На правах рукописи

Пестерев Иван Сергеевич

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА

Специальность: 01.04.06 – Акустика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Степанов Борис Георгиевич, доцент кафедры ЭУТ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Майоров Василий Семенович**, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук Стырикович Иосиф Иосифович, начальник сектора отдела 060 АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «3» декабря 2020 в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: https://etu.ru/

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.238.06.

Автореферат разослан «02» октября 2020

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.06 кандидат технических наук, доцент

All

Великосельцев А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гидроакустическая техника как средство научного исследования и практического освоения ресурсов Мирового океана имеет преобладающее значение среди прочих технических средств, поскольку звуковые волны – единственный вид излучения, которое распространяется в водной среде на большие дистанции. Эффективное решение целого ряда задач гидроакустики, сопряженных с необходимостью повышения разрешающей способности и работы в сложных помеховых условиях (в том числе, в условиях мелководья) для гидроакустических систем активного освещения подводной обстановки и сетевой звукоподводной связи, требует значительного расширения полосы пропускания используемых электроакустических преобразователей (ЭАП), и в первую очередь – работающих в режиме излучения. На современном этапе развития гидроакустической аппаратуры в качестве зондирующих сигналов чаще всего используются сложные, сравнительно узкополосные сигналы (например, с линейной частотной модуляцией), переход к которым произошел в 70-х–80-х годах XX века, т. е. около 40 лет назад.

В сложившейся ситуации проблемы обеспечения широкополосного излучения звуковых волн и связанные с ними задачи формирования акустических сверхширокополосных сигналов – в частности, коротких, перестраиваемых по частоте, или сравнительно сложных по своей структуре (например, фазоманипулированных) сигналов – приобретают все большую актуальность. Обозначенным вопросам посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов. Для расширения полосы пропускания ЭАП применяются традиционные методы: согласования акустических импедансов пьезоактивного элемента и рабочей среды, возбуждения нескольких мод колебаний ЭАП, электрической коррекции частотных характеристик с помощью пассивных и активных электрических цепей, возбуждения частей пьезоактивного элемента ЭАП различными по амплитуде и/или фазе электрическими напряжениями. Существенный вклад в развитие этих методов внесли Б.Н. Алексеев, Д.Б. Дианов, И.М. Задириенко, Б.А. Касаткин, В.И. Позерн, Б.Г. Степанов, А.L. Butler, J.L. Butler и ряд других исследователей. С целью получения широкополосного излучения используются также параметрические антенны и преобразователи волноводного типа.

Оптимальные параметры электрического возбуждения ЭАП, в том числе для формирования широкополосных акустических сигналов, определяются в результате решения задачи синтеза электрических напряжений по заданным характеристикам излучения с учетом определенной аналитически передаточной функции преобразователя, чему посвящены работы Б.А. Касаткина, А.В. Гончарского, Б.Г. Степанова. Наиболее интересными в этом отношении являются результаты, представленные в работах Б.Г. Степанова для стержневых и пластинчатых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением, в которых рассмотрено

решение задачи синтеза и показана возможность формирования равномерных амплитудночастотных характеристик (АЧХ) в полосе частот около 2 октав, а также – излучения акустических импульсов длительностью от 1,5 периодов колебаний и сигналов сложной формы.

Тем не менее, для большинства ЭАП проблематичным является то, что близкая к линейной фазочастотная характеристика (ФЧХ) излучения, которая в первую очередь определяет возможность неискаженного формирования коротких акустических сигналов, может быть получена в довольно ограниченном частотном диапазоне вблизи частоты собственного резонанса ЭАП. Перспективным решением в этом направлении является разработка и исследование гидроакустической системы (ГАС), построенной на базе водозаполненных преобразователей волноводного типа (ПВТ). Способ построения ПВТ, образованного соосным набором водозаполненных пьезоцилиндров, и их электрического возбуждения по принципу формирования во внутренней водозаполненной полости бегущей волны позволяет получить равномерную АЧХ и близкую к линейной ФЧХ излучения в трехоктавной полосе частот, что в совокупности определяет возможность формирования сверхширокополосных сигналов.

Целью работы является разработка излучающей ГАС, построенной на основе ПВТ, и определение основных параметров тракта излучения, обеспечивающих возможность формирования акустических сигналов заданной формы. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **теоретические и практические задачи**:

1. Разработать обобщенную расчетную модель ПВТ, которая учитывала бы влияние на его характеристики волн, отразившихся от излучающих апертур преобразователя, а также эффект расхождения излученных волн в заданном секторе области излучения.

2. При условии возбуждения ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза определить для его обобщенной модели частотные зависимости сопротивлений излучения и электрических напряжений возбуждения, входные электрические характеристики пьезоцилиндров.

3. Разработать необходимые алгоритмы и программное обеспечение для реализации способа электрического возбуждения макетных образцов антенн в составе ГАС в соответствии с решением задачи синтеза для ПВТ, а также для автоматизации измерительных процессов при проведении экспериментальных исследований.

4. Провести сопоставительный анализ расчетных данных и результатов экспериментальных исследований ГАС на основе ПВТ в части обеспечения широкополосного излучения и формирования акустических сигналов заданной формы.

Для решения поставленных задач использовались следующие методы исследования: сбор и обобщение данных о современном состоянии проблемы обеспечения широкополосного гидроакустического излучения и формирования импульсных сигналов с заданными

параметрами; математический анализ и моделирование ПВТ с использованием метода частичных областей; программирование; экспериментальные исследования с использованием макетных образцов гидроакустического оборудования.

