

УДК 534.231

**А.Г. Лейко**, д-р.тех.наук, **Н.Д. Гладких**, **А.И. Нижник**, **Я.И. Старовойт**

Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов»,  
ул. Сурикова, 3, г. Киев, 03035, Украина.

## **Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией**

*Исходя из единых методических позиций, получен обширный численный материал об электрических свойствах цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции. На его основе, в широком диапазоне частот, установлены количественные связи между электрическим током, модулем, активной и реактивной составляющими электрического сопротивления этих излучателей и видом используемой поляризации, физическими параметрами различных составов пьезокерамической оболочки излучателей, геометрическими размерами конструкции излучателей и физическими характеристиками сред, заполняющих их внутреннюю полость. Сопоставительный анализ полученных данных позволил установить ряд тонких эффектов в поведении электрических полей излучателей рассматриваемого типа. Библ. 8, рис. 10.*

**Ключевые слова:** электрические поля, цилиндрический пьезокерамический излучатель, окружная и радиальная поляризация, силовая и компенсированная конструкция, физические характеристики.

### **Введение**

Гидроакустические излучатели, называемые еще «моторами гидроакустики», характеризуются тем, что в отличие от радиотехнических излучателей осуществляют не только формирование распределения энергии в окружающем пространстве, но и преобразование одного вида энергии в другой, а именно электрической энергии в акустическую. Занимая промежуточное положение между источником электрических волн и средой, в которой распространяются излученные преобразователем звуковые волны, гидроакустический излучатель должен характеризоваться параметрами как с механической, так и с электрической стороны [1,2]. При этом, естественно, являясь единой электромеханической колебательной системой, механическая сторона оказывает

свое влияние на электрическую сторону преобразователя, участвуя в формировании электрических параметров гидроакустического излучателя. В расчетной модели последнего этот факт при определении параметров излучателя учитывается применением при решении задачи излучения метода связанных полей [3,4,5]. Применительно к цилиндрическим пьезокерамическим излучателям аналитические соотношения, необходимые для количественной оценки электрических характеристик таких излучателей, были получены в работе [6]. Целью данной работы является изучение электрических свойств цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной и радиальной поляризацией. Это тем более необходимо, потому что в опубликованной литературе чрезвычайно мало работ, посвященных электрическим полям пьезокерамических излучателей. Имеющиеся работы [2, 8] очень скудно освещают электрические параметры только преобразователей силовой конструкции.

### **Результаты исследований**

С использованием аналитических соотношений, полученных в работе [6], были выполнены сравнительные оценки электрических свойств цилиндрических пьезокерамических преобразователей силовой и компенсированной конструкции, при построении которых использовались пьезоэлементы с окружной и радиальной поляризациями.

В качестве параметров, характеризующих эти свойства, были выбраны частотные зависимости электрического тока в цепи возбуждающего генератора и входного электрического сопротивления преобразователя, включая его активную и реактивную составляющие. Первые характеризуют эффективность возбуждения колебаний пьезокерамической оболочки преобразователя [3,4]. Вторые важны для обеспечения согласования работы генератора с гидроакустическим преобразователем в тракте излучения

гидроакустического устройства [2] путем компенсации реактивной составляющей сопротивления преобразователя при его проектировании.

С целью обеспечения возможности совместного анализа электрических и акустических характеристик цилиндрических пьезокерамических излучателей расчеты численных характеристик их электрических полей проводились для тех же параметров излучателей, что и в работе [7], а именно:

1) для трех составов пьезокерамики: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3. При этом принималось, что срединный радиус  $r_0 = 0,068$  м, а толщина стенки  $h = 0,008$  м;

2) для трех толщин стенки излучателя  $h$ : 0,008 м, 0,01 м, 0,012 м. При срединном радиусе излучателя  $r_0 = 0,068$  м и пьезокерамике состава ЦТБС-3;

3) для трех радиусов срединной поверхности  $r_0$ : 0,068 м, 0,1 м, 0,12 м. При этом толщина стенки  $h = 0,008$  м, пьезокерамика состава ЦТБС-3;

4) для возбуждения излучателя электрическим напряжением  $\Psi_0 = 200$  В при количестве призм в секционированных кольцах  $n = 48$ .

Выбранные для расчетов параметры составов пьезокерамики приведены в работе [7]. Результаты расчетов приведены на единицу длины излучателя.

### Излучатели силовой конструкции

Результаты расчетов частотных зависимостей параметров электрического поля для излучателей силовой конструкции с окружной и радиальной поляризациями представлены на рис. 1-3.

