

Д. т. н. В. М. ШАРАПОВ, к. т. н. М. П. МУСИЕНКО

Украина, Черкасский гос. технологический университет
E-mail: v_sharapov@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
04.02 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. НОВИКОВ
("Авангард-Элионика", г. С.-Петербург)

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Разработаны новые типы пьезокерамических датчиков линейных и вибрационных ускорений, вязкости, звукового давления, электроакустики и др.

Пьезокерамические датчики широко применяются для измерения многих физических величин — силы, динамического и статического давления, линейных и вибрационных ускорений, вязкости и др. [1, 2]. Они обладают высокой чувствительностью и жесткостью (ничтожная деформация при нагрузке), малыми габаритами и массой, высокой помехозащищенностью, малым уровнем собственных шумов, повышенной радиационной стойкостью, технологичностью изготовления и т. д.

Однако пьезокерамические датчики обладают и недостатками — сравнительно узким рабочим частотным диапазоном (который ограничен сверху резонансной частотой), относительно малой температурной и временной стабильностью параметров, точностью и др.

Широкое применение нашли так называемые биморфные пьезопреобразователи (т. е. состоящие из двух пьезоэлементов — «симметричные» биморфные пьезоэлементы), что позволило на порядок (а не в два раза!) повысить чувствительность, но при этом был сужен частотный диапазон. Замена одного пьезоэлемента на металлическую пластину (асимметричный биморфный пьезоэлемент) повысила механическую прочность пьезоэлемента.

В данной работе описан разработанный авторами комплекс пьезокерамических датчиков с улучшенными техническими и метрологическими характеристиками.

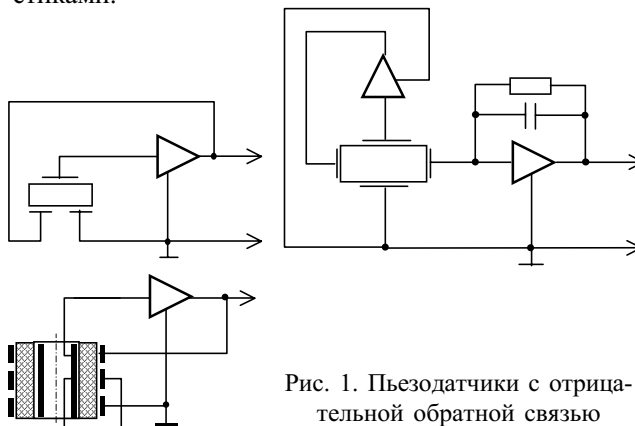


Рис. 1. Пьезодатчики с отрицательной обратной связью

Для повышения точности, температурной и временной стабильности, расширения рабочего диапазона частот было предложено вводить пространственную электромеханическую отрицательную обратную связь (ООС) [3, 4]. Некоторые примеры схем датчиков с ООС показаны на рис. 1.

ООС может быть введена с помощью дополнительных электродов на пьезоэлементе или с помощью дополнительных пьезоэлементов, расположенных планарно или компланарно с основным пьезоэлементом. Амплитудно-частотные характеристики для преобразователей с ООС и без нее при разных значениях коэффициента усиления усилителя напряжения K_{yc} представлены на рис. 2.

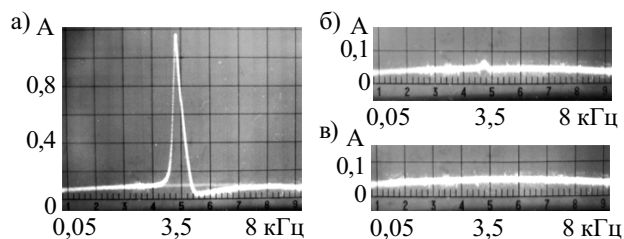


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики пьезопреобразователей:

а — без ООС; б — с ООС ($K_{yc}=8$); в — с ООС ($K_{yc}=7$)

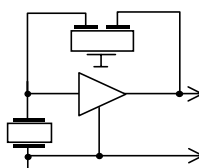


Рис. 3

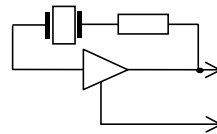


Рис. 4

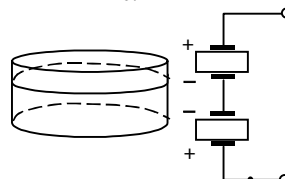


Рис. 5

Авторами разработан и ряд других методов линейризации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезокерамических датчиков, что приводит к расширению рабочего диапазона всей контрольно-измерительной системы в целом [5]. Линейризация АЧХ достигается за счет использования в цепи ООС пьезотрансформаторов (рис. 3), электрического демпфирования колебательной системы добавочными резисторами (рис. 4), встречного включения дополнительных пьезоэлементов различной толщины (рис. 5).

