

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70

УДК 534.232

И. С. Пестерев, Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований макетов антенн гидроакустической системы (ГАС), содержащей преобразователи волноводного типа (ПВТ), которые представляют собой соосный набор идентичных водозаполненных пьезоцилиндров, электрически возбуждаемых в режиме формирования бегущей волны во внутренней полости ПВТ. Для исследуемой ГАС проанализированы возможности ПВТ при их возбуждении согласно решению задачи синтеза. Возбуждение ПВТ, осуществляемое программно-управляемыми многоканальными блоками, обеспечивает близкую к равномерной амплитудно-частотную и практически линейную фазочастотную характеристики излучения в полосе пропускания порядка трех октав. Показана возможность излучения в указанной полосе частот перестраиваемых по частоте ультракоротких импульсов, а также формирования сигналов, подобных сигналам китообразных. Проанализировано влияние числа пьезоцилиндров, входящих в состав ПВТ, и характера их возбуждения на частотные и импульсные характеристики макетов антенн исследуемой ГАС. Исследованы характеристики направленности макетов антенн, составленных из ПВТ, в том числе в режиме сканирования характеристики направленности. Выполнена сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных, а также оценка эффективности излучения ПВТ.

Ключевые слова: широкополосный преобразователь волноводного типа, синтез частотных характеристик, короткие акустические сигналы

Для цитирования: Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70

Ivan S. Pesterev, Boris G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

RESEARCH OF WIDEBAND HYDRO ACOUSTIC SYSTEM, CONTAINING TRANSDUCERS OF WAVEGUIDE TYPE

Abstract. The results of experimental research of models of antennas hydroacoustic system (HAS), containing transducers of the waveguide type (TWT), which represent a coaxial set of identical water-filled piezocylinders, electrically excited by the principle of a traveling wave formation in the inner cavity of the TWT, are given. Possibilities of the TWT are analyzed when they are excited in accordance with the solution of the synthesis problem for the investigated HAS. The realization of such excitation is carried out by means of software-controlled multichannel blocks and allows providing a close to uniform amplitude-frequency characteristic of radiation and linear phase-frequency characteristic of radiation in a 3-octave frequency band. The possibility of radiation in this band of ultrashort pulses, tunable in frequency, as well as the formation of signals similar to the signals of cetaceans, is shown. The influence of the number of active piezocylinders of the TWT and the character of its electric excitation on the frequency and impulse response of the investigated HAS is considered. Directional properties of models of antennas HAS, including scanning and pulse operation modes, are considered. A comparative evaluation of the calculated and experimental data, as well as an evaluation of the efficiency of the TWT radiation, is given.

Keywords: wideband transducer of waveguide type, synthesis of frequency characteristics, short acoustic signals

For citation: Pesterev I. S., Stepanov B. G. Research of Wideband Hydro Acoustic System, Containing Transducers of Waveguide Type. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70 (In Russian)

Введение. Одной из актуальных проблем акустического приборостроения является разработка гидроакустических преобразователей и составленных из них антенн, способных формировать в водной среде широкополосные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) излучения, а также сложные по структуре или сравнительно короткие, перестраиваемые по частоте, акустические сигналы. Применение гидроакустических систем (ГАС) на базе таких антенн целесообразно для решения целого ряда задач гидроакустики, связанных, например, с необходимостью повышения разрешающей способности эхолотов и их работой в сложной помеховой обстановке. Для расширения полосы пропускания преобразователей используются: согласующие фронтальные слои (накладки), возбуждение ряда мод колебаний в одном преобразователе, акустические системы с разночастотными преобразователями, корректирующие пассивные или активные электрические цепи в схемах возбуждения преобразователей и др. [1]–[6]. Недостатком большинства таких решений и устройств является то, что даже при достижении относительно широкополосных АЧХ излучения (порядка 1–2 октав) их фазочастотная характеристика (ФЧХ) излучения отличается от линейной. Это значительно ограничивает возможность формирования сложных и коротких акустических сигналов. Перспективным решением в этом направлении является разработка и исследование широкополосной ГАС, построенной на базе водозаполненных преобразователей волноводного типа (ПВТ), которые обладают близкой к линейной ФЧХ излучения.

Принцип построения ПВТ и схема их возбуждения в ГАС. ПВТ (рис. 1) представляет собой соосный набор N идентичных водозаполненных пьезоцилиндров 1 с внутренним радиусом a и шагом расположения по продольной оси ПВТ h , разделенных по торцам акустически гибкими прокладками 2 . Внешняя цилиндрическая поверхность ПВТ контактирует с воздухом или закрывается экраном. В состав схемы возбуждения ПВТ входят: управляющий персональный компьютер ПК, многоканальный блок формирования сигналов БФС и многоканальные блоки усилителей мощности МБУМ $_q$, состоящие из усилите-

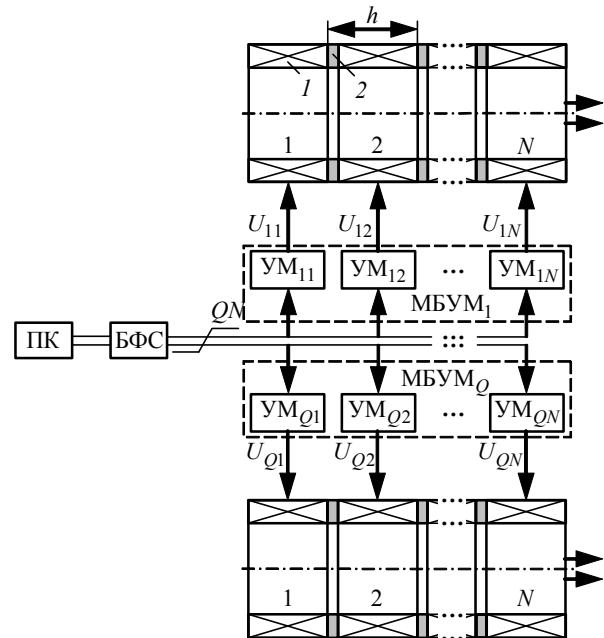


Рис. 1

лей мощности $УМ_{qn}$, $q = \overline{1, Q}$; $n = \overline{1, N}$. Построение схемы возбуждения подробно рассмотрено в [7]. Принцип работы и расчетные частотные характеристики ПВТ, обеспечивающих полосу пропускания порядка трех октав, рассматривались в [8]. Линейность ФЧХ излучения ПВТ обусловлена характером электрического возбуждения пьезоцилиндров, когда во внутренней водозаполненной полости ПВТ формируется бегущая волна, излучаемая во фронтальном направлении (показано сдвоенными стрелками на рис. 1). При этом пьезоцилиндры возбуждаются с временной задержкой $\tau = d/c_0$ друг относительно друга, где c_0 – скорость звука в воде. Кроме того, при таком возбуждении повышается нагруженность пьезоцилиндров по мере увеличения их порядкового номера n , что способствует расширению полосы пропускания всего ПВТ [8]. В противоположном фронтальному тыльном направлении излучение ослабляется из-за некогерентного сложения акустических волн, распространяющихся вдоль ПВТ.

При компоновке в антенне ГАС ПВТ располагаются параллельно друг другу, подобно тому как формируются антенны, составленные из традиционных стержневых преобразователей. В качестве примера на рис. 2 показаны некоторые ис-

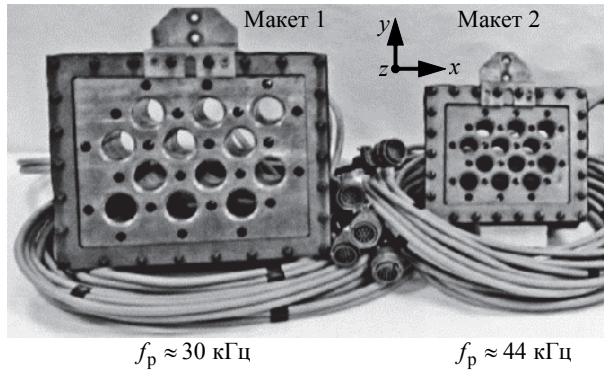


Рис. 2

следующие макеты антенн, составленных каждая из шести вертикальных рядов по 2 ПВТ (f_p – частота радиального резонанса пьезоцилиндров). При погружении макетов в воду сквозные отверстия в них, являющиеся внутренними полостями ПВТ, заполняются водой. Водозаполненные апертуры первых и N -х пьезоцилиндров образуют соответственно тыльную и фронтальную излучающие поверхности макетов антенн.

Колебания пьезоцилиндров ПВТ описываются системой из N уравнений [8]:

$$\sum_{k=1}^N Z_{kn} v_k = N_T U_n,$$

где Z_{kn} – собственное ($k = n$) и взаимные ($k \neq n$) сопротивления излучения; v_k – колебательная скорость k -го пьезоцилиндра; N_T – коэффициент электромеханической трансформации; U_n – электрическое напряжение, подаваемое на n -й пьезоцилиндр. Наиболее широкополосный режим работы ПВТ обеспечивается при его возбуждении в соответствии с решением задачи синтеза [8], когда по заданным значениям колебательных скоростей $v_k = v_{km} e^{j\omega t(k-1)}$ при условии равенства их амплитуд $v_{km} = v_m = \text{const}$ из системы уравнений определяются частотные зависимости возбуждающих пьезоцилиндров электрических напряжений $U_n(\omega) = U_{nm}(\omega) e^{j\varphi_n(\omega)}$, где U_{nm} , φ_n – амплитуда и фаза соответственно; ω – круговая частота.

Электрическое возбуждение ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза реализуется следующим образом [7]. Предварительно сигналы $u_n(t)$, необходимые для возбуждения пьезоцилиндров ПВТ, формируются программно с использованием ПК (см. рис. 1) в виде N цифровых массивов временных отсчетов. Полученные массивы из памяти ПК записываются в оперативную память

БФС, который, по сути, является $Q \times N$ -канальным цифроаналоговым преобразователем с управляемой функцией синхронной выдачи необходимых сигналов возбуждения со всех каналов. После этого БФС может работать независимо от ПК, подавая с заданным периодом следования аналоговые сигналы возбуждения $u_n(t)$ на идентичные широкополосные усилители мощности $УМ_{qn}$, с выхода которых усиленные сигналы возбуждения подаются на соответствующие по номеру пьезоцилиндры ПВТ, входящие в состав макетов антенн.

Помимо основной задачи формирования широкополосных сигналов рассматриваемый способ возбуждения ПВТ в составе ГАС обеспечивает сканирование характеристики направленности (ХН) антенны, например в одной плоскости, для Q рядов ПВТ. Эта более сложная структура возбуждения отражена на рис. 1. В частности, для исследуемых макетов (рис. 2) при сканировании ХН в горизонтальной плоскости число рядов $Q = 6$. Значение Q определяет количество многоканальных блоков МБУМ $_q$, необходимых для реализации режима сканирования. Этот режим задается программно в ПК вводом дополнительного времени задержки (компенсации) между группами сигналов возбуждения $U_n(\omega)$, подаваемых на отдельные ряды ПВТ.

Время задержки определяется как

$$\tau_q = d_{\text{м.ц}}(q-1)\sin\theta_k/c_0,$$

где $d_{\text{м.ц}}$ – расстояние между центрами излучающих апертур ПВТ в двух соседних рядах; q – номер ряда ПВТ в плоскости сканирования; θ_k – угол компенсации ХН. При отсутствии сканирования ХН число каналов МБУМ уменьшается до N .