Анализ результатов расчета показывает, что с точки зрения эффективности возбуждения колебаний пьезокерамической оболочки цилиндрического преобразователя радиальная поляризация характеризуется большей однородностью в широком диапазоне частот и меньшей зависимостью от типа выбранного состава пьезокерамики (рис. 1, б). Использование окружной поляризации (рис. 1, а) позволяет, с одной стороны, повысить эффективность возбуждения колебаний пьезокерамической оболочки по сравнению с радиальной поляризацией, а, с другой стороны, обуславливает увеличение неоднородности поведения этой эффективности в широком диапазоне частот, и ее большое различие для разных составов пьезокерамики.

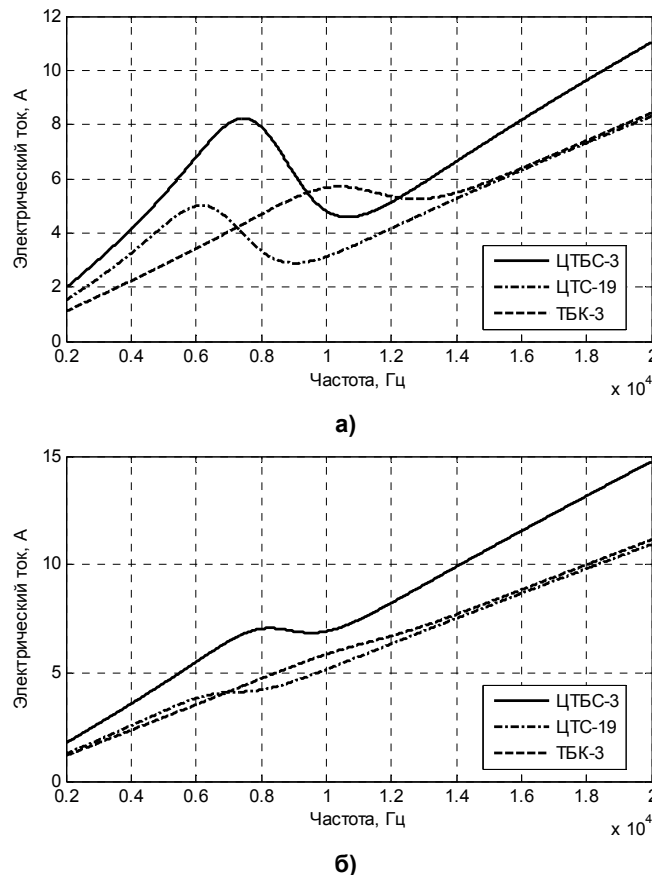


Рис. 1. Графики частотной зависимости электрического тока излучателя силовой конструкции с окружной (а) и радиальной (б) поляризациями для разных составов пьезокерамики при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м и вакуумировании внутренней полости

Анализ приведенных частотных зависимостей электрического тока при вынужденных колебаниях пьезокерамического цилиндрического преобразователя позволяет установить еще ряд интересных особенностей, связанных с изменением тока. Как видим, при приближении к резонансным частотам колебаний ток в цепи увеличивается. Вместе с тем появляются и частоты (частоты антирезонанса), когда ток в цепи уменьшается. Таким образом, колебательная система в виде пьезокерамической цилиндрической оболочки при вынужденных колебаниях характеризуется двумя последовательностями частот – частотами резонанса и антирезонанса, при этом последние лежат выше первых [3]. Обращает на себя внимание то, что при окружной поляризации приведенная закономерность выражена существенно ярче, чем при радиальной поляризации. Ещё одна особенность рассматриваемых частотных зависимостей электрического тока состоит в том, что, несмотря на существенное различие физических параметров пьезокерамики различных составов при прочих равных условиях, эффективность возбуждения колебаний практически не отличается для ряда составов. При этом для радиальной поляризации (рис. 1, б) отсутствие этих отличий наблюдается практически во всем диапазоне исследуемых частот, а при окружной поляризации (рис. 1, а) – только в области более высоких частот.

Установленное [7] при изучении частотных свойств звуковых полей наличие локальных узкополосных резонансных колебаний преобразователей силовой конструкции, обусловленное свойствами их внутренних воздушных полостей, находит свое отражение и в частотных свойствах электрического поля преобразователей. При этом, частоты локальных резонансов в акустическом и электрическом полях практически совпадают между собой.