Научная новизна работы определяется получением следующих новых научных результатов:

1. Разработана обобщенная расчетная модель ПВТ, звуковые поля которой определяются с использованием метода частичных областей с учетом характера расхождения формируемого волнового фронта путем решения задачи об излучении преобразователя в соосные водозаполненные конусообразные области с регулируемыми углами раскрыва.

2. Выполнено решение задачи синтеза для обобщенной модели ПВТ, в результате чего получены частотные зависимости сопротивлений излучения и электрических напряжений возбуждения пьезоцилиндров, определены их входные электрические характеристики.

3. Предложен комплекс схемотехнических и программных решений, который обеспечивает формирование акустических импульсов широкополосной ГАС, построенной на основе ПВТ, с соблюдением характера частотных зависимостей электрических напряжений возбуждения ПВТ, полученных в результате решения задачи синтеза для его расчетной модели.

4. Разработано программное обеспечение для проведения автоматизированных измерений АЧХ излучения и характеристик направленности (ХН) макетных образцов антенн исследуемой ГАС.

5. Установлены параметры обобщенной расчетной модели ПВТ, обеспечивающие наилучшее соответствие расчетных и экспериментально полученных АЧХ излучения ГАС, а также формы заданных и фактически излученных акустических сигналов.

6. Теоретически и экспериментально доказана возможность получения эффективного излучения с помощью макетных образцов антенн, составленных из ПВТ, в полосе пропускания не менее 3 октав.

7. Теоретически и экспериментально доказана возможность формирования с помощью макетных образцов антенн, составленных из ПВТ, сверхширокополосных акустических сигналов: коротких (1–1,5 периодов колебаний), перестраиваемых по частоте в пределах 2 октав импульсов и сложно структурированных сигналов китообразных.

В соответствии с результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Расчетная модель преобразователя волноводного типа (ПВТ), излучающего в конусные полупространства, учитывает влияние волн, отраженных от его излучающих апертур, и расхождение излучаемых звуковых волн, что обеспечивает соответствие данных экспериментальных исследований и результатов расчетов для АЧХ излучения и формы

коротких акустических импульсов при излучении ПВТ во фронтальном и тыльном направлениях.

2. Способ формирования акустических импульсов, базирующийся на решении задачи синтеза для ПВТ, обратном преобразовании Фурье от произведения частотных зависимостей электрических напряжений, подаваемых на его пьезоцилиндры, и спектральной плотности излучаемого сигнала, реализуется с помощью гидроакустической системы (ГАС), состоящей из ПВТ, *N*-канального программно управляемого цифрового блока формирования сигналов возбуждения и *N* широкополосных усилителей мощности, обеспечивая эффективное излучение ПВТ в трехоктавной полосе частот и формирование перестраиваемых по частоте коротких (1–1,5 периода колебаний) акустических импульсов.

3. На работу ГАС, состоящей из ПВТ, преимущественным образом влияют их последние по номеру пьезоцилиндры, выход из строя которых отражается в виде глубокого минимума на амплитудно-частотной характеристике системы в области радиального резонанса образующих ПВТ пьезоцилиндров.

4. При возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза его полоса частот порядка трех октав и возможность излучения коротких акустических сигналов сохраняются при уменьшении количества пьезоцилиндров, образующих ПВТ, вплоть до двух, минимально необходимых для реализации режима бегущей волны, но уровень излучения уменьшается.

Теоретическая и практическая значимость работы

Определение параметров обобщенной модели ПВТ, обеспечивающих наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных о формируемом сигнале, позволяет учесть реальный характер расхождения волнового фронта излучающей антенны ГАС на этапе решения задачи синтеза для формирования сверхширокополосных сигналов.

Результаты выполнения теоретических исследований обобщенной модели ПВТ, а также экспериментальных исследований макетных образцов ГАС, проведенных с помощью предложенного комплекса схемотехнических решений и разработанного программного обеспечения, продемонстрировали возможность их эффективного использования для решения широкого круга научно-исследовательских и прикладных задач гидроакустики. В частности, разработанный программный комплекс применялся в научно-исследовательских работах шифр «Цифалоида-ЛЭТИ» и «Инновация-ЛЭТИ», выполнявшихся на кафедре ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а в настоящее время используется для проведения лабораторных работ по дисциплине «Теория излучения, рассеяния и приема звука» кафедры ЭУТ.

Достоверность научных результатов, полученных в настоящей работе, обеспечивается сопоставлением данных расчетов для предложенной модели ПВТ с данными расчетов для частных случаев, полученных другими авторами, а также – подтверждением полученных

результатов расчета для предложенной модели ПВТ данными экспериментальных исследований макетов ПВТ, использованием стандартизованных методик обработки результатов измерений.

Апробация результатов работы проводилась в формате докладов и обсуждения на всероссийских конференциях: всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (Муром, 2019, 2020); XIII, XIV и XV всероссийские конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2016, 2018, 2020); 7-я всероссийская научнотехническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (Владивосток, 2017), а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с 67-й по 72-ю включительно (2014–2019).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них 5 работ в изданиях, рекомендуемых ВАК (включая 1 патент на полезную модель).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы из 159 наименований. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность работы, указаны цель и задачи исследования, обоснована новизна полученных научных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен анализу литературных источников, содержание которых отражает современное состояние проблемы обеспечения широкополосного излучения ЭАП и формирования сверхширокополосных сигналов: ультракоротких (длительностью 1-1,5 периода колебаний) акустических импульсов и сигналов сложной формы. Проведенный анализ показал, что наиболее широкие возможности управления частотными характеристиками излучения предоставляет использование метода возбуждения отдельных частей элемента ЭАП секционированного пьезоактивного электрическими напряжениями С различными амплитудами и/или фазами. Сделан вывод о том, что реализация оптимальных параметров возбуждения ЭАП осуществляется в результате решения задачи синтеза электрических напряжений по заданным характеристикам излучения.

