А.** Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971.
10. **Малов В.В.** Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоиздат, 1989.
11. **Минаев И.Г., Трофимов А.И., Шарапов В.М.** К вопросу о линеаризации выходных характеристик пьезоэлектрических силоизмерительных преобразователей. – Изв. вузов СССР, Приборостроение, 1975, № 3.
12. **Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г.** Справочник по активным фильтрам. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1983.
14. **Кауфман М., Сидман А.Г.** Практическое руководство по расчетам схем в электронике. Справочник в 2 т., т.2. Пер. с англ. под ред. Ф.Н. Покровского. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
15. **Sharapov V., Kazys R., Vladisauskas A., Kunitskaya L., Sotula Zh., Tuz V., Bazilo K.** Transducers with piezoelements in schemes of electric filters. – Ultrasound, 2010, №1(65).
16. **Лавриненко В.В.** Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975.
17. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004.
18. **Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S.** Bimorph cylindrical piezoceramic scanner for scanning probe nanomicroscopes. – Ultrasound, 2009, №4(64).
19. **Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S.** Piezoceramic scanners on the basis of planar bimorph piezoelements for scanning probe nanomicroscopes. – Ultrasound, 2010, №1(65).
20. Ультразвук. Маленькая энциклопедия./Под ред. И.П. Голяминой – М.: Сов. энциклопедия, 1979.
21. Магнитные и диэлектрические приборы./Под ред. Г.В. Катца, ч.1. – М.: Энергия, 1964.
22. **Шарапов В.М., Сотула Ж.В.** Пьезоэлектрические электроакустические преобразователи. – Черкассы: Вертикаль, 2012.
23. **Шарапов В.М., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г., Базило К.В.** Об одном способе создания низкочастотных колебаний с помощью пьезокерамического излучателя. – Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2010, №1.
24. **Шарапов В.М.** и др. Сумматоры на основе дискового мономорфного пьезотрансформатора. – Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2009, №4.
25. **Шарапов В.М.** и др. Исследование пьезокерамического сумматора на основе биморфного пьезоэлемента. – Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2009, №4.
26. **Шарапов В.М., Балковская Ю.Ю., Мусиенко М.П.** Линеаризация амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрических преобразователей с мономорфным или биморфным чувствительным элементом. – Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2002, №1, с.41–45.
27. **Sharapov V., Musiyenko M., Sotula Zh, Kunitskaya L.** About the effect of expansion of reproduced frequency band by electroacoustic transducer. – Ultrasound, 2009, №3(64), с.7–10.
28. **Мэзон У.** Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1952.
29. **Коржик А.В.** Гидроакустические устройства на основе многомодовых пьезокерамических преобразователей. Дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. – НТУУ "КПИ", Киев, 2011.
30. **Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А.** и др. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988.