

ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Шарапов В.М., д.т.н., профессор

Черкасский государственный технологический университет

Описані технології синтезу п'єзокерамічних датчиків.

Ключові слова: п'єзодатчик, зворотний зв'язок, фільтр.

The technologies of synthesis of piezoelectric sensors are described.

Key words: piezosensor, feedback, filter.

Пьезоэлектрические преобразователи и датчики широко применяются в гидроакустике, электроакустике, в ультразвуковой, медицинской, измерительной технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях и в других областях науки и техники [1, 2].

Особое место пьезоэлектрические преобразователи занимают в гидроакустике, 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, как правило, в электрический сигнал (напряжение, ток, частоту, фазу и т.п.) [3, 4]. Другими словами, датчик (сенсор) – это преобразователь для получения измерительной информации. В данной работе эти термины используются, как равнозначные.

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

Это связано, очевидно, с тем, что эти электроды используют для поляризации пьезоэлемента при изготовлении. Одновременно они используются также для снятия полезного сигнала при измерении физических величин

(силы, давления, ускорения и др.), а также для введения в пьезоэлемент электрического напряжения при использовании пьезоэлемента в качестве излучателя.

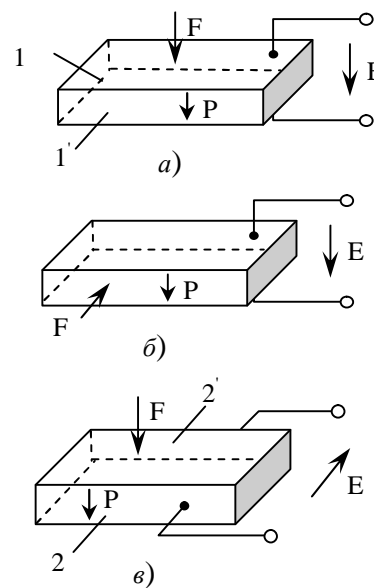


Рис. 1. Тип пространственной энергосиловой структуры пьезоэлемента:
а) – традиционный; б) – поперечный;
в) доменно-диссипативный

Такой тип датчика известен и назван традиционным [1]. Для этого случая для определенного пьезоэлемента можно получить **только один датчик** с определенными характеристиками (резонансная частота, чувствительность, диапазон рабочих частот и др.). Для получения датчика с другими характеристиками ранее было необходимо использовать другой пьезоэлемент, иного размера, иной формы, из иного пьезоматериала.

1. Пространственная энергосиловая структура

В работе [1] было предложено при проектировании датчиков 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 датчика все три вектора параллельны оси Z ($F \downarrow P \downarrow E \downarrow$) (рис. 1, а).

Как мы уже отмечали, это известный (традиционный) вариант расположения векторов F , P , E (пространственной энергосиловой структуры).

Реже используются датчики, в которых пьезоэлемент располагается таким образом, что вектор силы F перпендикулярен вектору поляризации P (фиг. 1, б). Такой тип датчика был назван поперечным [5].

Очень интересным оказался вариант датчика, у которого выходной сигнал снимается с электродов 2-2' (рис. 1, в).

В этом случае вектор E перпендикулярен вектору P . Такой тип датчика 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]:

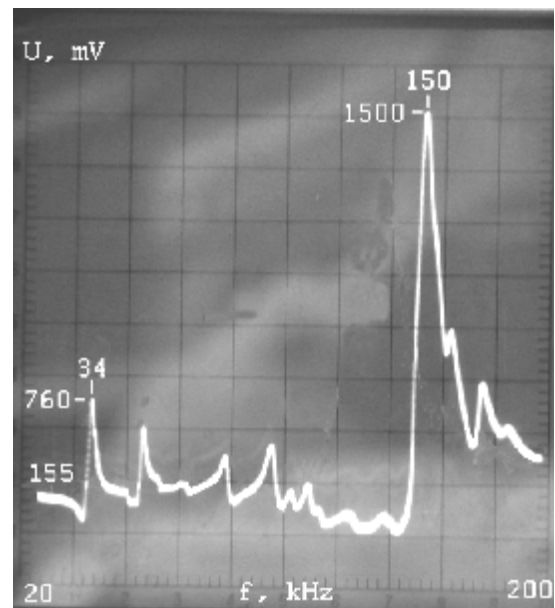
- рассеяние энергии на доменах;
- изменение электрической емкости между электродами;
- возникновение в пьезоэлементе других типов колебаний.

Определение возможного вклада каждого из перечисленных факторов требует дальнейшего изучения.

