

Для цитирования: Гейер А. Ф., Пономарев В. А. Разработка пьезокерамических электроакустических преобразователей для акустических устройств со звуковым давлением 125 дБ и более // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 10. С.

DOI

УДК 621.389

А. Ф. Гейер¹, В. А. Пономарев¹¹ ООО «Аэрофон»

РАЗРАБОТКА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СО ЗВУКОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ 125 ДБ И БОЛЕЕ

Повышенный уровень звукового давления пьезокерамических электроакустических преобразователей имеет важное значение для акустических устройств, предназначенных для создания высокоинтенсивного (125 дБ и более) звука. В особенности это касается акустических устройств, которые используют группу преобразователей. Электроакустический преобразователь, развивающий более высокое звуковое давление, может многократно уменьшить количество излучающих элементов в акустическом устройстве. В работе представлены электроакустические преобразователи, способные развивать звуковое давление до 125 дБ. Приведены результаты разработки электроакустических преобразователей в трех частотных исполнениях. Предложена и исследована схема генератора возбуждающего напряжения для электроакустических преобразователей с повышенным звуковым давлением. Полученные результаты особенно актуальны для использования в многоэлементных звукоизлучающих устройствах с целью многократного сокращения требуемого количества преобразователей.

Ключевые слова: излучатель звука, электромеханический преобразователь, резонансная частота

Введение

Источники звука высокой интенсивности, выполненные на электроакустических преобразователях с применением пьезокерамики, востребованы во многих областях техники. По сравнению с источниками звука, работающими на иных физических принципах, пьезокерамические электроакустические преобразователи более экономичны и имеют преимущество по массогабаритным показателям. Мощные пьезокерамические звукоизлучающие компоненты применяются в мощных сиренах и оповещателях, предназначенных для работы в системах охраны важных объектов, том числе в устройствах реагирования («звуковой барьер»). Одним из перспективных направлений использования являются акустические установки дальнего действия, реализующие принцип фазированной акустической решетки [1]. В связи с высокой дальностью действия таких установок, исчисляемой сотнями метров и километрами, а также направленностью излучения, они могут успешно использоваться при создании звуковых локаторов акустического зондирования атмосферы, а также так называемых «звуковых пушек» – устройств

предупреждения и реагирования, охраны периметров.

Весьма актуальным является вопрос увеличения акустической отдачи отдельного акустического компонента многоэлементного звукоизлучающего устройства. Достаточно сказать, что электроакустический преобразователь, имеющий преимущество на 10 дБ по излучаемой акустической мощности, эквивалентен десяти преобразователям, не имеющим этого преимущества, а дальность его действия на расстоянии равной громкости втрое больше.

В настоящей статье рассматривается разработка электроакустических пьезокерамических преобразователей с уровнем звукового давления 120–125 дБ. Это примерно на 10 дБ выше достигнутого в существующей технике уровня. Задача решена с использованием способов конструктивного построения электроакустических преобразователей, которые по отдельности не оригинальны, но их совокупность является новой.

Основная особенность конструкции определяется разделением функций излучения и электромеханического преобразования. Используется биморфный пьезокерамический преобразователь,

который сам не излучает, но служит приводом для излучающего элемента – диафрагмы. Разделение функций предоставило свободу оптимизации как диафрагмы, так и биморфного преобразователя.

Для повышения эффективности электромеханического преобразования увеличена масса пьезоактивного компонента в конструкции биморфного преобразователя.

В диафрагме как излучающей части оптимизированы геометрические параметры с позиции максимальной эффективности электроакустического преобразования.

В работе также рассмотрены некоторые схемные вопросы возбуждения колебаний в электроакустических преобразователях повышенной мощности. Предложена схема оконечного устройства генератора возбуждающего напряжения для резонансной нагрузки, и исследованы ее возможности.