Установлено, что возможности излучения широкополосных акустических импульсов для большинства известных конструкций ЭАП существенно ограничены по причине того, что формирование сигналов без искажения их спектра в первую очередь обеспечивается линейной ФЧХ излучения, и только потом – равномерной АЧХ излучения. При этом для реальных

преобразователей, независимо от ширины полосы пропускания, близкий к линейному характер ФЧХ излучения имеет место в небольшом диапазоне частот вблизи собственного резонанса.

Определено преимущество использования для достижения цели настоящей работы специального преобразователя волноводного типа (ПВТ), для которого указана возможность формирования широкополосного (~3 октавы) излучения (в соответствии с решением для него задачи синтеза) вместе с линейным характером ФЧХ излучения в рабочей полосе частот, что является определяющим условием неискаженного формирования широкополосных акустических сигналов. Сформулирована основная задача работы: разработка обобщенной расчетной модели ПВТ, учитывающей эффект расхождения излученных волн, а также влияние волн, отразившихся от его излучающих апертур. Указана необходимость использования собственного схемотехнического решения для построения системы возбуждения макетных образцов антенн, составленных из ПВТ.

Во втором разделе работы рассматривается структура и расчетная модель ПВТ (рисунок 1), который образован соосным набором *N* водозаполненных пьезоцилиндров 1, отделенных акустически гибкими прокладками 2 друг от друга, а также от металлических фланцев 3 герметичного корпуса. Возбуждение пьезоцилиндров осуществляется фазированными электрическими напряжениями, обеспечивающими режим формирования бегущей волны во внутренней водозаполненной полости преобразователя. Это обуславливает





линейность ФЧХ излучения ПВТ, а также приводит к последовательному повышению нагруженности пьезоцилиндров с увеличением порядкового номера и способствует расширению полосы пропускания преобразователя в целом. Ранее для описания работы ПВТ использовались два частных варианта решения задачи об излучении: в соосно расположенные цилиндрические волноводы и в полупространства. В настоящей работе с помощью обобщенной

модели ПВТ (рисунок 1) выполнена постановка задачи о его излучении в соосные конусные полупространства, изменение углов раскрыва которых $\theta_{F,T}$ позволяет выполнить плавное перестроение от одного частного случая ($\theta_{F,T} = 0$) к другому ($\theta_{F,T} = 90^{\circ}$).

Определение полевых характеристик обобщенной модели осуществляется с использованием метода частичных областей, при этом вся область существования звукового поля делится на частичные области I, II и III (см. рисунок 1) отдельно для фронтального и тыльного направлений ПВТ. В каждом из направлений излучения частичные области I и II разделены плоскостью апертуры ПВТ, а области II и III – поверхностью $S_{F,T}$. Для решения задачи используются две системы координат с общим центром в точке O_F : цилиндрическая (ρ , ϕ , z) и сферическая (r, θ , ϕ); зависимость от угла ϕ отсутствует ввиду осевой симметрии обобщенной модели. Предварительно решение задачи выполняется для *i*-го пьезоцилиндра с последующим суммированием по принципу суперпозиции.

Рассматривая фронтальное направление ПВТ, звуковое поле *i*-го пьезоцилиндра в частичной области I можно представить в виде суммы падающей волны с коэффициентами A_n и подобной ей отраженной волны с неопределенными коэффициентами B_{in} :

$$p_i^{\mathrm{I}} = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jk_n z_i^F} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z-z_F)} + \sum_{n=0}^{\infty} B_{in} e^{jk_n z_i^F} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{-jk_n (z-z_F)} \right]$$

где $K_i = -2z_0 v_i k_0 a$; $(v_i (\omega) = v_{im} (\omega) e^{j\psi_i(\omega)} -$ радиальная компонента колебательной скорости на внутренней поверхности пьезоцилиндра, $k_0 = \omega/c_0$; c_0 и z_0 – скорость звука и импеданс воды); β_n – корни уравнения $J_1(\beta_n) = 0$; $(n = 0, 1, 2...; \beta_0 = 0)$; $A_n = \frac{\sin(k_n l/2)}{J_0(\beta_n)(k_n a)^2}$; $k_n = \sqrt{k_0^2 - (\beta_n/a)^2}$.

Звуковое давление в области III определяется в сферической системе координат:

$$p_i^{\text{III}} = K_i \sum_{m=0}^{\infty} E_{im} P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right) h_m^{(1)} \left(k_0 r \right),$$

где E_{im} – неопределенные коэффициенты; $P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right)$ – полиномы Лежандра, записанные с учетом их отображения на полную сферу $0 \le \theta \le \pi$ для сохранения свойств ортогональности; $h_m^{(1)}(k_0 r)$ – сферические функции Ханкеля первого рода.

Звуковое давление *i*-го пьезоцилиндра в области II определено в следующем виде:

$$p_i^{\mathrm{II}} = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} C_{in} e^{jk_n z_i^F} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z-z_F)} + \sum_{m=0}^{\infty} D_{im} P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right) j_m \left(k_0 r \right) \right],$$

где C_{in} и D_{im} – неопределенные коэффициенты. Сферические функции Бесселя $j_m(k_0r)$ могут быть заменены на сферические функции Ханкеля $h_m^{(1)}(k_0r)$, но только при $\theta_{F,T} < \pi/2$, когда исключается их особенность при r = 0.

Для определения неизвестных коэффициентов в выражениях для звуковых давлений используется система функциональных уравнений, объединяющая условия сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на границах частичных областей:

$$\begin{array}{l} p_i^{\mathrm{I}} = p_i^{\mathrm{II}}; \\ \frac{\partial p_i^{\mathrm{I}}}{\partial z} = \frac{\partial p_i^{\mathrm{II}}}{\partial z} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{при } z = z_F \text{ и } 0 \leq \rho \leq a; \\ \frac{\partial p_i^{\mathrm{I}}}{\partial r} = \frac{\partial p_i^{\mathrm{II}}}{\partial r} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{при } r = r_F \text{ и } 0 \leq \theta \leq \theta_F \end{array}$$

Далее выполняется подстановка выражений для звуковых давлений *i*-го пьезоцилиндра в указанную выше систему уравнений. В ходе преобразований выражение для звукового давления в частичной области II на границе областей I–II ($z = z_F$) удобно представить в цилиндрической системе координат, заменяя сферические координаты θ и r на $\theta_{\rm u} = \arccos\left(z_F/\sqrt{z_F^2 + \rho^2}\right)$ и $r_{\rm u} = \sqrt{z_F^2 + \rho^2}$, а на границе областей II–III ($r = r_F$) – в сферической системе координаты ρ , z на $\rho_{\rm c} = r_F \sin \theta$, $z_{\rm c} = r_F \cos \theta$. В результате получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} B_{im} - C_{im} - \sum_{n=0}^{\infty} I_{imn}^{(1)} D_{in} = -A_m; & \sum_{n=0}^{\infty} I_{imn}^{(3)} C_{in} + j_m (k_0 r_F) D_{im} - h_m^{(1)} (k_0 r_F) E_{im} = 0; \\ B_{im} + C_{im} + \sum_{n=0}^{\infty} I_{imn}^{(2)} D_{in} = A_m; & \sum_{n=0}^{\infty} I_{imn}^{(4)} C_{in} + j_m' (k_0 r_F) D_{im} - h_m^{(1)'} (k_0 r_F) E_{im} = 0. \end{cases}$$

 $I_{imn}^{(3)} = \frac{2m+1}{2} e^{jk_n z_i^F} \int_0^{\theta_F} J_0\left(\beta_n \frac{\rho_c}{a}\right) e^{jk_n(z_c-z_F)} P_m\left(\cos\vartheta\right) \sin\vartheta d\vartheta;$

$$I_{imn}^{(4)} = \frac{2m+1}{2} e^{jk_n z_i^F} \int_{0}^{\theta_F} \left\{ \begin{bmatrix} -J_1\left(\beta_n \frac{\rho_c}{a}\right) \left(\frac{\beta_n}{k_0 a} \sin \frac{\theta_F \vartheta}{\pi}\right) + \\ +j \cdot J_0\left(\beta_n \frac{\rho_c}{a}\right) \frac{k_n}{k_0} \cos \frac{\theta_F \vartheta}{\pi} \end{bmatrix} e^{jk_n (z_c - z_F)} P_m(\cos \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta \right\};$$

 $x = \rho/a$, $\vartheta = \frac{\pi \theta}{\theta_F}$ – переменные интегрирования.

При излучении ПВТ в тыльном направлении может быть получена аналогичная бесконечная СЛАУ путем переноса начала используемых систем координат из точки O_F в точку O_T . Для определения полных звуковых давлений $p_{F,T}^{I, II, III}$ в частичных областях выполняется суммирование парциальных давлений, создаваемых пьезоцилиндрами; $p_{F,T}^{III}$ обозначает звуковое давление во внешней среде, ограниченной углом раскрыва конусов (области III). Полные звуковые давления определяются с учетом амплитудно-фазового распределения радиальной компоненты колебательной скорости $v_i(\omega) = v_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$ на внутренней цилиндрической поверхности ПВТ. Характер этого распределения ($v_{im}(\omega) = v_m = \text{const}, \psi_i(\omega) = k_0 d(i-1)$), в соответствии с постановкой задачи синтеза, задан в качестве исходного для системы уравнений, которая описывает колебательный процесс для *i*-го пьезоцилиндра в составе ПВТ:

$$\sum_{k=1}^{N} Z_{ik}^* v_k = N_T U_i$$

где v_k – радиальная компонента колебательной скорости *k*-го пьезоцилиндра (k = 1, 2, 3 ... N); N_T – коэффициент электромеханической трансформации; U_i – электрическое напряжение возбуждения; $Z_{ii}^* = Z_{ii}^{(S)} + Z_i^{(\Pi p)}$ (i = k); $Z_{ik}^* = Z_{ik}^{(S)}$ ($i \neq k$); $Z_{ii}^{(S)}$ и $Z_{ik}^{(S)}$ – собственное и взаимные сопротивления излучения, $Z_i^{(\Pi p)}$ – механический импеданс *i*-ого пьезоцилиндра (определен в разделе 3 работы). Решение системы уравнений относительно возбуждающих электрических напряжений позволяет определить их частотные зависимости, обеспечивающие заданный режим излучения.