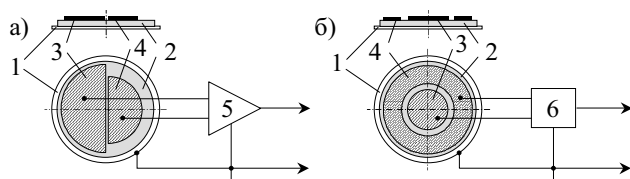


Рис. 6. Пьезокерамические датчики с расширенным рабочим диапазоном частот:

1 — металлическая пластина; 2 — пьезоэлемент; 3, 4 — электроды; 5 — дифференциальный усилитель; 6 — делитель напряжения

Интересным является метод расширения рабочего диапазона частот за счет вычитания (рис. 6, а) или деления (рис. 6, б) двух напряжений, которые образуются в одном пьезоэлементе от электродов с разными размерами и формой [6, 7].

Создание триморфных пьезоэлементов (т. е. состоящих из металлической пластины и двух пьезоэлементов) и включение одного из пьезоэлементов в цепь обратной связи усилителя дает возможность не только активно управлять чувствительностью, но и расширить частотный диапазон за счет подавления резонансных пиков, повысить точность пьезопреобразователей и др. [3, 8]. В зависимости от расположения пьезоэлементов и металлической пластины, а также схемы включения этих пьезоэлементов в цепь усилителя, могут быть получены симметричные и асимметричные планарные и компланарные преобразователи (18 схем), обладающие характеристиками как резонансных, так и апериодических элементов.

Для управления характеристиками резонансных пьезопреобразователей может быть использована как отрицательная обратная связь, так и впервые примененные одним из авторов еще в 1976 г. ультразвуковые концентраторы [9].

Перспективными методами улучшения характеристик пьезокерамических датчиков (ПД) являются конструктивные изменения самого пьезоэлемента. Характеристики пьезоэлемента зависят от взаимного расположения трех векторов — вектора поляризации P , вектора действующей на пьезоэлемент силы F , а также вектора напряженности электрического поля выходного сигнала E (рис. 7) [10].

Традиционные ПД, в которых все три вектора параллельны (рис. 7, а), являются колебательными системами с высокой добротностью и узким рабочим диапазоном частот (рис. 7, б). Если оставить

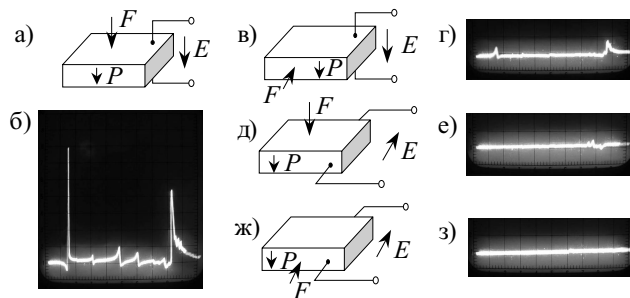


Рис. 7. Типы и их пьезокерамических датчиков АЧХ: а — традиционный и его АЧХ (б); в — поперечный и его АЧХ (г); д — доменно-диссипативный и его АЧХ (е); ж — поперечный доменно-диссипативный и его АЧХ (з)

вектор поляризации P неизменным, а направления двух других изменять, то можно получить 9 комбинаций взаимного расположения векторов. Например если вектор F перпендикулярен векторам P и E , то такой преобразователь называют поперечным (рис. 7, в, г). Если вектор E перпендикулярен векторам P и F (рис. 7, д), то такой преобразователь будет представлять собой дифференцирующую цепь с инерционными свойствами и широким рабочим диапазоном частот (рис. 7, е). (Он был назван авторами доменно-диссипативным ПД.) Если векторы E и F перпендикулярны вектору P (рис. 7, ж), такой преобразователь назван поперечным доменно-диссипативным ПД. Он обладает наибольшей линейностью АЧХ и шириной рабочего диапазона (рис. 7, з).