Как уже отмечалось, знание входного электрического сопротивления преобразователя позволяет обеспечить условие согласования генератора, возбуждающего преобразователь, и преобразователя. Анализ результатов расчета показывает, что на низких частотах преобразователь силовой конструкции ведет себя как конденсатор с потерями, поскольку с ростом частоты емкостное сопротивление уменьшается. На некоторой частоте, которая меньше частоты механического резонанса для каждого состава пьезокерамики, сопротивление достигает минимального значения. Дальше с ростом частоты модуль входного электрического сопротивления увеличивается и при некоторой частоте, соответствующей конкретному составу пьезокерамики, достигает максимума. Это частота антирезонанса, при которой ток, протекающий через преобразователь, имеет минимум. Эта частота

больше, чем частота электромеханического резонанса преобразователя. Несовпадение этих двух частот с частотами механического и электромеханического резонансов соответственно объясняется наличием в комплексном входном электрическом сопротивлении преобразователя активной составляющей [8].

Анализ частотных зависимостей модулей входных электрических сопротивлений цилиндрических излучателей с разной поляризацией свидетельствует о том, что в области средних и низких частот при рассматриваемых размерах преобразователя с радиальной поляризацией отличаются меньшим разбросом значений указанного модуля для разных составов пьезокерамики, чем преобразователи с окружной поляризацией.

Кроме модуля важное значение играют активная и реактивная составляющие входного электрического сопротивления излучателя. Активная составляющая характеризует активную потребляемую мощность и состоит из двух частей: одна из них соответствует акустической мощности, излучаемой в среду; другая отражает неизбежные потери мощности, имеющие место в излучателе в процессе электроакустического преобразования энергии. Частотные зависимости входного активного сопротивления в целом для излучателей силовой конструкции представлены на рис. 2 и демонстрируют его поведение при изменении состава пьезокерамики (рис. 2, а), толщины пьезокерамической оболочки (рис. 2, б) и её радиуса (рис. 2, в). Более высокие значения активного сопротивления для излучателей из пьезокерамики состава ЦТС-19 (рис. 2, а) обусловлены большими внутренними потерями в нем по сравнению с другими составами, поскольку этот состав предназначен для использования в приемных преобразователях, где потери не играют особой роли. Уменьшение толщины пьезокерамической оболочки демонстрирует (рис. 2, б) более широкую полосу частот эффективного преобразования энергии.

Реактивная составляющая входного электрического сопротивления пьезокерамического излучателя, которая определяет реактивную мощность, потребляемую при излучении звука в жидкой среде, характеризуется значительной электрической емкостью. Наличие этой емкости приводит к потреблению от генератора возбуждения значительного емкостного тока, который перегружает генератор и все коммуникации. Для устранения этого недостатка или уменьшения его влияния емкостное реактивное сопро-

тивление компенсируют искусственно создаваемой компенсирующей индуктивностью. Её количественные значения в зависимости от частотного диапазона, состава использованной в излучателе пьезокерамики, толщины и радиу-

са пьезокерамической оболочки, при проектировании тракта излучения с использованием преобразователя силовой конструкции, определяются из графиков на рис. 3.