Конструкции на основе биморфного пьезокерамического преобразователя

До настоящей разработки использовались следующие типы конструкций, созданных на основе биморфного пьезокерамического преобразователя:

- конструкция с акустическим резонатором (резонатором Гельмгольца) применяется в маломощных источниках звука, как правило, устройствах звуковой индикации. Эти устройства характеризуются звуковым давлением 75–90 дБ [2] (здесь и далее уровень звукового давления указан на расстоянии 1 м от источника звука);
- в источниках звука с более высокой интенсивностью, например звуковых оповещателях, используется комбинация биморфного преобразователя со свернутым рупором. Уровень звукового давления таких преобразователей обычно находится в пределах 100–110 дБ, а в форсированном режиме, например в случае использования в устройствах реагирования, достигает 115 дБ. Так, в приборах фирмы Indusec (Швеция)

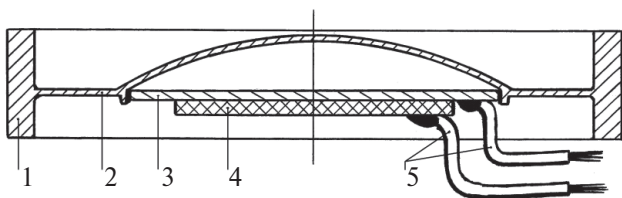


Рисунок 1. Схематическое изображение электроакустического преобразователя с плоско-сферической диафрагмой:

1 – цилиндрический корпус-держатель, 2 – плоско-сферическая диафрагма, 3 – мембрана, 4 – пьезоэлемент, 5 – выводы

применяется 8 преобразователей, а фирма American Technology использует в акустических установках до 80 преобразователей;

- в звуковых оповещателях также используется комбинация пьезокерамического биморфного преобразователя и легкого конусного диффузора. Здесь конусный диффузор своей вершиной соединен с центром биморфного преобразователя, а преобразователь выступает уже не как излучающий элемент, а в качестве электромеханического привода диффузора. Достоинство такой конструкции заключается в ее простоте и увеличении площади излучающей поверхности. При этом в связи с соединением деталей в одной точке имеет место ограничение, связанное с потерей устойчивости к механическим воздействиям. Звуковое давление таких преобразователей не превышает 100–105 дБ.

Для перечисленных типов электроакустических преобразователей, по-видимому, исчерпан конструктивный ресурс повышения громкости звучания. Задача создания электроакустических преобразователей с более высоким уровнем звукового давления должна решаться на основе иного конструктивного решения. В данной работе в основе разработанных конструкций электроакустических преобразователей использовано техническое решение, описанное в [3]. На рис. 1 представлена схема, которая иллюстрирует это решение.

Новая конструкция электроакустического преобразователя включает корпус-держатель 1, плоско-сферическую диафрагму 2 и пьезокерамический биморфный преобразователь, состоящий из мембраны 3 и пьезоэлемента 4. Выводы 5 служат для подвода возбуждающих электрических колебаний. Биморфный преобразователь закреплен в основании сферической части диафрагмы и служит ее электромеханическим приводом. В силу того что сферическая часть диафрагмы является геометрически жесткой, амплитудное распределение колебаний ее поверхности постоянно. Амплитуда колебаний плоской части диафрагмы линейно убывает от максимума при основании сферического сегмента до нуля в линии соединения с корпусом-держателем. Фазовое распределение колебаний является константой на всей поверхности диафрагмы. Учитывая эти обстоятельства, а также то, что площадь диафрагмы значительно больше площади биморфного преобразователя, имеет место эффективное излучение (на рис. 1 – вверх). Напротив, излучение в обратную сторону крайне неэффективно, так как колебания биморфного преобразователя имеют противоположную фазу в центральной и периферийной части. Вследствие этого возникает акустическое короткое замыкание.

Отметим еще два важных преимущества данного конструктивного решения. В связи с тем, что соединение приводного биморфного преобразователя с излучающей диафрагмой выполнено не в точке, а по окружности, снимается ограничение на его размеры без опасности потерять механическую устойчивость. Второе преимущество состоит в том, что излучающая поверхность является сплошной и имеет монолитное соединение с корпусом. Это создает предпосылку для разработки акустических приборов с высокой степенью защиты от проникновения воды и пыли.