Таким образом, выбирая направления векторов P , F и E , из одного пьезоэлемента можно синтезировать 27(!) вариантов датчиков с принципиально отличающимися свойствами.

Большой интерес представляют доменно-диссипативные пьезодатчики (ДДП) с обратной связью. Авторами было установлено, что введение обратной связи в доменно-диссипативные преобразователи позволяет изменять чувствительность, а также изменять постоянную времени переходного процесса, превращая тем самым колебательный пьезоэлемент в дифференцирующие инерционные, дифференцирующие идеальные и идеальные усилительные звенья [11]. Кроме того, было определено, что наибольшей линейностью амплитудно-частотной характеристики обладает ДДП, у которого все три вектора напряженности электрического поля — возбуждающего напряжения $E_{\text{ген}}$, электрического поля выходного сигнала $E_{\text{вых}}$ и обратной связи $E_{\text{ос}}$ — перпендикулярны вектору поляризации P .

Авторами разработан ряд конструкций пьезокерамических акселерометров, характеристики которых не уступают характеристикам образцов зарубежных фирм-лидеров. В некоторых конструкциях этих акселерометров отсутствуют традиционные для них инерционная масса и упругий элемент. Разработанные акселерометры имеют ряд достоинств: они просты, имеют малые габариты, узкую диаграмму направленности, широкую полосу частот, повышенную точность.

Некоторые конструкции акселерометров показаны на рис. 8 [12]. Для уменьшения боковой чувствительности предложено использовать конструкции с

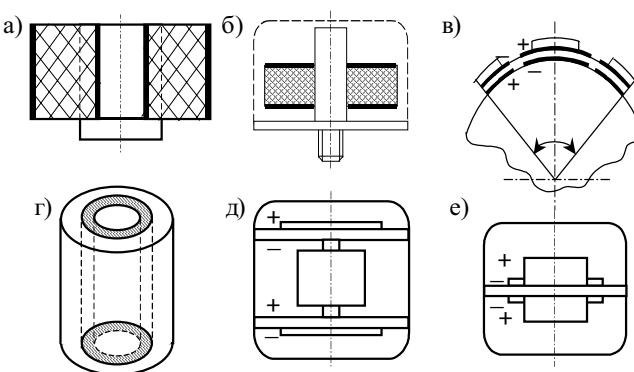


Рис. 8. Конструкции акселерометров

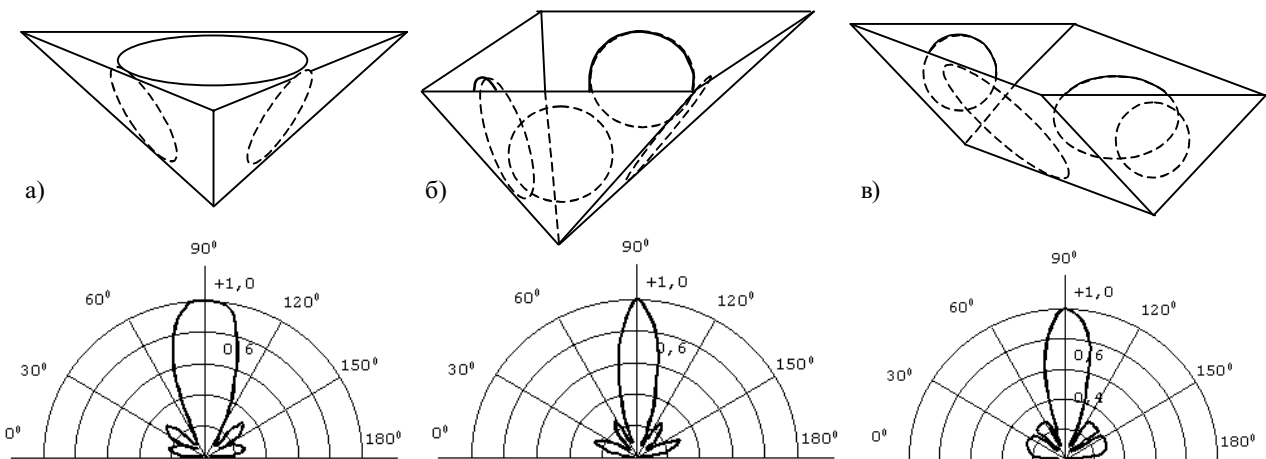


Рис. 9. Объемные излучатели на основе биморфных пьезоэлектрических преобразователей в виде треугольной пирамиды (а, 11 кГц), прямоугольной пирамиды (б, 11,6 кГц) и призмы с треугольными и прямоугольными преобразователями (в, 11,5 кГц)