Для разработанной обобщенной модели ПВТ выполнена оценка выполнения условий сопряжения звуковых полей на границах частичных областей. На рисунке 2 представлены АЧХ нормированных звуковых давлений во фронтальном направлении $\left| p_{F}^{I,\Pi,\Pi} \right|$ на оси ПВТ в частичных областях I, II и III, для двух крайних случаев излучения – в волновод ($\theta_{F} = 0,1^{\circ}$, принято при выполнении работы ввиду ограничения по минимальному значению углов раскрыва) и в полупространство ($\theta_{F} = 90^{\circ}$). Нормировка графиков осуществляется на величину

звукового давления в частичной области I для волнового размера $k_0 a = 2$, соответствующего частоте радиального резонанса пьезоцилиндра. Для представления результатов расчетов выбраны следующие параметры ПВТ: N = 10; l/a = 0,6; d/a = 0,66; $z_{don}/a = 0,95 l/a$.



Рисунок 2 – АЧХ звуковых давлений во фронтальном направлении ПВТ на границах областей I–II (кривые 1, 2) и II–III (кривые 3, 4): а) $\theta_F = 0,1^\circ$; б) $\theta_F = 90^\circ$

При излучении в волновод графики АЧХ звуковых давлений во всех трех областях практически полностью совпадают. В случае излучения в полупространство звуковое поле при прохождении полусферической области II заметно меняет характер своей частотной зависимости, что обусловлено расхождением волнового фронта. Выполнение условий сопряжения на границах смежных областей подтверждается не только на оси ПВТ, но и вдоль соответствующих границ.



Рисунок 3 – АЧХ звуковых давлений ПВТ для разных углов раскрыва конусных областей (при $\theta_{F,T} = 0,1^{\circ}$ и $\theta_{F,T} = 30^{\circ}$ в области II использованы сферические функции Ханкеля)

В третьем разделе работы выполняется решение задачи синтеза для обобщенной модели ПВТ, результатом которого являются частотные зависимости электрических напряжений $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$, обеспечивающие заданный режим излучения. Решение выполняется с учетом сопротивлений излучения образующих ПВТ пьезоцилиндров, для получения которых предварительно определяются звуковые давления падающих и отраженных от излучающих апертур звуковых волн отдельных пьезоцилиндров во внутренней водозаполненной полости ПВТ (частичной области I).

Собственное и взаимные сопротивления излучения пьезоцилиндров определяются с использованием выражения $Z^{(S)} = -\int_{S} \tilde{p}_{\Sigma} D_n ds/\tilde{v}$, где \tilde{p}_{Σ} и \tilde{v} – комплексные амплитуды суммарного звукового давления и колебательной скорости точки приведения; D_n – приведенная скорость элемента поверхности ds. Интегрирование выполняется по внутренней боковой поверхности пьезоцилиндра $S = 2\pi al$, при этом $D_n = 1$; $\tilde{v} = v_i$. Собственное $Z_{ii}^{(S)}$ и взаимные $Z_{ik}^{(S)}$ сопротивления излучения *i*-го пьезоцилиндра определяются выражениями:

$$Z_{ii}^{(S)} = Z_{ii} + Z_{ii}^{(R)}; \qquad Z_{ik}^{(S)} = Z_{ik} + Z_{ik}^{(R)},$$

где
$$Z_{ii} = jz_0 S \left[\frac{J_0(k_0 a)}{J_1(k_0 a)} - \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(k_n l/2) e^{jk_n l/2}}{(k_n a)^3} \right] \qquad \text{M} \qquad Z_{ik} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jk_n d|i-k|} G_n \qquad -$$

собственное и взаимные сопротивления излучения *i*-го пьезоцилиндра без учета воздействия на него отраженных от апертур ПВТ звуковых волн; $Z_{ii}^{(R)} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \left[B_{in}^F e^{j2k_n z_i^F} + B_{in}^T e^{-j2k_n z_i^T} \right] G_n$

и
$$Z_{ik}^{(R)} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \left[B_{kn}^F e^{jk_n \left(z_k^F + z_i^F \right)} + B_{kn}^T e^{-jk_n \left(z_k^T + z_i^T \right)} \right] G_n$$
 – составляющие собственного и

взаимных сопротивлений излучения, обусловленные влиянием отраженных волн; $G_n = J_0(\beta_n) \sin(k_n l/2) / (k_n a)$.

Полное сопротивление излучения *i*-го пьезоцилиндра определяется с учетом взаимодействия по полю с другими пьезоцилиндрами выражением:

$$Z_{Si} = Z_{i1}^{(S)} \frac{v_1}{v_i} + Z_{i2}^{(S)} \frac{v_2}{v_i} + \dots + Z_{ii}^{(S)} + \dots + Z_{iN}^{(S)} \frac{v_N}{v_i}$$

На рисунке 4 приведены нормированные к величине z_0S частотные зависимости модуля полного сопротивления излучения $|z_{Si}| = |Z_{Si}|/(z_0S)$ для разных углов раскрыва $\theta_{F,T}$ конусных областей обобщенной модели. Нумерация кривых: 1 - i = 1; 2 - i = 4; 3 - i = 7; 4 - i = 10. При использовании обобщенной модели во всем интервале значений углов раскрыва $0 < \theta_{F,T} \le 90^\circ$ сохраняется отмечавшаяся ранее для частных моделей ПВТ тенденция увеличения значений $|z_{Si}|$ с ростом порядкового номера *i* пьезоцилиндра, в основном для области частот вблизи и выше радиального резонанса пьезоцилиндра. Увеличение углов раскрыва $\theta_{F,T}$ относительно случая излучения в цилиндрические волноводы ($\theta_{F,T} = 0,1^\circ$) приводит к заметному усилению осцилляций в частотных зависимостях $|z_{Si}|$, а также к увеличению значений модуля полного сопротивления излучения в низкочастотной области рабочего диапазона частот ПВТ.





