

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ СОЗДАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Шарапов В.М., *д.т.н., профессор,*

Сотула Ж.В., *к.т.н.,*

Куницкая Л.Г.,

Базило К.В., *к.т.н.*

Черкасский государственный технологический университет

Статья посвящена новому способу отримання низькочастотних акустичних коливань за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів.

Проведено аналіз стану проблеми, що вивчається. Сформовані напрями подальших досліджень.

Ключові слова: *п'єзоелектричний перетворювач, низькочастотні акустичні коливання, біморфний п'єзоелемент.*

Пьезоэлектрические преобразователи широко применяются в гидроакустике, электроакустике, измерительной, медицинской технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях и в других областях науки и техники [1–12].

Особое место пьезоэлектрические преобразователи занимают в гидроакустике, являясь, по существу, ушами и глазами подводных и надводных кораблей [3, 7–10].

Гидроакустические преобразователи входят в состав гидроакустических антенн и предназначены для излучения и приема акустических сигналов в водной среде.

Наиболее широко в качестве гидроакустических преобразователей применяются мноморфные пьезоэлектрические преобразователи в форме полого цилиндра и биморфные пьезоэлементы дисковой формы [3, 7–10].

В данной работе рассмотрим возможность создания низкочастотных акустических колебаний с помощью пьезокерамических преобразователей на основе биморфных пьезоэлементов, что, собственно, и является **целью** статьи.

Биморфные преобразователи обычно состоят из дискового пьезоэлемента и металлической пластины, соединенных между собой с помощью клея или легкоплавкого припоя [3].

Резонансную частоту круглого биморфного элемента можно приближенно определить по формуле [10]:

$$f_0 \approx \frac{0,45ch}{r^2 \sqrt{1-m^2}}, \quad (1)$$

In the article a new way of low-frequency acoustic vibrations production by the means of piezoelectric fluctuations is described.

The considered problem status is analyzed. The further research policies are formed.

Key words: *piezoelectric transducer, low-frequency acoustic vibrations, bimorph.*

где $c = \sqrt{Er}$;

h – толщина пьезоэлемента;

r – радиус пьезоэлемента;

E – модуль Юнга;

ρ – плотность материала пьезоэлемента;

μ – коэффициент Пуассона.

Как следует из формулы (1), уменьшение резонансной частоты биморфного элемента возможно, в основном, за счет уменьшения толщины пьезоэлемента, а также увеличения его радиуса, т.е. увеличения габаритов. Изменение этих параметров имеет свои технологические и габаритные ограничения. На практике резонансная частота применяемых биморфных элементов составляет обычно несколько килогерц [3].

Между тем, известно, что низкочастотный звук распространяется в воде практически без затухания на расстояния до нескольких тысяч километров благодаря формированию в верхнем слое океана подводного звукового канала – акустического волновода рефракционного типа. Именно благодаря этому низкочастотная акустика имеет очевидные преимущества в решении широкого круга задач, в том числе, и оборонных [11–13]. Среди этих задач можно также отметить, создание звуковых каналов на расстояния до нескольких тысяч километров, например, Камчатка – Гавайи (4700 км), а также создание системы ультразвукового освещения подводной обстановки и др. [20].

Как правило, пьезокерамические излучатели работают на резонансной частоте, так как при работе в дорезонансной области они имеют низкую эффективность [3,7–10].

Однако снижение резонансной частоты приводит к существенному увеличению габаритов излучателя. Например, излучатель с рабочей частотой 20,5 Гц, разработанный ИПФ РАН (г. Нижний Новгород), имеет массу 4500 кг и диаметр более 3 метров (рис. 1) [17, 20].



Рис. 1. Автономный излучающий комплекс (f = 20,5 Гц) ИПФ РАН [20]

К настоящему времени известно значительное количество технических решений низкочастотных пьезокерамических излучателей [13, 17, 20]. На рис. 2 показаны схемы некоторых из них [20].