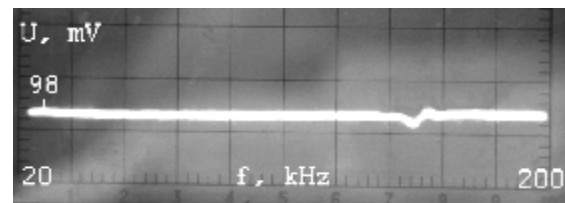
Приведенные на рис.1 конструктивные схемы преобразователей, естественно, не исчерпывают возможные варианты их исполнения. Всего же для одного пьезоэлемента в виде прямоугольного параллелепипеда можно получить 27 (!) вариантов преобразователей с различными характеристиками [1, 2, 6, 7].

На рис. 2 показаны экспериментальные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) преобразователей, изображенных на рис. 1. Эти преобразователи были изготовлены из пьезоэлемента с размерами $9 \times 10 \times 90$ мм из пьезокерамики ЦТС-19 (аналог PZT-5A).

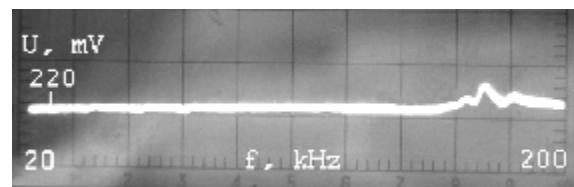
Измерения АЧХ проводились в пьезотрансформаторном режиме с помощью прибора для исследования АЧХ Х1-46, а фотографирование характеристик производилось цифровой камерой «Nikon-D90».



а)



б)

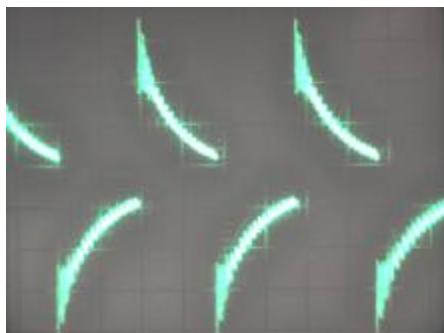


в)

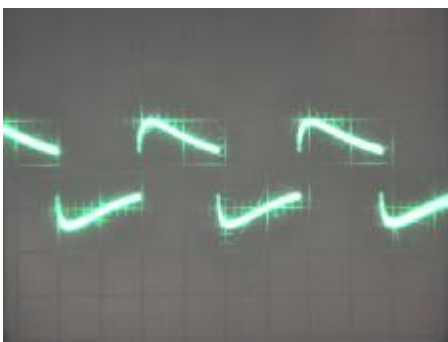
Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики преобразователей, показанных на рис. 1: а) – рис. 1, а; б) рис. 1, б; в) рис. 1, в

На рис. 3 показаны переходные характеристики преобразователей, показанных на рис. 1.

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



a)



б)



в)

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

2. Пространственное расположение и коммутация электродов пьезоэлемента

Изменение положения вектора электрического поля выходного сигнала **E** можно осуществить и для традиционного пьезоэлемента делением электродов пьезоэлемента на части и подключением этих частей таким образом, чтобы угол α между вектором **E** и вектором поляризации **P** $0 < \alpha < 90^\circ$ (рис. 4).

Как известно, пьезоэлемент с двумя и более системами электродов называют пьезотрансформатором [7].

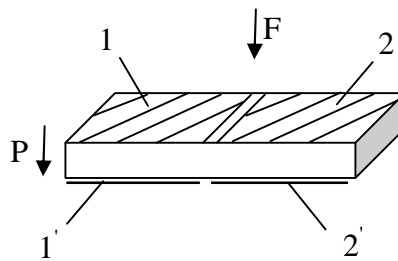


Рис. 4. Традиционный пьезоэлемент с разделенными электродами

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.

Вполне очевидно, что емкость между электродами 1–2' (или 1'–2) будет меньше, чем емкость между электродами 1–2 (1'–2'), поэтому на этих электродах в зависимости от толщины пьезоэлемента можно получить электрическое напряжение в несколько раз больше, чем на электродах 1–1' или 2–2' [7].

Если теперь разнести электроды 1 и 2 и 1' и 2' друг от друга (для чего можно разделить исходные электроды на три части (рис. 5), чувствительность пьезодатчика по напряжению увеличится еще больше.