полной осевой симметрией (рис. 8, а, б). Узкой диаграммой направленности обладают акселерометры с основанием в виде шара с пьезоэлементами в виде сферических сегментов (рис. 8, в). Повышение чувствительности достигается за счет использования деформации на срез (рис. 8, а, б, з). Большей чувствительностью обладают биморфные (рис. 8, д) и триморфные (рис. 8, е) акселерометры.

Другой областью применения пьезодатчиков является электроакустика. Широко известны биморфные электроакустические пьезодатчики с круглыми пьезоэлементом и металлической пластиной. Однако такие преобразователи имеют сравнительно низкую чувствительность с расщепленной диаграммой направленности.

Сужения диаграммы направленности удалось достичь за счет изменения формы металлической пластины. Кроме того, выбором оптимального соотношения площадей пьезоэлемента и пластины достигается увеличение чувствительности преобразователей. Еще более узкая диаграмма направленности достигается за счет использования объемных конструкций, которые показаны на **рис. 9** [13].

Разработаны также новые способы и устройства для измерения диссипативных характеристик жидкостей и механического контакта [14].

Разработанные датчики физических величин обладают более высокими техническими и метрологическими характеристиками — точностью, стабильностью, широкой рабочей полосой частот, узкой диаграммой направленности. По результатам разработок получено около 100 патентов СССР, РФ и Украины, опубликовано более 100 научных работ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Мусиенко М. П. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. — Черкассы: ЧГТУ, 2004.
2. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. — СПб: Политехника, 1994.

3. Sharapov V., Sarvar I., Chudaeva I., Musienko M. The electromechanical feed-back in piezoceramic sensors and transducers / IEEE. International Ultrasonics Symposium.— Sendai, Japan.— 1998.— P. 328.

4. Шарапов В. М., Чудаева И. Б., Мусиенко М. П. и др. Обратная связь в пьезоэлектрических преобразователях механических величин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 1999.— № 2.— С. 64—67.

5. Шарапов В. М., Балковская Ю. Ю. Методы линеаризации АЧХ пьезокерамических преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2002.— № 4.— С. 48—52.

6. Пат. 61500 А України. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / В. М. Шарапов, М. П. Мусієнко, Ю. Ю. Балковська.— 2003.— Бюл. № 11.

7. Пат. 61501 А України. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / В. М. Шарапов, М. П. Мусієнко, Ю. Ю. Балковська.— 2003.— Бюл. № 11.

8. Шарапов В. М., Лега Ю. Г., Мусиенко М. П. и др. Исследование симметричных компланарных триморфных пьезопреобразователей давления с обратной связью // Вісник Черкаського інженерно-технологіч. ін-ту.— 2001.— № 2.— С. 33—38.

9. Шарапов В. М., Лега Ю. Г., Мусиенко М. П. и др. Резонансные пьезопреобразователи с ультразвуковыми концентраторами // Там же.— 1999.— № 3.— С. 30—34.

10. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Балковская Ю. Ю. Об одной классификации пьезокерамических преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2003.— № 3.— С. 116—120.

11. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. Доменно-диссипативные пьезоэлектрические преобразователи с обратной связью // Там же.— 2004.— № 1.— С. 74—79.

12. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Бондаренко Ю. Ю., Кисиль Т. Ю. Пьезокерамические акселерометры // Мат-лы II междунар. науч.-практич. конф. «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». — Донецк.— 2004.— С. 40—43.

13. Шарапов В. М., Роттэ С. В. Исследование объемных пьезоэлектрических излучателей на основе асимметричных биморфных преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2002.— № 2.— С. 53—58.

14. Шарапов В. М., Кисиль Т. Ю. Об одном способе измерения фактической площади контакта // Там же.— С. 84—87.