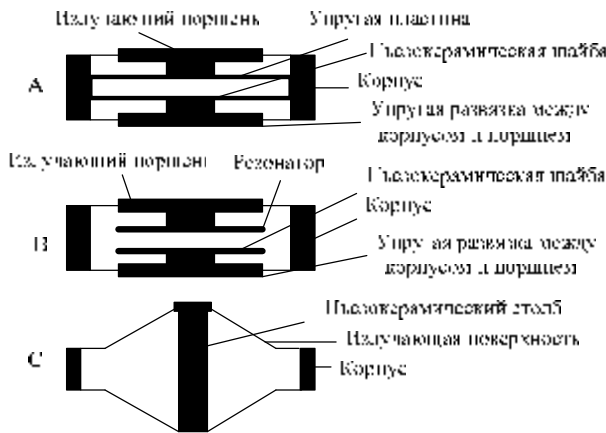


Рис. 2. Низкочастотные пьезокерамические излучатели: тип А - $f_p=650$ Гц, \varnothing 310 мм; тип В - $f_p=2800$ Гц, \varnothing 220 мм; тип С - $f_p=700$ Гц, \varnothing 700×700 мм

Для снижения габаритов излучателя предложено использовать известное в радиотехнике решение, применявшееся в супергетеродинных радиоприемниках для получения промежуточной частоты [14, 15].

Суть этой идеи применительно к гидроакустическим излучателям заключается в том, что в качестве излучателя используют пьезоэлемент с двумя системами электродов (пьезотрансформатор). На одну систему электродов подают электрическое напряжение от пер-

вого генератора, причем частоту колебаний электрического напряжения этого генератора устанавливают равной или близкой к одной из резонансных частот пьезоэлемента. На вторую систему электродов пьезоэлемента подают напряжение от второго генератора, причем частоту колебаний этого генератора устанавливают также близкую к той же резонансной частоте таким образом, чтобы разность между частотами колебаний первого и второго генератора была равна рабочей частоте излучателя (рис. 3) [16].

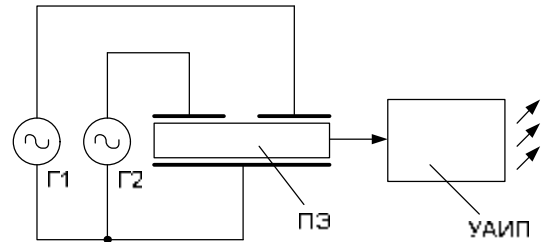


Рис. 3. Низкочастотный пьезокерамический излучатель: Г1, Г2 – генераторы электрических колебаний; ПЭ – пьезоэлемент; УАИП – усилитель акустического излучения пьезоэлемента

Пьезоэлемент с двумя системами электродов (пьезотрансформатор) при подведении к нему сигналов от двух генераторов выполняет функции смесителя (точнее, сумматора) [14, 15, 18, 21, 22].

Как известно, при приложении синусоидального электрического поля к пьезоэлектрику в нем за счет обратного пьезоэффекта возникают прямая и обратная бегущие волны смещения, деформации и напряжения, которые в стационарном режиме дают стоячую волну. Естественно, что если возбудить в объеме пьезоэлектрика несколько бегущих волн, то, применяя принцип суперпозиции (при возбуждении колебаний на линейном участке работы элемента), получим алгебраическое сложение потоков энергии в каждой точке возбуждаемого объема [18, 21, 22].

При суммировании двух напряжений одинаковой резонансной частоты ω $U_{ex1} = U_{m1} \sin(\omega t + j_1)$ и $U_{ex2} = U_{m2} \sin(\omega t + j_2)$ получим:

$$U_{вых} = k_1 U_{ex1} + k_2 U_{ex2} = U_m \sin(\omega t + j), \quad (2)$$

где

$$U_m = \sqrt{k_1^2 U_{m1}^2 + k_2^2 U_{m2}^2 + 2U_{m1} U_{m2} k_1 k_2 \cos(j_2 + j_1)},$$

$$\operatorname{tg} j = \frac{k_1 U_1 \sin j_1 + k_2 U_2 \sin j_2}{k_1 U_1 \cos j_1 + k_2 U_2 \cos j_2}.$$

Здесь k_1 и k_2 – коэффициенты, определяющие связь по напряжению между выходом и каждым из входов.