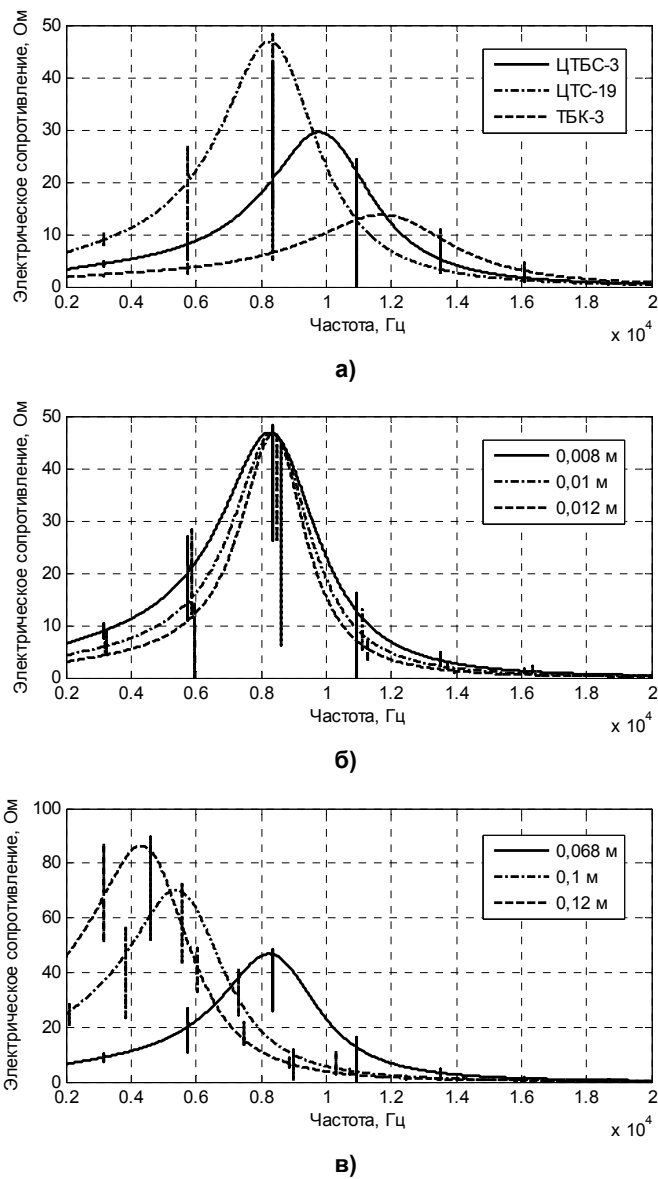
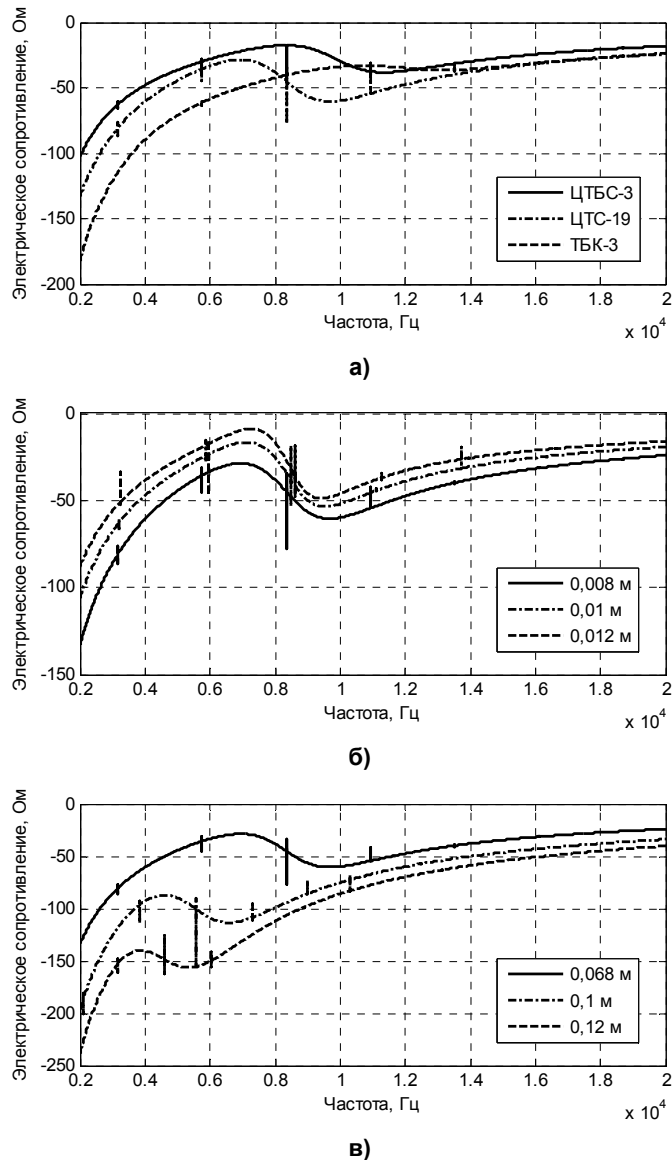


Рис. 2. Графики частотной зависимости активной составляющей входного электрического сопротивления излучателя силовой конструкции с окружающей поляризацией при заполнении внутренней полости воздухом при нормальном атмосферном давлении для: а - разных составов пьезокерамики, при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м; б – разных толщин пьезокерамической оболочки, состава пьезокерамики ЦТС-19,  $r_0 = 0,068$  м; в – разных средних радиусов оболочки для состава пьезокерамики ЦТС-19,  $h = 0,008$  м