Электроакустический преобразователь высокой мощности и вопросы его использования в акустических приборах

На основе представленного технического решения осуществлена разработка трех электроакустических преобразователей в рамках серии НИОКР [4–6], выполненных в период с 2013 по 2017 гг. по проектам СТАРТ-1, СТАРТ-2, СТАРТ-3 Фонда содействия малым формам в научно-технической сфере. В процессе разработки решалась проблема существенного, на 10 дБ, повышения уровня звукового давления электроакустических преобразователей. Такое повышение давления означает десятикратное увеличение интенсивности излучения, а биморфный преобразователь должен иметь способность пропорционально этому увеличить потребляемую электрическую мощность от источника колебаний. Вышеизложенное базовое техническое решение позволило реализовать электроакустический преобразователь требуемой мощности со следующими особенностями:

- использование в биморфных преобразователях пьезокерамических элементов увеличенных размеров. В зависимости от частотного исполнения электроакустических преобразователей оптимальные диаметры составляют 35, 43 и 63 мм;
- введение в конструкцию биморфного преобразователя второго пьезоэлемента (триморф) дало возможность, во-первых, удвоить способность к потреблению мощности, во-вторых – повысить эффективность электромеханического преобразования;

- оптимизация геометрических параметров плоско-сферической диафрагмы для того, чтобы ее собственная частота была равна частоте биморфного преобразователя. При этом условии достигается наибольшая акустическая отдача, то есть эффективность электроакустического преобразования.

В таблице представлены основные параметры и массогабаритные показатели разработанных электроакустических преобразователей.

Указанное в таблице звуковое давление измерено при эффективном значении возбуждающего напряжения 24 В на резонансной частоте. Допускается кратковременно или в импульсном режиме возбуждать преобразователи напряжением до 48 В и более. При этом уровень звукового давления составит 125 дБ.

Рассмотрим некоторые вопросы применения новых электроакустических преобразователей в составе акустических приборов, таких как мощные оповещатели, сигнализаторы, сирены. В этих устройствах обычно используется модуляция звука по частоте. При частотной модуляции частота сигнала близка к резонансной частоте преобразователя лишь в течение малой части периода модуляции, и чтобы получить необходимое звуковое давление, используют более высокое напряжение по сравнению с режимом тонального возбуждения. При низковольтном питании получают более высокое возбуждающее напряжение с помощью накопительной индуктивности, ЭДС самоиндукции которой при размыкании электронного ключа приложена к электроакустическому преобразователю. Таким путем напряжение на преобразователе повышается многократно. При этом игнорируется тот факт, что форма напряжения далека от синусоидальной. Так как разработанные электроакустические преобразователи потребляют значительную мощность, то импульсная форма напряжения нежелательна. В частности, сопутствующие высокочастотные гармоники могут быть источником электромагнитных помех. С другой стороны, схемы, генерирующие колебания прямоугольной или иной несинусоидальной формы, отличаются простотой и дешевизной. В настоящей работе предложено

Таблица. Основные параметры и массогабаритные показатели электроакустических преобразователей

Обозначение преобразователя	Рабочая частота, кГц	Звуковое давление, дБ	Электрическая емкость, нФ	Сопротивление на резонансе, Ом	Габаритные размеры, мм (диаметр×высота)	Масса, кг
ПЭП-1	2,6–2,9	120	80	80	96×24	0,1
ПЭП-2	1,5–2,0	120	80	100	140×50	0,2
ПЭП-3	3,1–3,4	120	80	60	80×24	0,1

решение, позволяющее объединить простоту импульсной схемы и синусоидальное возбуждение.

Схема возбуждения преобразователя

Разработано оконечное устройство генератора колебаний, которое обеспечивает более высокое по сравнению с источником питания напряжение возбуждения синусоидальной формы. Такое оконечное устройство выполнено по мостовой схеме инвертора напряжения с транзисторными ключами в плечах. В одну диагональ моста включен источник питания, а в нагрузочную диагональ – последовательный LC-контур, к конденсатору которого подключен электроакустический преобразователь. Эта схема изображена на рис. 2. Собственная частота контура установлена равной частоте механического резонанса преобразователя. Транзисторные ключи управляются взаимно-инвертированными сигналами прямоугольной формы. Таким образом, в составе колебательного контура получаем источник напряжения прямоугольной формы. При этом на конденсаторе имеет место синусоидальное

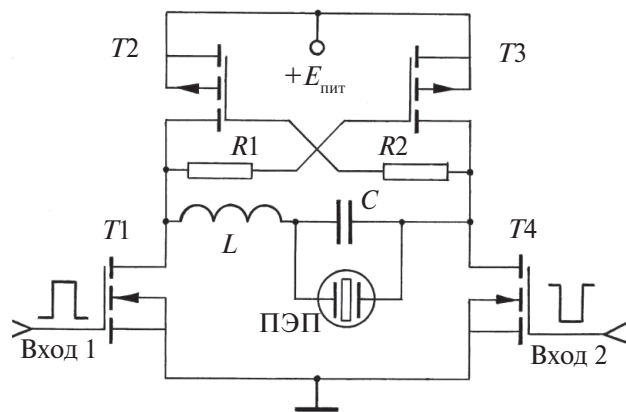


Рисунок 2. Мостовая схема инвертора напряжения с LC-контуром в нагрузочной диагонали

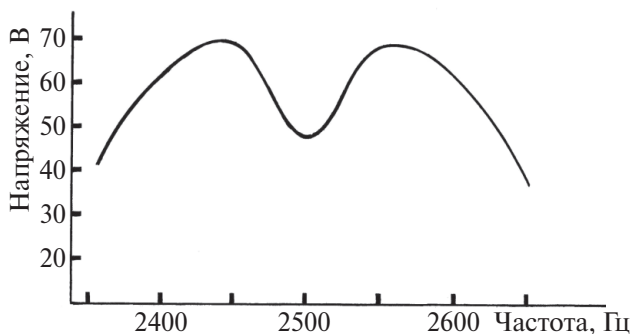


Рисунок 3. Зависимость возбуждающего напряжения на преобразователе ПЭП-1 от частоты генератора вблизи резонанса

напряжение амплитудой, превышающей напряжение источника питания в число раз, равное добротности. Идея использования конденсатора последовательного колебательного контура в качестве источника напряжения для резонансной пьезоэлектрической нагрузки известна из литературы (например, [7]).

Определим, какими должны быть параметры L и C последовательного контура при подключении электроакустического преобразователя конкретного типа, чтобы к нему было приложено возбуждающее напряжение заданной величины. В режиме механического резонанса преобразователь обладает определенным сопротивлением, которое имеет активный характер и шунтирует конденсатор контура. Нагруженная добротность последовательного контура при шунтировании конденсатора выражается следующей формулой [8]:

$$Q_H = \frac{r}{\rho}, \quad (1)$$

где Q_H – нагруженная добротность, r – шунтирующее сопротивление, каковым является сопротивление электроакустического преобразователя на резонансе, ρ – волновое сопротивление контура. Из (1) получим:

$$\rho = \frac{r}{Q_H}. \quad (2)$$

В (2) величина r известна – это параметр электроакустического преобразователя, а значение добротности Q_H задается и равно желаемому отношению возбуждающего напряжения на преобразователе к напряжению питания. Теперь легко определить параметры контура по следующим формулам:

$$\begin{aligned} C + C_0 &= \frac{1}{2\pi f \rho}, \\ L &= \frac{\rho}{2\pi f}, \end{aligned} \quad (3)$$

где f – резонансная частота преобразователя (она же является резонансной частотой контура), C_0 – статическая емкость преобразователя. Номинальную емкость C конденсатора необходимо выбирать за вычетом статической емкости.

Представленные зависимости экспериментально проверены. На рис. 3 показана зависимость возбуждающего напряжения на преобразователе ПЭП-1 от частоты генератора вблизи резонанса. Напряжение на преобразователе на резонансной частоте соответствует заданному значению добротности ($Q = 4$) и составляет 48 В. Увеличение напряжения при отстройке объясняется уменьшением степени шунтирования конденсатора. При значительной отстройке влияние преобразователя

ослабевает и график воспроизводит амплитудно-частотную характеристику контура.

Увеличение напряжения на преобразователе справа и слева от резонансной частоты имеет положительное значение, так как способствует расширению полосы частот на заданном уровне звукового давления. Повышение напряжения при отстройке отчасти восполняет потерю звукового давления, которая могла бы иметь место при неизменном напряжении. Так происходит коррекция частотной характеристики звукового давления в сторону расширения полосы частот.

На рис. 4 представлены две характеристики звукового давления преобразователя ПЭП-1, нормированные к максимальному значению. Кривая 1 относится к случаю измерения в предлагаемой схеме (рис. 2), дающей увеличение напряжения при отстройке от резонанса, а кривая 2 получена измерением от генератора с неизменной амплитудой возбуждающего напряжения.

Более широкая полоса воспроизводимых частот при заданном уровне звукового давления всегда предпочтительна, так как, во-первых, ослабляется критичность устройства к нестабильности частоты генератора, во-вторых, тогда в сирене или оповещателе можно реализовать более эффективную частотную модуляцию звука благодаря возможности использовать увеличенную девиацию частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейер А. Ф. Акустические устройства дальнего действия [Электронный ресурс]. URL: https://avrora-binib.ru/stati/akusticheskie_ustroystva_dalnego_deystviya_ (дата обращения: 15.08.2018).
2. Гейер А. Ф. Пьезокерамические излучатели звука (звонки, оповещатели) [Электронный ресурс]. URL: https://avrora-binib.ru/stati/pezoeramicheskie_izluchateli_zvuka_zvonki_opoveshchateli (дата обращения: 15.08.2018).
3. Патент РФ на полезную модель № 71496 / 10.03.2008. Бюл. № 7. Гейер А. Ф. и др. Электроакустический преобразователь.
4. Петров М. В. и др. Исследование и разработка пьезокерамических электроакустических преобразователей с максимальным звуковым давлением 125 дБ [отчет по НИОКР]. Волгоград: ООО «Аэрофон», 2013. 56 с.
5. Петров М. В. и др. Разработка пьезокерамической сирены (оповещателя) с уровнем звукового давления 125 дБ [отчет по НИОКР]. Волгоград: ООО «Аэрофон», 2016. 58 с.
6. Петров М. В. и др. Разработка пьезокерамического электроакустического преобразователя и пьезокерамических сирен (оповещателей) с уровнем звукового давления 125 дБ [отчет по НИОКР]. Волгоград: ООО «Аэрофон», 2017. 70 с.
7. Патент РФ на изобретение № 2458454 / 10.08.2012. Бюл. № 22. Новиков А. А. и др. Транзисторный генератор для резонансных нагрузок.
8. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. СПб.: Лань, 2017. 424 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гейер Анатолий Филиппович, главный конструктор, ООО «Аэрофон», Российская Федерация, 400042, Волгоград, шоссе Авиаторов, 1, тел.: 8 (927) 251-69-89, e-mail: aerofon.ooo@rambler.ru.

Пономарев Виктор Александрович, заместитель директора ООО «Аэрофон», Российская Федерация, 400042, Волгоград, шоссе Авиаторов, 1, тел.: 8 (905) 398-36-24, e-mail: aerofon.ooo@rambler.ru.