Таким образом, в этом случае в пьезоэлементе возникают механические колебания, пропорциональные сумме входных электрических напряжений (рис. 4) [21, 22].

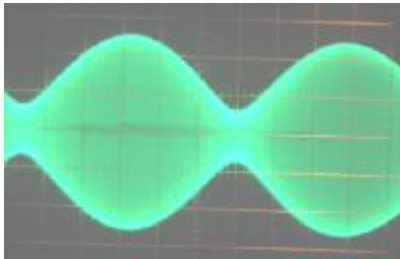


Рис. 4. Оциллограмма выходного сигнала пьезокерамического сумматора

Следует отметить, что амплитуда разностного сигнала может достигать половины от величины суммарного сигнала, т.е. амплитуда разностного (низкочастотного) сигнала может быть достаточно велика.

Предложенный способ был проверен экспериментально. Для этой цели использовался электроакустический преобразователь ЗП-19 производства ОАО «Аврора» (г. Волгоград). Преобразователь состоит из пластины из стали 40Х диаметром 32 и толщиной 0,15 мм. К пластине приклеен эпоксидным компаундом пьезоэлемент диаметром 23 мм и толщиной 0,2 мм. Полученный биморфный элемент закреплен в корпусе из ударопрочного полистирола (рис. 5).



Рис. 5. Электроакустический преобразователь ЗП-19

Один из электродов пьезоэлемента был разделен на три части. К двум из них подключались генераторы ГЗ-106. Третий электрод в форме диска использовался для контроля выходного электроакустического сигнала пьезоэлемента. Частота первого генератора выбиралась равной 98,2 кГц, т.е. резонансной частоте радиальных колебаний пьезоэлемента ЗП-19, частота второго – 100,7 кГц.

При подключении одновременно двух генераторов ЗП-19 начал звучать на частоте 2,5 кГц – резонансной частоте изгибных колебаний.

Полученный результат достаточно удивительный – возбуждаются колебания на неслышимых частотах – 98,2 и 100,7 кГц, а звучит преобразователь на 2,5 кГц. А также на других, если менять частоту колебаний одного из генераторов.

Повысить уровень колебаний пьезоэлемента можно, если возбуждать колебания от генератора на изгибных колебаниях (гармоники для основной резонансной частоты изгибных колебаний – 2,5 кГц).

Известно, также что в схемах амплитудных модуляторов выходной сигнал может быть пропорционален произведению входных, поэтому такие устройства в литературе [15] называют иногда перемножителями.

Выражение для амплитудно-модулированного колебания, перепишем в более общем виде

$$i = I_m(1 + mf(t))\sin\omega_0 t \quad (3)$$

где $f(t)$ – произвольный передаваемый сигнал (предполагается, что $|f(t)| < 1$).

Как видим, процесс модуляции состоит в перемножении двух функций времени $1 + mf(t)$ и $I_m \sin \omega_0 t$. Следовательно, модулятор в принципе должен представлять собой перемножающее устройство, т.е. устройство с двумя входами и одним выходом, действие которого состоит в том, что при подаче на два входа двух функций $x(t)$ и $X_0(t)$ на выходе получается

$$y(t) = x(t)X_0(t).$$

Операция умножения на заданную функцию $X_0(t)$ линейна, как это видно из следующего соотношения:

$$y(t) = [x_1(t) + x_2(t)]X_0(t) = x_1(t)X_0(t) + x_2(t)X_0(t) = y_1(t) + y_2(t)$$

Устройства, назначение которых состоит в перемножении двух функций времени, применяемые для модуляции и преобразования частоты, называются обычно смесителями. Термин этот нехорош, так как не выражает существа дела. Будем кратко называть устройство для перемножения двух функций *перемножителем* [15].

Разработка схемы пьезоэлектрического перемножителя требует дополнительных исследований, так как в данном случае нужно получить на выходе *акустический* сигнал, пропорциональный произведению входных электрических сигналов. Результаты этих работ будут представлены в следующем номере журнала.