Указанные особенности наблюдаются и для частотных зависимостей амплитуд возбуждающих пьезоцилиндры электрических напряжений U_{im} , полученных в результате решения задачи синтеза, что подтверждается графиками на рисунке 5. Характер поведения частотных зависимостей фаз φ_i электрических напряжений (рисунок 6) последовательно изменяется с ростом номера пьезоцилиндра от вида, подобного ФЧХ излучения одиночного

пьезоцилиндра (i = 1), до практически линейной ФЧХ излучения ПВТ (i = 10). Увеличение углов раскрыва конусных областей $\theta_{F,T}$ сопровождается повышением уровня осцилляций ФЧХ напряжений ПВТ, которое заметнее всего для пьезоцилиндров с начальными номерами.



Рисунок 5 – Частотные зависимости амплитуд электрических напряжений, подаваемых на пьезоцилиндры обобщенной модели ПВТ

В рамках третьего раздела работы проанализированы также частотные зависимости полной входной проводимости пьезоцилиндров и косинуса угла фазового сдвига между возбуждающим электрическим напряжением U_i и током I_i , протекающим через пьезоцилиндр, для обобщенной модели ПВТ. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что входные электрические характеристики пьезоцилиндров слабо зависят от изменения их нагруженности при перестроении конусных областей излучения, и в большей степени – от порядкового номера пьезоцилиндра в составе ПВТ. При этом основным компонентом входной проводимости пьезоцилиндров является ее емкостная составляющая.



Рисунок 6 – Частотные зависимости амплитуд электрических напряжений, подаваемых на пьезоцилиндры обобщенной модели ПВТ

Выполнена приближенная оценка электроакустического коэффициента полезного действия ПВТ, который в области частоты радиального резонанса образующих преобразователь

пьезоцилиндров составляет 40–50 % (при условии достаточной нагруженности излучающих апертур ПВТ в составе антенны) с учетом формируемой полосы пропускания не менее 3 октав.

Четвертый раздел работы содержит описание основных аспектов построения излучающей ГАС на основе ПВТ. Приведена схема системы возбуждения макетных образцов антенн, составленных из ПВТ (рисунок 7), где в качестве формирователя импульсов возбуждающих напряжений используется управляющий персональный компьютер ПК с установленными вычислительными пакетами МАТLAB и LabVIEW. Электронная аппаратура тракта излучения включает в себя блок формирования сигналов – БФС (многоканальный блок цифроаналогового преобразования с внутренней памятью сигналов и программным управлением) и Q многоканальных блоков усилителей мощности – МБУМ $_q$ (q = 1, 2, ..., Q). Каждый МБУМ $_q$ образован набором N идентичных усилителей УМ $_{qi}$ (i = 1, 2, ..., N), которые формируют импульсные напряжения возбуждения пьезоцилиндров U_{qi} . Указанное схемотехническое решение вместе с разработанным программным обеспечением позволяет реализовать на практике способ возбуждения ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза.



Рисунок 7 – Система возбуждения макетных образцов антенн, составленных из ПВТ

В рамках четвертого раздела работы приведено также описание макетных образцов антенн, составленных из ПВТ (рисунок 8), каждый из которых содержит N = 10 пьезоцилиндров, в двух исполнениях – с частотой радиального резонанса пьезоцилиндров $f_{\rm p} = 30$ кГц (макет 1) и $f_{\rm p} = 44$ кГц (макет 2). Герметичная воздухозаполненная конструкция макетов антенн обеспечивает условие свободной внешней поверхности пьезоцилиндров ПВТ.

Приведено описание и состав оборудования контрольно-измерительного стенда на базе заглушенного гидроакустического бассейна, который используется при проведении экспериментальных исследований макетов антенн. Выполнена разработка и практическая апробация алгоритмов автоматизированного измерения АЧХ и ХН исследуемых макетов антенн с помощью виртуального прибора в среде LabVIEW, использование которого обеспечивает возможность управления испытательным оборудованием контрольноизмерительного стенда и процессом автоматического формирования импульсов



Рисунок 8 – Макетные образцы антенн, составленных из ПВТ

электрических напряжений возбуждения ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза. Использование LabVIEW для построения управляющего виртуального прибора позволило реализовать различные измерительные алгоритмы (работа с массивами данных, цифровая обработка сигналов и т.п.) с помощью встроенных функциональных узлов, а также специально разработанных подпрограмм для управления оборудованием контрольно-измерительного стенда с функцией программного контроля.

В пятом разделе работы продемонстрирована возможность формирования с использованием макетов антенн, составленных из ПВТ, эффективного широкополосного Установлено, исследуемых наилучшее соответствие излучения. что для макетов экспериментально полученным АЧХ чувствительности в режиме излучения демонстрируют АЧХ расчетных звуковых давлений для случая $\theta_{F,T} \approx 45^{\circ}$, т.е. приблизительно в средней части диапазона значений углов раскрыва конусных областей обобщенной модели ПВТ. Это соответствие проявляется как для общего вида АЧХ излучения макетов, так и для реализуемой ширины полосы пропускания макетов. В качестве примера на рисунке 9, а показаны экспериментальные АЧХ чувствительности в режиме излучения $\beta [\Pi a \cdot M/B]$ во фронтальном и тыльном направлениях (кривые 1 и 1') макета 1 и соответствующие им расчетные АЧХ звукового давления $\left| p_{F,T}^{\mathrm{III}} \right|$ (кривые 2 и 2') обобщенной модели ПВТ с углами раскрыва конусных областей $\theta_{F,T} = 45^{\circ}$, а также для $\theta_{F,T} = 30^{\circ}$ (кривая 3) и $\theta_{F,T} = 60^{\circ}$ (кривая 4) во представлены фронтальном направлении. Аналогичным образом на рисунке 9, б

экспериментальные (кривые 1 и 1') и расчетные (кривые 2 и 2', $\theta_{F,T} = 45^{\circ}$) АЧХ излучения макета 2. Для удобства сопоставления графиков здесь и на рисунке 10 расчетные АЧХ звукового давления приведены к экспериментально полученному значению чувствительности $\beta [\Pi a \cdot M/B]$ на частоте f_p радиального резонанса пьезоцилиндров макетов.



Рисунок 9 – АЧХ чувствительности в режиме излучения макетов 1 (а) и 2 (б) в сравнении с результатами расчетов для обобщенной модели ПВТ

В ходе экспериментальных исследований был также затронут вопрос влияния на АЧХ излучения макета антенны отказа одного «слоя» пьезоцилиндров с одинаковым номером *i* всех ПВТ макета. В качестве примера на рисунке 11 представлены результаты измерения АЧХ чувствительности β, Па·м/В, макета 1, где кривая 1 соответствуют обычной работе ПВТ,



Рисунок 10 – Расчетные (а) и экспериментально полученные (б) АЧХ излучения макета 2 для разного количества пьезоцилиндров в составе ПВТ

а кривые 2 и 3 – случаям «отказа» (т.е. отключения) пьезоцилиндров с номерами i = 5 и i = 10 соответственно. При увеличении порядкового номера «отказавших» пьезоцилиндров усиливается влияние «отказа» на АЧХ излучения макета. Это обусловлено тем, что отключенные пьезоцилиндры при падении на них акустической волны совершают колебания на частоте собственного радиального резонанса и действуют как поглотители акустического излучения, подобно полосовым фильтрам.



Рисунок 11 – Влияние на экспериментально полученные АЧХ излучения макета 1 (кривая 1) «отказа» пьезоцилиндров с номерами *i* = 5 (кривая 2) и *i* = 10 (кривая 3)

Экспериментально продемонстрирована возможность излучения, с помощью исследуемых макетов, коротких акустических сигналов (длительностью 1–1,5 периода колебаний) при изменении их несущей частоты более чем в двухоктавном диапазоне. В качестве примера на рисунке 12 приведены акустические сигналы $s_{a\kappa}(t)$, сформированные макетом 1 при возбуждении его ПВТ однопериодным импульсом в соответствии с решением задачи синтеза. На рисунке 12 для сигналов с частотой 15 и 30 кГц развертка по времени

составляет 100 мкс/дел, а для сигналов с частотой 45 и 60 кГц – 50 мкс/дел. Форма экспериментальных акустических импульсов достаточно близка к одному периоду колебаний и может быть сохранена практически в двухоктавном диапазоне частот.



Рисунок 12 – Перестройка по частоте короткого акустического импульса, излученного макетом 1 при возбуждении его однопериодным импульсом

Для сопоставления с экспериментальными импульсами на рисунке 13 приведены расчетные акустические сигналы $s_{a\kappa}^{(p)}(t)$, полученные с использованием обобщенной модели ПВТ с углами раскрыва конусных областей $\theta_{F,T} = 45^{\circ}$ и нормированные к максимальной амплитуде в полосе частот. Использование расчетной модели ПВТ, учитывающей расхождение волнового фронта и отражение звуковых волн от излучающих апертур, позволяет добиться наиболее полного соответствия расчетных и экспериментальных импульсов в части изменения их амплитуды и формы их отдельных полупериодов при изменении несущей частоты.



Рисунок 13 – Перестройка по частоте расчетного акустического импульса для макета 1

Исследована также возможность излучения акустических сигналов дельфинов, средняя частота спектра которых в 2–3 раза выше средней частоты рабочего диапазона имеющихся макетов антенн, составленных из ПВТ. На рисунке 14, а показаны реальные нормированные сигналы дельфина, восстановленные после пересчета их спектра в область более низких рабочих частот макетов, а на рисунке 14, б – биоподобные акустические импульсы $s_{\rm ak}(t)$,

излученные с помощью макетов 1 и 2. Приведенные результаты демонстрируют вполне удовлетворительное визуальное соответствие акустических сигналов, излученных макетами, и реальных, хотя и промасштабированных по частоте, сигналов дельфина. Особо отмечена возможность формирования двух расположенных рядом однополярных полупериодов колебаний, трудно реализуемых с помощью других преобразователей и систем.



Рисунок 14 – Примеры формирования биоподобных акустических сигналов: а) реальные сигналы дельфинов с учетом масштабирования по частоте; б) излученные макетами 1 и 2

Приведенные в работе результаты измерения ХН макетов антенн, составленных из ПВТ, демонстрируют хорошее соответствие результатам расчетов для плоских антенн, составленных излучателей, ИЗ круглых поршневых которыми можно считать соответствующие водозаполненные апертуры ПВТ. Экспериментально полученные XH макетов показывают однонаправленность излучения в основном рабочем диапазоне выраженную частот в соответствии с их АЧХ излучения. Продемонстрирована также возможность сканирования ХН макетов, как для стационарного (при формировании радиоимпульсов), так и для импульсного (при излучении коротких сигналов) режимов работы. По результатам измерения полевых характеристик макетов антенн выполнена оценка эффективности излучения ПВТ, которая показывает возможность получения удельной мощности излучения $P_{yg} \approx 1$ Bt/cm² при возбуждении электрическим полем напряженностью $E \approx 500$ B/см.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработана обобщенная расчетная модель ПВТ, учитывающая эффект расхождения сформированного волнового фронта в заданном секторе области излучения, с использованием метода частичных областей, для которого выполняются условия сопряжения звуковых полей на границах частичных областей модели. Показано, что при изменении углов раскрыва конусных областей излучения от одного крайнего значения (излучение в цилиндрические волноводы) к другому (излучение в полупространства) АЧХ излучения ПВТ демонстрируют достаточно плавное перестроение, обусловленное возрастающим расхождением волнового фронта.

При условии возбуждения ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза получены собственные и взаимные сопротивления излучения пьезоцилиндров. Показано, что для составляющих сопротивлений излучения, которые учитывают влияние отраженных от излучающих апертур волн, характерно наличие осцилляция в частотных зависимостях, уровень которых снижается с ростом частоты и повышается при увеличении углов раскрыва конусных областей излучения обобщенной модели. Такие особенности наблюдаются и для частотных зависимостей возбуждающих пьезоцилиндры электрических напряжений, полученных в результате решения задачи синтеза.

Исследована система возбуждения макетных образцов антенн, составленных из ПВТ, где в качестве формирователя импульсов возбуждающих напряжений используется управляющий персональный компьютер с вычислительным пакетом МАТLAB. Электронная аппаратура тракта излучения включает в себя многоканальный блок цифроаналогового преобразования с внутренней памятью сигналов и программным управлением, а также многоканальные блоки усилителей мощности. Указанное схемотехническое решение позволяет реализовать на практике способ возбуждения ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза, обеспечивая: широкополосное излучение макетов антенн, составленных из ПВТ, а также возможность формирования с их помощью коротких, перестраиваемых по частоте импульсов и сигналов сложной формы.

Путем сравнительного анализа результатов эксперимента и расчетных данных, полученных при использовании обобщенной модели ПВТ, показано лучшее соответствие реальных АЧХ излучения макетов результатам расчетов, учитывающих влияние углов раскрыва $\theta_{F,T}$ конусных областей, особенно для случая $\theta_{F,T} \approx 45^{\circ}$, т.е. в средней части диапазона изменения значений $\theta_{F,T}$. Это соответствие проявляется как для общего вида АЧХ излучения, так и для реализуемой ширины полосы пропускания макетов, а также – для формы излученных акустических сигналов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Пестерев И.С. Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – № 8. – С. 55–62.

2. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 2. – С. 35–45.

3. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 5. – С. 60–70.

4. Пестерев И.С., Сосновский Н.Н., Степанов Б.Г. Излучение преобразователем волноводного типа в соосные с ним конусные полупространства // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – № 1. – С. 70–82.

5. Пат. RU 176673 U1 МПК G01S 3/801. Устройство формирования акустических сигналов / Пестерев И.С., Степанов Б.Г. – Опубл. 25.01.2018. – Бюл. № 3.

6. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Экспериментальные исследования сверхширокополосных преобразователей волноводного типа // Тр. XIII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб, 2016. – С. 418–421.

7. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследования широкополосной гидроакустической системы, способной имитировать сигналы китообразных // Материалы 7-й Всероссийской науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». – Владивосток, 2017. – С. 449–454.

8. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследование влияния параметров преобразователей волноводного типа на их частотные и импульсные характеристики // Тр. XIV Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб, 2018. – С. 607–611.

9. Пестерев И.С., Сосновский Н.Н., Степанов Б.Г. Расчетная модель сверхширокополосного гидроакустического преобразователя волноводного типа, излучающего в конусные полупространства // Материалы Всероссийской откр. науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2019. – С. 561–570.

10. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Решение задачи синтеза для преобразователя волноводного типа, излучающего в конусные полупространства // Материалы Всероссийской откр. науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2020. – С. 338–349.

11. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Обобщенная модель преобразователя волноводного типа // Всероссийская конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб, 21–25 сентября 2020 (материалы доклада приняты к опубликованию в сборнике трудов).

12. Пестерев И.С., Степаненко Н.В., Степанов Б.Г. Разработка контрольно-измерительного стенда для автоматизированного измерения направленных и частотных характеристик гидроакустических антенн // Сб. докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 67 Науч.техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2014. – С. 177–182.

13. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Экспериментальные исследования полевых и импульсных характеристик преобразователей волноводного типа // Сб. докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 68 Науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2015. – С. 180–185.

14. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. О расширении функциональных возможностей контрольно-измерительного стенда кафедры ЭУТ для автоматизации измерений частотных и направленных характеристик антенн // Сб. докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 69 Науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2016. – С. 215–220.

15. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Некоторые аспекты исследования преобразователей волноводного типа // Сб. докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 70 Науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2017. – С. 215–220.