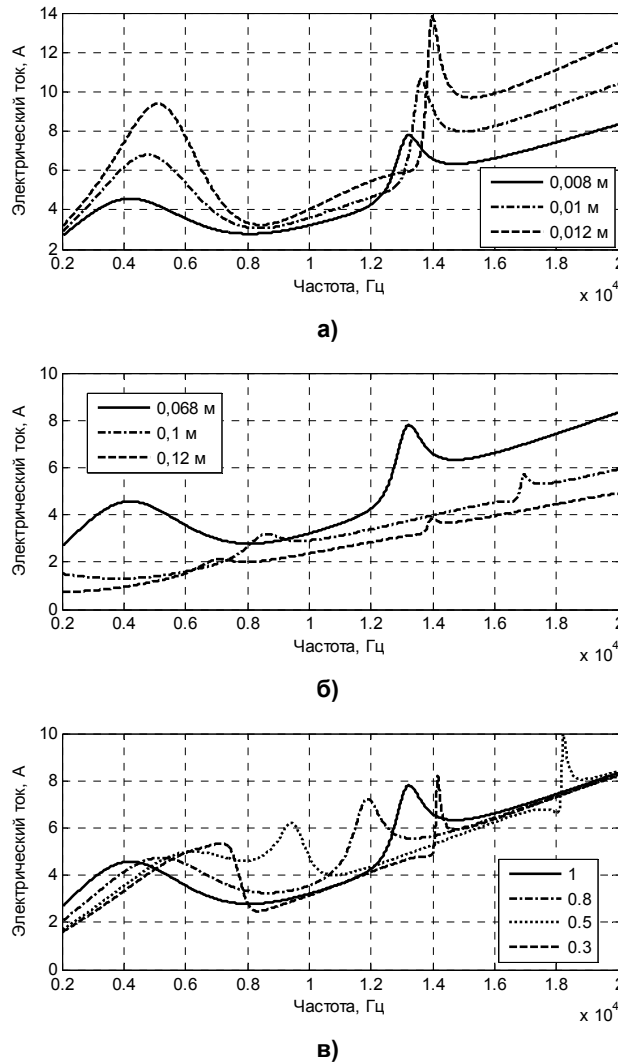


**Рис. 3.** Графики частотной зависимости реактивной составляющей входного электрического сопротивления излучателя силовой конструкции с окружной поляризацией при заполнении внутренней полости воздухом при нормальном атмосферном давлении для: а - разных составов пьезокерамики, при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м; б – разных толщин пьезокерамической оболочки, состава пьезокерамики ЦТС-19,  $r_0 = 0,068$  м; в – разных средних радиусов оболочки для состава пьезокерамики ЦТС-19,  $h = 0,008$  м

### Излучатели компенсированной конструкции

Результаты расчетов частотных зависимостей параметров электрического поля для излучателей компенсированной конструкции с ок-

ружной и радиальной поляризациями представлены на рис. 4-6.

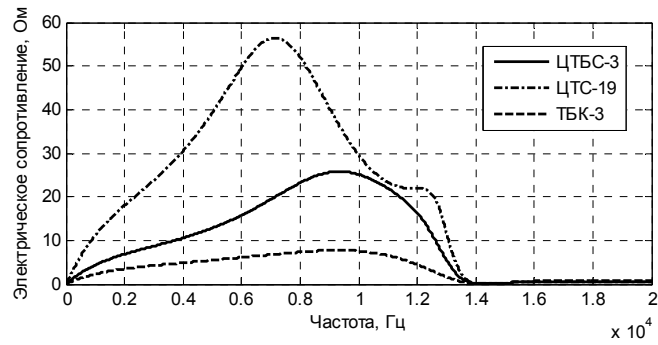


**Рис. 4.** Графики частотной зависимости электрического тока излучателя компенсированной конструкции с окружной поляризацией из пьезокерамики состава ЦТС-19 для: а – разных толщин пьезокерамической оболочки,  $r_0 = 0,068$  м; б – разных средних радиусов оболочки,  $h = 0,008$  м; в – заполнения внутренней полости излучателя жидкостями с разным волновым сопротивлением  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$  при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м

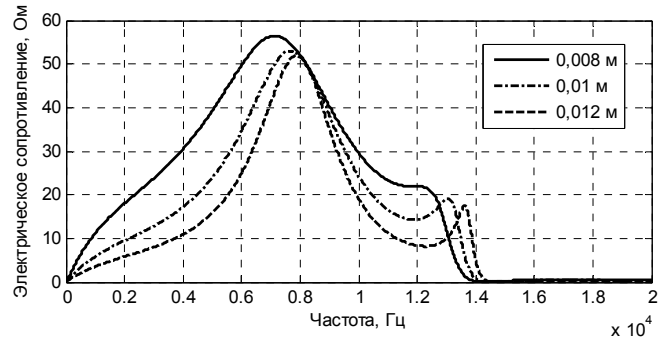
Анализ частотных характеристик электрического тока (рис. 4), протекающего через такой излучатель, показывает, что эффективность возбуждения вынужденных колебаний оболочки излучателя компенсированной конструкции выше, чем у силовой конструкции (рис. 1), причем в случае излучателя компенсированной конструкции эта эффективность в большей степени зависит также и от состава пьезокерамики, и от вида поляризации. При одном и том же питающем напряжении увеличение толщины пьезокерамической оболочки обуславливает повышение эффективности возбуждения колебаний в ней (рис. 4, а). Напротив, увеличение радиуса оболочки снижает эту эффективность (рис. 4, б), а изменение удельного волнового сопротивления среды, заполняющей внутреннюю полость излучателя, просто перераспределяет эффективность возбуждения колебаний оболочки по разным областям частот, оставляя

пределы изменения эффективности в исследуемом диапазоне частот практически неизменными на разных частотах для разных значений отношения  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$  (рис. 4, в). При этом для всех рассмотренных физических ситуаций практической реализации излучателей компенсированной конструкции сохраняется неизменной последовательность частот, для которых электрический ток в цепи возбуждения вначале увеличивается, а потом уменьшается.

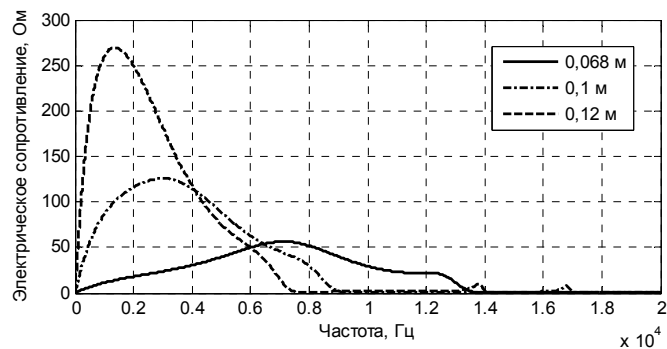
Анализ частотной зависимости модуля входного электрического сопротивления излучателя компенсированной конструкции показывает, что и в характере поведения, и даже в численных значениях, особенно для излучателей с радиальной поляризацией эти зависимости близки к тем, которые были получены для вакуумированных излучателей силовой конструкции.



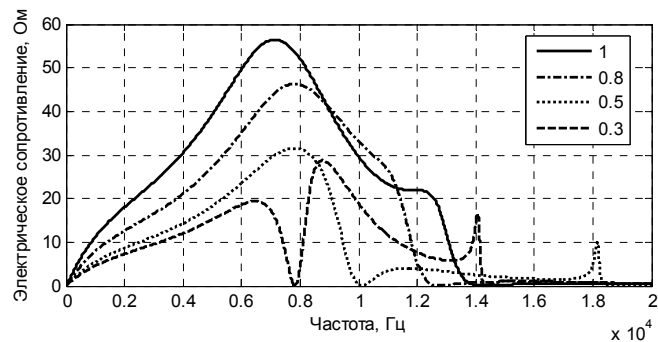
а)



б)



в)

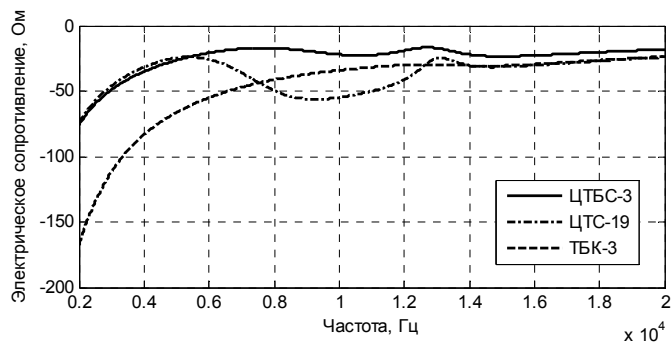


г)

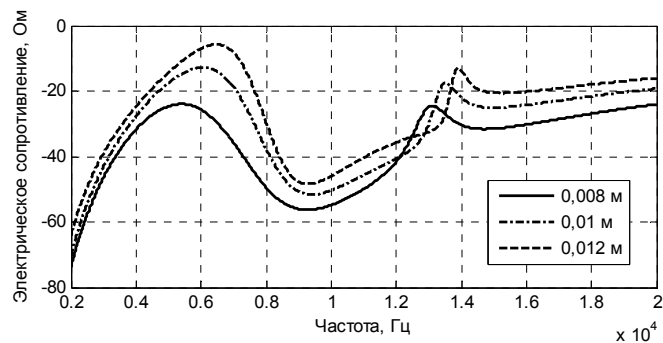
Рис. 5. Графики частотной зависимости активной составляющей входного электрического сопротивления излучателя компенсированной конструкции с окружной поляризацией для: а - разных составов пьезокерамики, при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; б - разных толщин пьезокерамической оболочки, состава пьезокерамики ЦТС-19,  $r_0 = 0,068$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; в - разных средних радиусов оболочки для состава пьезокерамики ЦТС-19,  $h = 0,008$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; г - заполнения внутренней полости излучателя жидкостями с разным волновым сопротивлением  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$  при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м

В то же время частотные зависимости активной (рис. 5) и реактивной (рис. 6) составляющих входного электрического сопротивления излучателя компенсированной конструкции существенно отличаются от таковых для излучателя силовой конструкции (рис. 2, 3). Активная составляющая характеризуется более широким диапазоном частот полезно используемой мощности в зависимости от состава пьезокерамики (рис. 5, а) и толщины пьезокерамической оболочки (рис. 5, б). При этом составы пьезокерамики с большими механическими и электрическими потерями (ЦТС-19), как и в случае

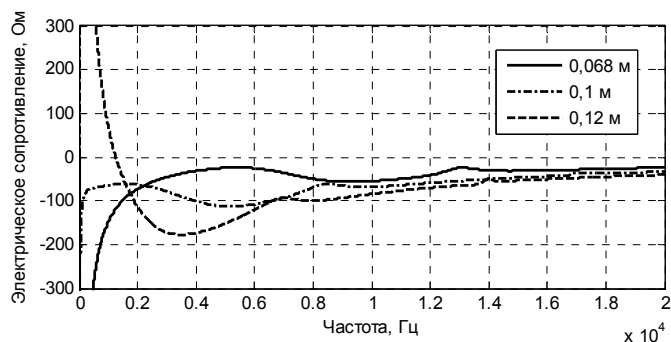
преобразователей силовой конструкции, обеспечивают более высокое активное сопротивление и у преобразователей компенсированной конструкции. Особой сложностью отличается характер поведения активной составляющей входного электрического сопротивления при изменении радиуса пьезокерамической оболочки (рис. 5, в) и волнового сопротивления среды (рис. 5, г) внутри преобразователя компенсированной конструкции. Впрочем такой же сложностью характеризуется и внешнее звуковое поле таких преобразователей [7].



а)



б)



в)



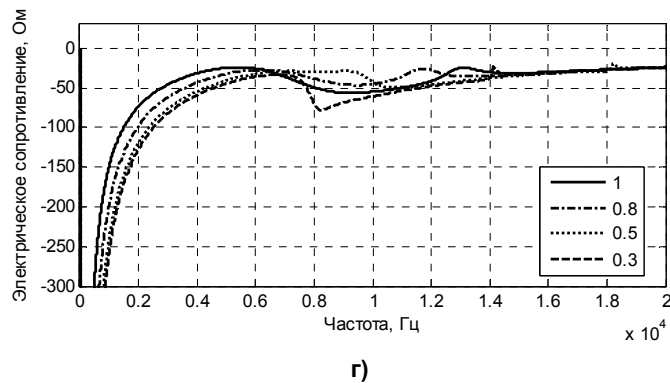


Рис. 6. Частотная зависимость реактивной составляющей входного электрического сопротивления излучателя компенсированной конструкции с окружной поляризацией для: а - разных составов пьезокерамики, при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; б - разных толщин пьезокерамической оболочки, состава пьезокерамики ЦТС-19,  $r_0 = 0,068$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; в - разных средних радиусов оболочки для состава пьезокерамики ЦТС-19,  $h = 0,008$  м,  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ ; г - заполнения внутренней полости излучателя жидкостями с разным волновым сопротивлением  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$  при  $r_0 = 0,068$  м,  $h = 0,008$  м

Реактивная составляющая входного электрического сопротивления излучателя компенсированной конструкции характеризуется значительной электрической емкостью и близка по характеру поведения к реактивности излучателя силовой конструкции при разных составах пьезокерамики (рис. 6, а), разной толщине пьезокерамической оболочки (рис. 6, б) и разным волновым сопротивлениям среды внутри излучателя (рис. 6, г.) Исключением является частотная зависимость реактивного сопротивления при радиусе оболочки  $r_0 = 0,12$  м, которая при низких частотах ( $f < 350$  Гц) приобретает характер индуктивности (рис. 6, в).

## Выводы

Проведен сопоставительный анализ электрических свойств цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкций с окружной и радиальной поляризациями. Установлены закономерности поведения электрического тока, модуля, активной и реактивной составляющих входного электрического сопротивления излучателя в зависимости от вида поляризации, физических параметров различных составов пьезокерамики, геометрических параметров излучателя и физических характеристик сред, заполняющих его внутреннюю полость.

Полученные результаты могут быть использованы при выполнении проектных работ излучателей рассматриваемых типов и конструкций.

## Список использованных источников

1. Аронов. Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Л.: Энергоатом издат., 1990. – 272 с.

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. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций - Киев: Наук. думка, 1989. - Т.5. Электроупругость - 280 с.
4. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Электроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навчальний посібник. – Кіровоград: "Імекс-ЛТД", 2006. – 448 с.
5. Коржик О.В. Врахування типу електродування сферичного електропружного перетворювача в наскрізних задачах прийому звуку багатомодовими системами// Електроніка і зв'язь. - 2013. - №1 – С.76-86.
6. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом// Електроніка і зв'язь. - 2013. - №5 – С.50-55.
7. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами// Електроніка і зв'язь. - 2013. - №6 – С. 62-73.
8. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988. – 200 с.

Поступила в редакцию 12 февраля 2014 г.

УДК 534.231

**О.Г. Лейко**, д-р.тех.наук, **Н.Д. Гладких**, **О.І. Нижник**, **Я.І. Старовойт**

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів»,

вул. Сурикова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

## **Електричні властивості циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкції з окружною поляризацією**

*Виходячи з єдиних методичних позицій, отримано широкий числовий матеріал про електричні властивості циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій. На його основі, в широкому діапазоні частот, встановлено кількісні зв'язки між електричним током, модулем, активною та реактивною складовими електричного опору цих випромінювачів та типом використовуваної поляризації, фізичними параметрами різних марок п'єзокерамічної оболонки випромінювачів, геометричними розмірами конструкції випромінювачів та фізичними характеристиками середовищ, що заповнюють їх внутрішню порожнину. Порівняльний аналіз отриманих даних дозволив встановити ряд тонких ефектів в поведінці електричних полів випромінювачів, що розглядаються. Бібл. 8, рис. 10.*

**Ключові слова:** електричні поля, циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, окружна та радіальна поляризація, силова та компенсована конструкція, фізичні характеристики.

UDC 534.231

**N.V. Bogdanova**, Ph.D., **N.D. Hladkih**, **A.G. Leiko**, Dr.Sc., **A.I. Nyzhnyk**, **Y.I. Starovoyt**

State Enterprice Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,

st. Surikova, 3, Kiev, 03035, Ukraine.

## **Electrical properties of cylindrical piezoceramic emitters with power and compensated design with circumferential polarization**

*Based on the common technical positions, obtained extensive numerical data on the electrical properties of cylindrical piezoceramic emitters with compensated and power design. On its base, was found quantitative relationship between electric current module, active and reactive components of the electrical resistance of these emitters and the type of used polarization, the physical parameters of different formulations of the piezoceramic shell emitters, the geometrical dimensions of the emitter design and physical characteristics of the medium filling their internal cavity. Comparative analysis of the obtained data allowed us to establish a few of subtle effects in the behavior of the electric fields of this type emitters. Reference 8, figures 10.*

**Keywords:** electric fields, cylindrical piezoceramic emitter, circumferential and radial polarization, power and compensated design, physical characteristics.

### **References**

1. Aronov B.S. (1990) "Electromechanical transducers of a piezoelectric ceramic". Leningrad. Energoatomizdat izdat., P. 272. (Rus)
2. Bogorodskiy V.V., Zubarev L.A. Korepin E.A. Yakushev V.I. (1983) "Underwater electroacoustic transducers. (Calculation and design). Handbook". Leningrad, Shipbuilding. P. 248. (Rus)
3. Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shulga N.A. (1989), "Mechanics related fields in structural elements. Vol.5. Electroelasticity". Kiev, Naukova dumka. P. 280. (Rus)
4. Didkovskij V.S., Lejko O.G., Savin V.G. (2006), "Electroacoustic piezoceramic transducers (calculation, design, construction). Education manual". Kirovograd, "Imex-LTD". P.448 (Ukr)

- 
5. *Korzhyk O.V.* (2014) "Accounting the electroding type of spherical electroelastic transducer at through objectives receiving sound by multimode systems". *Electronics and Communication*, №1, pp. 76-86. (Rus)
  6. *Leiko A.G., Nyzhnyk A.I., Starovoyt Y.I.* (2013), "Sound fields of piezoceramic emitters with different piezoelectric effect". *Electronics and Communication*. №4. pp. 50-55. (Rus)
  7. *Leiko A.G., Nyzhnyk A.I., Starovoyt Y.I.* (2013), "Acoustic properties of cylindrical piezoceramic emitters with power and compensated design with longitudinal and transverse piezoelectric effect". *Electronics and Communication*. №6. pp. 62-73. (Rus)
  8. *Sverdlin G.M.* (1988) "Sonar transducers and antennas". Leningrad, Shipbuilding. P. 200. (Rus)