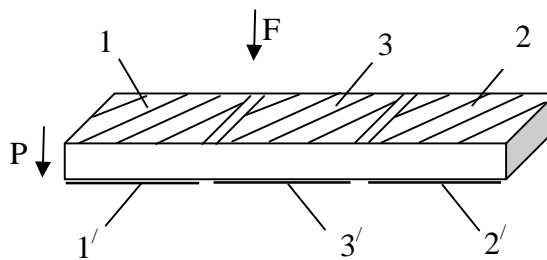


Рис. 5. Пьезоэлемент с тремя системами электродов

Следует отметить, что пространственное расположение электродов и их коммутация друг относительно друга приводит не только к изменению емкости между электродами и чувствительности, но и к изменению динамических характеристик (АЧХ, импульсной и переходной характеристик).

Для датчиков могут использоваться также пьезоэлементы дисковой формы с электродами в виде полудисков, дисков и колец, пьезоэлементы в форме полых цилиндров и др. [7].

3. Пространственная электромеханическая обратная связь

Как известно, обратная связь (ОС) позволяет существенно изменять характеристики систем автоматического регулирования (входное и выходное сопротивление, постоянную времени, динамические характеристики и т.д.) [8]. Также широко используется ОС и в измерительной технике [1, 2, 9]. Например, положительная обратная связь позволяет возбудить в пьезопреобразователях резонансные колебания и строить на этой основе датчики различных физических величин [10], а отрицательная обратная связь в резонансных пьезопреобразователях дает возможность линеаризовать их градуировочные характеристики [11]. Обратная связь обладает уникальными свойствами и позволяет существенно улучшать параметры измерительных устройств. В виду того, что выходная величина пьезодатчиков (заряд или напряжение) зависит не только от механического воздействия (силы, давления, ускорения), т.е. прямого пьезоэффекта, но и от электрического напряжения – обратного пьезоэффекта, было предложено вводить отрицательную обратную связь по вспомогательному каналу, который создавался с помощью дополнительной системы электродов или дополнительного пьезоэлемента, располагаемого с основным планарно или компланарно.

Схема одного из многих вариантов пьезокерамического датчика с обратной связью, реализующая предложенный метод, показана на рис. 6 [1, 2, 7].

Датчик, изображенный на рис. 6, 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 ко входу согласующего усилителя напряжения, электрод 2 – к общему проводу схемы, а электрод 3 – дополнительный электрод пьезоэлемента – к выходу согласующего усилителя напряжения.

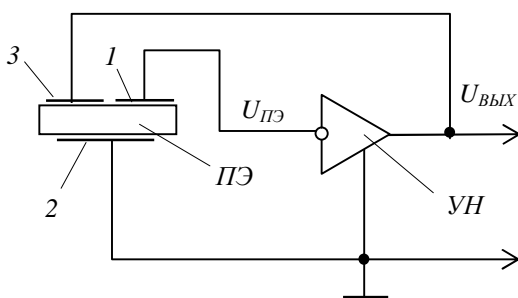


Рис. 6. Пьезоэлектрический преобразователь с обратной связью

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

$$W_{i\bar{n}}(p) = W_1(p) \frac{W_{iD}(p)}{1 + W_{iD}(p)b(p)}, \quad (1)$$

где $W_1(p)$ – коэффициент передачи цепи прямого преобразования, не охваченной ОС;

$W_{iD}(p)$ – коэффициент передачи цепи прямого преобразования, охваченной ОС;

$b(p)$ – коэффициент передачи цепи обратной связи.

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

$$g_{i\bar{n}} = g_w \frac{1}{1 + W(p)b(p)} - g_w \left(1 - \frac{1}{1 + W(p)b(p)}\right), \quad (2)$$

где g_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. $\gamma_{OC} = 0$:

$$W(p)b(p) = 1 \quad (3)$$

Любопытно отметить, что чувствительность датчика при $W(p)b(p) = 1$ уменьшится вдвое.

Следует также отметить, в этом случае различное расположение векторов F , P , $E_{ВХ}$, E_{OC} позволяет получить, например, для пьезоэлемента в форме параллелепипеда, десятки (!) вариантов датчиков с различными характеристиками.

4. 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 амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) датчиков будут соответствовать АЧХ фильтра [2, 7, 15].

Электрические фильтры достаточно хорошо изучены и описаны в литературе [12-14]. Электрическим фильтром называется устройство, служащее 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 и верхних частот. Фильтры нижних частот (ФНЧ) пропускают

колебания всех частот от постоянного тока и до некоторой верхней граничной частоты ω_b .

Фильтры верхних частот (ФВЧ) пропускают колебания от некоторой нижней граничной ω_n до бесконечно высокой.

Два варианта датчика с пьезоэлементами в схеме ФНЧ и ФВЧ, показаны на рис. 7 [7].

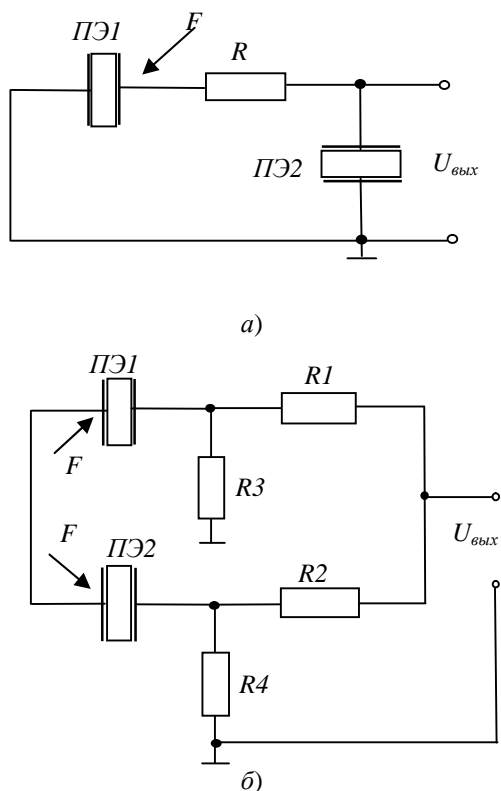


Рис. 7. Датчики с пьезоэлементами в схемах электрических фильтров: а) – в схеме ФНЧ; б) – в схеме ФВЧ

Недостатком этих датчиков является необходимость использования в некоторых схемах двух пьезоэлементов или пьезоэлемента и конденсатора. Для устранения этого недостатка предложено использовать в схемах датчиков пьезотрансформаторы, т.е. пьезоэлементы с двумя системами электродов. Кроме того, предложено электроды на пьезоэлементе располагать таким образом, чтобы вектор электрического поля между этими электродами находился под углом α к вектору поляризации ($0 < \alpha \leq 90^\circ$). Это позволяет получить на этих электродах электрическое напряжение, которое превышает напряжение для традиционного случая, когда $\alpha = 0$ [7, 15].

Две схемы датчиков, реализующих эти идеи, показано на рис. 8 [7].

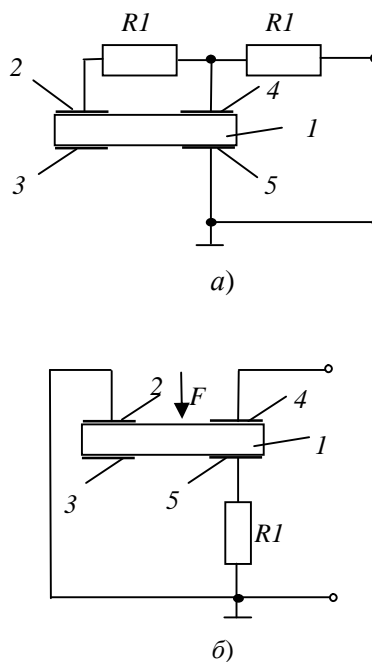


Рис. 8. Датчики с пьезотрансформаторами в схемах электрических фильтров: а) – в схеме ФНЧ; б) – в схеме ФВЧ

5. 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 второй пьезоэлемент, металлическая пластина или ультразвуковой концентратор [1, 7].

Во втором случае к пьезоэлементу электрически присоединяется емкость индуктивность, колебательный контур, пьезоэлемент или часть пьезоэлемента [1, 7].

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 и металлической пластины (асимметричный биморфный пьезоэлемент) также приводит к увеличению на порядок чувствительности и уменьшению резонансной частоты.

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 ам-

плитуду колебательного смещения (или скорости), что позволяет использовать такие устройства для ультразвуковой резки, мойки, распыления жидкости [21], а также в измерительных устройствах на основе резонансных пьезоэлементов [2, 7]. Не менее перспективным является использование концентраторов для увеличения мощности низкочастотных ультразвуковых излучателей [22, 23].

В связи с тем, что пьезоэлемент является электромеханическим устройством, которому соответствует электрическая цепь (в частном случае – последовательный колебательный контур), подключение к нему электрических элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) может менять характеристики пьезодатчиков.

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 между электродами пьезотрансформаторного датчика позволяет увеличить уровень выходного напряжения и акустической мощности пьезоизлучателя, расширять полосу пропускания датчика и др. Результаты исследований в этой области будут опубликованы в отдельной работе.

6. Технология синтеза преобразователей, учитывающая электрические сигналы

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 [29].

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 [22–25]. Мощность может быть увеличена, если на один из входов подать синусоидальный сигнал, а на второй вход – сигнал в виде меандра [30]. Весьма перспективные результаты могут быть получены, если на оба входа подать сигналы в форме меандра [31] или на один вход подать шумовой сигнал,

а на второй – синусоидальный [32]. Наконец, на один из входов пьезоэлемента с тремя системами электродов можно подать шумовой сигнал, а на второй и третий – сигнал в форме меандра [33].

7. Комбинированная технология

В этом случае используются одновременно или в различных комбинациях технологии, описанные выше. Нетрудно увидеть, что в этом случае из одного пьезоэлемента могут быть получены сотни (!) вариантов датчиков с различными характеристиками, среди которых можно выбрать вариант с необходимыми или наилучшими характеристиками (повышение точности, стабильности, чувствительности, расширение рабочего диапазона частот и др.)

Выводы

Разработаны технологии синтеза пьезодатчиков (преобразователей) при использовании пространственной энергосиловой структуры, пространственной электромеханической обратной связи, пространственного расположения и коммутации электродов пьезоэлемента, технология включения пьезорезонаторов и пьезотрансформаторов в схемы электрических фильтров, технология присоединения к пьезоэлементу добавочных элементов и др.

По результатам работы по этой тематике получено около 400 патентов СССР, РФ и Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Springer Verlag, 2010. – 570 p.
3. Датчики / Под ред. В.М.Шарапова и Е.С.Полищука. – Черкассы: Брама, 2008. – 1072 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
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., Vladisaukas, Bazilo K., Kunit-skaya L., Sotula Zh. Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2009. №4(64). – P. 44–50.
7. Пьезокерамические трансформаторы и датчики // В.М.Шарапов, И.Г.Минаев, Ж.В.Сотула, К.В.Базило, Л.Г.Куницкая. Под ред. В.М.Шарапова. – Черкаси: Вертикаль, 2010. – 278 с.
8. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. Учебное пособие

- для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
9. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств Л.: Энергия, 1971. – 544 с.
 10. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоиздат, 1989. – 272 с.
 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. – 128 с.
 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.
 15. Sharapov V., Kazys R., Vladisauskas A., Kunitskaya L., Sotula Zh., Tuz V., Bazilo K. Transducers with piezoelements in schemes of electric filters. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2010. №1(65).
 16. Патент України № 8609. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / Шарапов В.М., Трембовецька Р.В. Опубл. 15.08.2005. Бюл. №8.
 17. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии Москва: Техносфера, 2004. – 144 с.
 18. Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S. Bimorph cylindrical piezoceramic scanner for scanning probe nanomicroscopes. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2009. №4(64).
 19. Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S. Piezoceramic scanners on the basis of planar bimorph piezoelements for scanning probe nanomicroscopes. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2010. №1(65).
 20. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. Голяминой И.П.. М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.
 21. Патент України №49437. Ультразвуковий інгалятор/ В.М. Шарапов. Бюл. №8, 2010.
 22. Патент України № 49919. Спосіб створення ультразвукових коливань за допомогою п'єзоелектричного перетворювача / В.М. Шарапов. Бюл. №9, 2010.
 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», №1, 2010.
 24. Шарапов В.М. и др. Сумматоры на основе дискового мономорфного пьезотрансформатора / «Вісник Черкаського державного технологічного університету», №4, 2009.
 25. Шарапов В.М. и др. Исследование пьезокерамического сумматора на основе биморфного пьезоэлемента/ «Вісник Черкаського державного технологічного університету», №4, 2009.
 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. Шарапов В.М., Балковская Ю.Ю., Мусиенко М.П. Расширение рабочего диапазона частот пьезокерамических преобразователей с обратной связью / «Вісник Черкаського державного технологічного університету», №2, 2002. – С. 80–83.
 28. Патент України по заявці №u201001279 від 08.02.2010. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин.
 29. Sharapov V., Musiyenko M., Sotula Zh, Kunitskaya L. About the effect of expansion of reproduced frequency band by electroacoustic transducer. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2009. №3(64). – P. 7–10.
 30. Патент України по заявці №u201001280 від 08.08.2010. П'єзотрансформатор.
 31. Патент України по заявці №u201001281 від 08.08.2010. П'єзотрансформатор.
 32. Патент України по заявці №u201001282 від 08.08.2010. П'єзотрансформатор.
 33. Патент України по заявці №u201001283 від 08.08.2010. П'єзотрансформатор.
 34. Патент України по заявці №u201001284 від 08.08.2010. П'єзотрансформатор.

Шарапов В.М., д.т.н., професор, Черкаський державний технологічний університет.