В качестве усилителя акустических сигналов могут быть использованы ультразвуковые концентраторы – устройства для увеличения интенсивности ультразвука (амплитуды колебательного смещения) [23].

Известны два типа концентраторов – фокусирующие, или высокочастотные, и стержневые, или низкочастотные. И те, и другие не вполне подходят для решения обсуждаемой проблемы. Этот вопрос также требует дополнительных исследований.

Весьма перспективным представляется применение в данном случае электрических сигналов в форме меандра [6].

Выводы:

1. Предложен новый способ получения низкочастотных акустических колебаний с помощью пьезоэлектрических преобразователей.
2. Применение в устройстве, реализующем данный способ, пьезокерамического сумматора позволяют усилить уровень выходного сигнала за счет сложения механических колебаний в материале пьезотрансформатора.
3. Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание на основе пьезотрансформаторов умножителей напряжения, разработку на основе ультразвуковых концентраторов низкочастотных усилителей акустических колебаний, а также создание преобразователей на основе пьезокерамических сумматоров, использующие электрические сигналы в форме меандра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Домаркас В., Кажис Р. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтис, 1975. – 265 с.
2. Кажис Р.Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы. – Вильнюс: Мокслас, 1986.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
4. Sharapov V., Vladisauskas, Bazilo K., Kunit-skaya L., Sotula Zh. Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. ISSN 1392-2114, ultrasound. – 2009, Vol. 64, №4.
5. Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S. Bimorf cylindrical piezoceramic scanner for scanning probe nanomicroscopes. ISSN 1392-2114, 2009, Vol. 64, №4.
6. Sharapov V., Musienco M., Sotula Zh., Kunit-skaya L. About the effect of expansion of reproduced frequency band be elektroacoustic transducer. ISSN 1392-2114, 2009, Vol. 64, №3.
7. Пьезокерамические преобразователи: Справ. / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1980. – 232 с.
8. Свердлин Г.Н. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1980. – 232 с.
9. Подводные электроакустические преобразователи: Спр./ Под ред. В.В. Богородского. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.

10. Справочник по гидроакустике/ А.П. Евтюков, А.Е. Колесников, Е.А. Корепин и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
11. Sazontov A.G., Matveyev A.L., Vdovicheva N.K. Rough surface scattering effect on acoustic coherence and shallow water: Theory and observation // JEEE. Oceanic End, 2002, vol. 27, № 3, – 653 p.
12. Virovlyansky A.L., Artelny V.V., Stromkov A.A. // Proc. U.S. – Russia Workshop on Experimental Underwater Acoustics. – Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys. RAS, 2000, p.33.
13. Патент РФ №2112326, Н04R 17/00, 1998. ЦНИИ «Морфизприбор» (Санкт-петербург). Гидроакустический излучатель.
14. Котельников В.А. Основы радиотехники. – М.: Гостеиздат, 1950.
15. Харкевич А.А. Основы радиотехники. – М.: Радио и связь, 1963.
16. Патент України по заявці № u201000620 від 22.01.10 Н04R 17/00 Спосіб створення ультразвукових коливань за допомогою п'єзоелектричного перетворювача. Шарапов В.М.
17. Коротин П.И., Салин Б.М. Морской Автономный Измерительный Комплекс // Системы наблюдения, измерения и контроля в вибро и гидроакустике / Сб. трудов ИПФ РАН. – Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 2002, с.13.
18. Плужников В.М., Семенов В.С. Пьезоэлектрические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 168 с.
19. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
20. WWW. ipfran.ru
21. Шарапов В.М., Филимонов С.А., Базило К.В., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г. Исследование пьезокерамического сумматора на основе биморфного пьезоэлемента // Вісник ЧДТУ, №4, 2009.
22. Шарапов В.М., Базило К.В., Куницкая Л.Г., Сотула Ж.В., Филимонов С.А. Сумматоры на основе дискового мономорфного пьезотрансформатора // Вісник ЧДТУ №4. – 2009.
23. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов энциклопедия, 1979. – 400 с.

Шарапов В.М., д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету.

Сотула Ж.В., к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету.

Куницкая Л.Г., провідний спеціаліст кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету.

Базило К.В., к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету.