

УДК 681.883

© Д. А. Давыдов, В. Ю. Нерук, П. П. Пивнев, 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСА ШИРОКОПОЛОСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, СОСТАВЛЕННОГО ИЗ РАЗНОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ (КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ)

Построение гидроакустических систем подводного наблюдения связано с соблюдением некоторых необходимых требований их характеристик. Одной из них является высокая разрешающая способность по дистанции. Разрешающая способность по дистанции определяется шириной полосы излучаемых и принимаемых сигналов, а следовательно, и широкополосностью преобразователей, используемых в антенной системе. Широкополосность преобразователей достигается различными способами: использованием традиционных методов расширения полосы частот активной или пассивной нагрузки, применением специальных материалов для преобразователей, применением параметрических режимов излучения акустических сигналов. Одним из вариантов построения таких преобразователей может быть использование разночастотных составляющих пьезоэлементов в одном преобразователе, механически связанных по полю. При этом необходимо учитывать добротность каждой из нагруженных колебательных систем, причем должны учитываться не только активная нагрузка на излучение, но и демпфирование частей преобразователя конструктивными элементами.

Кл. сл.: гидроакустика, широкополосные антенные системы, активная составляющая полного сопротивления, пьезопреобразователь

В настоящей работе рассмотрены характеристики составного преобразователя и его составляющих, связанных по полю, без учета конструктивных особенностей. В исследовании учитывается только добротность составляющих элементов преобразователя и влияние нагрузки на преобразователь при излучении акустической энергии [1].

В первую очередь обозначим критерии выбора пьезокерамики. Для решения поставленной выше задачи будем использовать пьезокерамику с малой добротностью [2, с. 25–33]. Пусть рассматриваемый широкополосный преобразователь состоит из n -го количества разночастотных стержневых преобразователей с размерами $w \times h \times t$ мм (рис. 1), соединенных параллельно по электрической и механической сторонам. Будем использовать поперечную моду колебаний, что удобно технологически при изготовлении преобразователя. На рис. 1 показано направление механических колебаний стрелкой, а на заштрихованных поверхностях расположены электроды для поляризации и приложения возбуждающих электрических напряжений.

Для определения частотной зависимости активной составляющей полного сопротивления одной i -й составляющей пьезопреобразователя, воспользуемся формулой (1) [3, с. 62–75]:

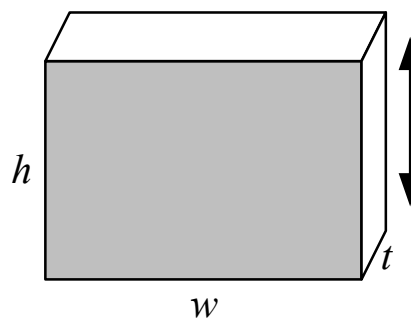


Рис. 1. Внешний вид и обозначение размеров и моды колебаний составляющих пьезоэлемента

$$R_w(f)_i = Z_{ai} \cdot N_{кэми} \cdot \sqrt{1 + Q_i^2 \cdot \left(\frac{f}{f_i} - \frac{f_i}{f} \right)^2}, \quad (1)$$

где Z_{ai} — акустическая нагрузка составляющей единичного пьезоэлемента, $N_{кэми}$ — коэффициент электромеханической трансформации единичного пьезоэлемента, Q_i — добротность каждой составляющей, f_i — резонансная частота единичного пьезоэлемента, f — текущая частота.

Акустическая нагрузка составляющей пьезопреобразователя рассчитывается по формуле (2) [4, с. 64–78]:

$$Z_{ai} = \rho \cdot c \cdot S_i, \quad (2)$$

где ρ — плотность среды, c — скорость звука в среде, S_i — площадь излучающей поверхности i -й составляющей пьезоэлемента.

Коэффициент электромеханической трансформации — это физическая величина, отвечающая за преобразования механических величин в электрические. Он определяется по формуле (3) [5, с. 98–117]:

$$N_{кэптi} = \frac{2 \cdot d_{31} \cdot S_i}{s_{31}^e \cdot h_i}, \quad (3)$$

где d_{31} — пьезомодуль, s_{31}^e — коэффициент упругой податливости, h_i — высота i -й составляющей пьезоэлемента.

Для определения активной части полного сопротивления широкополосного пьезопреобразователя,

состоящего из разночастотных пьезоэлементов, используем формулу из электростатики для расчета параллельно соединенных сопротивлений (формула (4) [6]):

$$R_w = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_w(f)_i} \right)}. \quad (4)$$

Для конкретности рассмотрим преобразователь, состоящий из 5 элементов с частотами f_{i1} , f_{i2} , f_{i3} , f_{i4} , f_{i5} . Предположим, что данный преобразователь не нагружен, тогда зависимость сопротивления от частоты, рассчитанная по формуле (2), будет выглядеть как на рис. 2.

Предположим, что была проведена герметизация преобразователя [7, с. 142–149], после чего его поместили в среду (вода). Вследствие этого нагрузка на преобразователь увеличится, а добротность уменьшится. Тогда зависимость сопротивления от частоты будет выглядеть как на рис. 3.

R , Ом

Активная составляющая полного сопротивления пьезопреобразователя

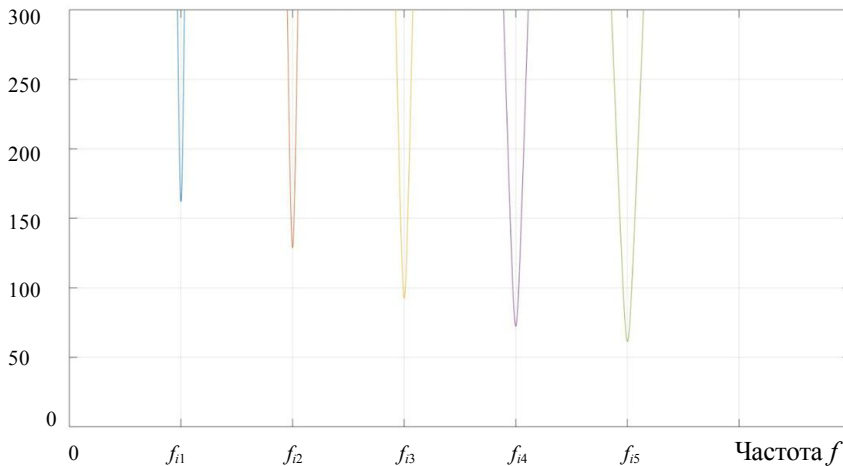


Рис. 2. Зависимость активной составляющей полного сопротивления от частоты без нагрузки

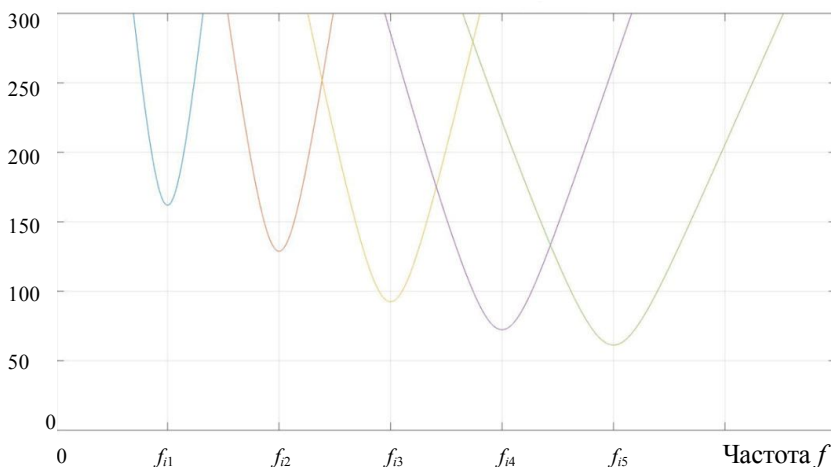


Рис. 3. Зависимость активной составляющей полного сопротивления от частоты нагруженного преобразователя в воде



Рис. 4. Зависимость активной составляющей полного сопротивления от частоты при параллельном соединении пьезоэлементов в широкополосном преобразователе

Как можно заметить, полоса частот значительно расширяется при нагрузке. Для определения добротности воспользуемся формулой (5) [2, с. 87–97]:

$$Q_i = \frac{f_{in}}{\Delta f_{in}} = \frac{f_r \cdot m_s}{Z_a}, \quad (5)$$

где f_{in} — частота резонанса i -го пьезоэлемента, Δf_{in} — его ширина полосы частот, m_s — эквивалентная масса. Как видно из формулы, чем меньше добротность при постоянной частоте резонанса, тем шире полоса частот.

В соответствии с задачей, соединив составляющие преобразователя по параллельной схеме соединения, получим следующую зависимость сопротивления от частоты (рис. 4).

Анализ полученной зависимости позволяет сделать вывод, что полоса частот преобразователя находится в пределах от f_{i1} , до f_{i5} включительно, а это значит, что с помощью данной методики возможно производить расчет широкополосного преобразователя, состоящего из разночастотных составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Широкополосные гидроакустические антенны систем экологического мониторинга водной среды и придонных осадочных пород // Инженерный вестник Дона. Ростов-на-Дону, 2015. № 4. С. 1–17. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476>

2. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи: Расчет и проектирование. Справочник. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
3. Аронов Б.С. Электроакустические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 270 с.
4. Пугачев С.И. Пьезокерамические преобразователи. Справочник. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
5. Богородский В.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 264 с.
6. Глазнов В.Е. Входной импеданс на боковой поверхности радиально возбуждаемого упругого цилиндра // Акустический журнал. М., 1976. Т. 22, № 2. С. 206–213. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1976_2_206-213.pdf
7. Орлов Л.В., Шабров А.А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.

Южный федеральный университет, г. Таганрог

Контакты: Давыдов Даниил Андреевич,
d.davydov505@gmail.com

Материал поступил в редакцию 09.08.2023

RESEARCH OF THE IMPEDANCE OF A BROADBAND ACOUSTIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCER COMPOSED OF DIFFERENT-FREQUENCY EMITTERS (BRIEF MESSAGE)

D. A. Davydov , V. Yu. Neruk, P. P. Pivnev

Southern Federal University, Taganrog, Russia

The construction of hydroacoustic underwater surveillance systems is associated with compliance with some necessary requirements for their characteristics. One of them is high distance resolution. The distance resolution is determined by the bandwidth of the emitted and received signals and, consequently, by the bandwidth of the converters employed in the antenna system. The bandwidth of converters is achieved in various ways: by means of traditional methods of expanding the frequency band with an active or passive load, the use of special materials for converters, and the use of parametric modes of emission of acoustic signals. One of the options for constructing such converters may be the use of different-frequency components of piezoelements in one converter, mechanically coupled along the field. In this case, it is necessary to take into account the quality factor of each of the loaded oscillatory systems, and not only the active load on radiation must be considered, but also the damping of the parts of the converter by structural elements.

Keywords: hydroacoustics, broadband, antenna systems, active component of impedance, piezoelectric transducer

REFERENCES

1. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. [Broadband hydroacoustic antenna system ecological monitoring of water environment and natural sedimentary rocks]. *Inzhenernyi vestnik Dona. Rostov-na-Donu* [Engineering journal of Don], 2015, no. 4, pp. 1–17. (In Russ.). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476>
2. Bogorodskii V.V., Zubarev L.A., Korepin E.A., Yakushev V.I. *Podvodnye ehlektroakusticheskie preobrazovateli: Raschet i proektirovanie. Spravochnik* [Underwater electroacoustic transducers: Calculation and design. Reference book]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
3. Aronov B.S. *Ehlektroakusticheskie preobrazovateli iz p'ezoelektricheskoi keramiki* [Electroacoustic transducers made of piezoelectric ceramics]. Leningrad, Ehnergoatomizdat Publ., 1990. 270 p. (In Russ.).
4. Pugachev S.I. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli. Spravochnik* [Piezoceramic transducers. Reference book]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 256 p. (In Russ.).
5. Bogorodskii V.V., Yakovlev G.V., Korepin E.A., Dolzhikov A.K. *Gidroakusticheskaya tekhnika issledovaniya i osvoeniya okeana* [Sonar technology for ocean exploration and development]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 264 p. (In Russ.).
6. Glazanov V.E. [Input impedance on side surface of radially excited elastic cylinder]. *Akusticheskij zhurnal* [Acoustic journal. Moscow], 1976, vol. 22, no 2, pp. 206–213. (In Russ.). URL: http://www.akzh.ru/pdf/1976_2_206-213.pdf
7. Orlov L.V., Shabrov A.A. *Gidroakusticheskaya apparatura rybopromyslovogo flota* [Hydroacoustic equipment of the fishing fleet]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 224 p. (In Russ.).

Contacts: *Davydov Daniil Andreevich*,
d.davydov505@gmail.com

Article received by the editorial office on 09.08.2023

This paper examines the characteristics of a composite transducer and its field-coupled components without taking into account design features. The study takes into account only the quality factor of the constituent elements of the converter and the influence of the load on the converter when emitting acoustic energy [1].

First of all, let us outline the criteria for choosing piezoceramics. To solve the problem posed above, we will use piezoelectric ceramics with a low quality factor [2, p. 25–33]. Let the broadband converter under consideration consist of the n th number of different-frequency rod converters with dimensions $w \times h \times t$ mm (Fig. 1), connected in parallel along the electrical and mechanical sides. We will use the transverse vibration mode; this is technologically convenient in the manufacture of the converter. In Fig. 1 an arrow shows the direction of mechanical vibrations, and there are electrodes for polarization and application of exciting electrical voltages on the shaded surfaces.

Fig. 1. Appearance and designation of the dimensions and mode of vibration of the components of the piezoelectric element

We use formula (1) [3, pp. 62–75] to determine the frequency dependence of the active component of the impedance of one i -th component of the piezoelectric transducer:

$$R_w(f)_i = Z_{ai} \cdot N_{\text{кэМТ}i} \cdot \sqrt{1 + Q_i^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{ri}} - \frac{f_{ri}}{f} \right)^2}, \quad (1)$$

where Z_{ai} is the acoustic load of the component of a single piezoelement, $N_{\text{кэМТ}i}$ is the electromechanical transformation coefficient of a single piezoelement, Q_i is the quality factor of each component, f_{ri} is the resonant frequency of a single piezoelement, f is the current frequency.

The acoustic load of the piezoelectric transducer component is calculated using formula (2) [4, p. 64–78]:

$$Z_{ai} = \rho \cdot c \cdot S_i, \quad (2)$$

where ρ is the density of the medium, c is the speed of sound in the medium, S_i is the area of the emitting surface of the i -th component of the piezoelectric element.

The electromechanical transformation coefficient is a physical measure responsible for converting mechanical quantities into electrical ones. It is determined by formula (3) [5, pp. 98–117]:

$$N_{\text{кэМТ}i} = \frac{2 \cdot d_{31} \cdot S_i}{s_{31}^e \cdot h_i}, \quad (3)$$

where d_{31} is the piezoelectric modulus, s_{31}^e is the coefficient of elastic compliance, h_i is the height of the i -th component of the piezoelectric element.

To determine the active part of the impedance of a broadband piezoelectric transducer, consisting of different-frequency piezoelements, we use the formula for calculation of parallel-connected resistances from electrostatics (formula (4) [6]):

$$R_w = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_w(f)_i} \right)}. \quad (4)$$

To be specific, consider a converter consisting of 5 elements with frequencies $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i5}$. Let us assume that this converter is not loaded. The dependence of resistance on frequency, calculated using formula (2), looks like in Fig. 2.

Fig. 2. Dependence of the active component of the impedance on the frequency without a load

Let's assume that the converter has been sealed [7, pp. 142–149], then placed in a medium (water). As a result, the load on the converter will increase and the quality factor will decrease. Then the dependence of resistance on frequency will look like in Fig. 3.

Fig. 3. Dependence of the active component of the impedance on the frequency of the loaded converter in water

As you can see, the frequency band expands significantly under load. To determine the quality factor, we use formula (5) [2, pp. 87–97]:

$$Q_i = \frac{f_{in}}{\Delta f_{in}} = \frac{f_r \cdot m_s}{Z_a}, \quad (5)$$

where f_{in} is the resonance frequency of the i -th piezoelement, Δf_{in} is its frequency bandwidth, m_s is the equivalent mass. As can be seen from the formula, the lower the quality factor at a constant resonance frequency, the wider the frequency band.

In accordance with the task, we obtain the following dependence of resistance on frequency (Fig. 4) after connecting the components of the converter using a parallel connection circuit.

Fig. 4. Dependence of the active component of the impedance on frequency when connecting piezoelements in parallel in a wideband converter

Analysis of the obtained dependence allows us to conclude that the frequency band of the converter is in the range from f_{i1} to f_{i5} inclusive, which means that this technique allows us to calculate a broadband converter consisting of different frequency components.