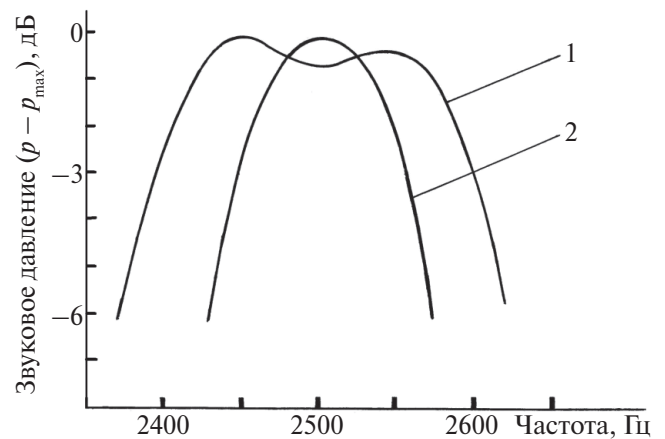


Рисунок 4. Частотные характеристики звукового давления преобразователя ПЭП-1: кривая 1 получена при измерении в схеме по рис. 2, кривая 2 получена при постоянной амплитуде

Выводы

Разработаны пьезокерамические электроакустические преобразователи трех частотных исполнений, имеющие значительное преимущество по развиваемому звуковому давлению. Новые акустические компоненты создают предпосылки для существенного повышения технического уровня акустических приборов и устройств, в которых они применяются.

A. F. Geier, V. A. Ponomarev

DEVELOPMENT OF PIEZOCERAMIC ELECTROACOUSTIC TRANSDUCERS FOR ACOUSTIC DEVICES WITH A SOUND PRESSURE OF 125 DB OR MORE

The increased sound pressure level of piezoceramic electroacoustic transducers is important for acoustic devices designed to create high-intensity sound, 125 decibels or more. This is especially true of acoustic devices that use a group of transducers. An electroacoustic transducer that develops a higher sound pressure can greatly reduce the number of radiating elements in an acoustic device. In the performed work electroacoustic transducers are created that capable to develop sound pressure level up to 125 dB. The article presents the results of the development of electroacoustic transducers for three frequency versions. The scheme of the generator of the exciting voltage for electroacoustic converters with the raised sound pressure is offered and investigated. The result is particularly relevant when used in multi-element sound-emitting devices, as repeatedly reduces the required number of converters to achieve the same result.

Keywords: acoustic radiator, electromechanical transducer, resonant frequency

REFERENCES

1. Geier A.F. Long range acoustic devices. (In Russian). Available at: https://avrora-binib.ru/stati/akusticheskie_ustroystva_dalnego_deystviya_ (accessed 15.08.2018).
2. Geier A.F. Piezo-ceramic sound radiators – buzzers, warning. (In Russian). Available at: https://avrora-binib.ru/stati/pezoeramicheskie_izluchateli_zvuka_zvonki_opoveshchateli (accessed 15.08.2018).
3. Geier A.F., et al., inventors; Geier A.F., assignee. *Electro-acoustic transducer*. Russian Federation patent RU71496. 10.03.2008.
4. Petrov M.V., et al. *Research and development of piezoceramic electroacoustic transducers with a maximum sound pressure of 125 dB* [Report on the implementation of R & D]. Volgograd, Aeroфон LLC, 2013, 56 p. (In Russian).
5. Petrov M.V., et al. *Development of a piezoceramic siren with a sound pressure level of 125 dB* [Report on the implementation of R & D]. Volgograd, Aeroфон LLC, 2016, 58 p. (In Russian).
6. Petrov M.V., et al. *Development of a piezoceramic electroacoustic transducer and piezoceramic sirens with a sound pressure level of 125 dB* [Report on the implementation of R & D]. Volgograd, Aeroфон LLC, 2017, 70 p. (In Russian).
7. Novikov A.A., et al., inventors; TskBA, assignee. *Transistor generator for resonant loads*. Russian Federation patent RU2458454. 10.08.2012.
8. Atabekov G.I. *Osnovy teorii cepei* [Basics of circuit theory]. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2017, 424 p. (In Russian).

AUTHORS

Geier Anatoly, chief designer, Aeroфон LLC, 1, Aviatorov highway, Volgograd, 400042, Russian Federation, tel.: +7 (927) 251-69-89, e-mail: aerofon.ooo@rambler.ru.

Ponomarev Viktor, deputy director, Aeroфон LLC, 1, Aviatorov highway, Volgograd, 400042, Russian Federation, tel.: +7 (905) 398-36-24, e-mail: aerofon.ooo@rambler.ru.