Характер возбуждающих ПВТ электрических напряжений и его влияние на АЧХ излучения ГАС. Коэффициент нормировки. Расчетные частотные зависимости амплитуд возбуждающих напряжений, которые формируются в результате решения задачи синтеза, изменяются подобно частотным характеристикам полосовых фильтров с регулируемым затуханием относительно частоты радиального резонанса пьезоцилиндров f_p ($k_0 a \approx 2$, где $k_0 = \omega/c_0$). Это проявляется в росте амплитуд U_{nm} в области частот $k_0 a \approx 1...3$ с увеличением номера пьезоцилиндра n [8]. Кроме того, эти зависимости имеют еще одну особенность – резкий рост амплитуд в области низких частот ($k_0 a < 0.4$), необходимых для поддержа-

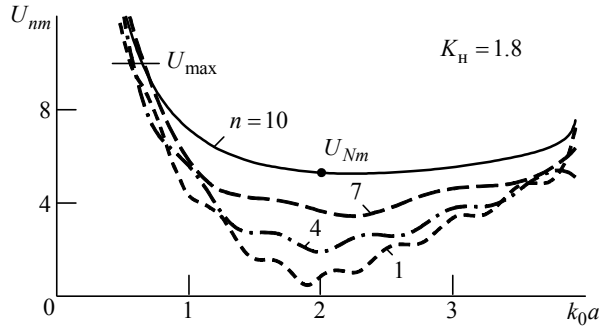


Рис. 3

ния заданного условия постоянства колебательных скоростей пьезоцилиндров $v_{km} = v_m = \text{const}$.

В качестве примера на рис. 3 приведены расчетные зависимости U_{nm} от волнового размера излучающей апертуры ПВТ k_0a , полученные при $v_{km} = 1$, $N_T = 1$, и $N = 10^1$. Требуемый рост амплитуд возбуждающих напряжений U_{nm} с одновременным ограничением на уровне U_{\max} максимального значения амплитуды напряжения возбуждения, обеспечиваемого имеющейся аппаратурой (у используемых усилителей мощности – до 150 В), ограничивает полосу пропускания макетов антенн, составленных из ПВТ, со стороны низких частот.

Для соответствия характера изменения амплитуд U_{nm} данным расчета при измерениях АЧХ излучения макетов антенн вводился коэффициент нормировки $K_H = U_{\max}/U_{Nm}$, где U_{Nm} – амплитуда напряжения возбуждения пьезоцилиндра с номером N , определяемая в области частоты резонанса пьезоцилиндра f_p ($k_0a \approx 2$). На практике K_H учитывался программно нормировкой во всем рабочем диапазоне частот ПВТ амплитуд сигналов возбуждения $u_n(t)$, подаваемых на соответству-

ющие по номеру пьезоцилиндры, к амплитуде сигнала $u_N(t) = U_{\max}$ на нижней границе рабочего диапазона ПВТ. В частности, увеличение K_H при неизменной амплитуде U_{\max} требует уменьшения U_{Nm} , что приводит к некоторому снижению частоты, на которой фиксируется U_{\max} , расширяя тем самым полосу пропускания ПВТ в область более низких частот.

На рис. 4, а показаны экспериментально полученные АЧХ чувствительности в режиме излучения v_H макета 1 (рис. 2) при возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза для разных значений коэффициента нормировки (на рис. 4 маркеры отражают результаты измерений). Полученные в результате эксперимента значения относительной полосы пропускания $\Delta f/f_{cp} = 3.32 \lg(f_B/f_H)$ составляют 2.7, 2.9 и 3 октавы для $K_H = 2.0$, 2.5 и 3.0 соответственно (f_{cp} , f_B , f_H – средняя частота, верхняя и нижняя границы полосы частот по уровню –3 дБ соответственно). Таким образом, по мере роста K_H полоса пропускания увеличивается, но в основном за счет смещения ее левой границы в область низких частот. При этом из-за уменьшения U_{Nm} снижается общий уровень излучения.

На рис. 4, б для $K_H = 3.0$ показаны экспериментальные АЧХ чувствительности в режиме излучения v_H (кривые 1 и 2) в сравнении с нормированными расчетными АЧХ звукового давления p_H (кривые 3 и 4) при излучении во фронтальном (кривые 1 и 3) и тыльном (кривые 2 и 4) направлениях. Звуковое давление нормировано на вели-

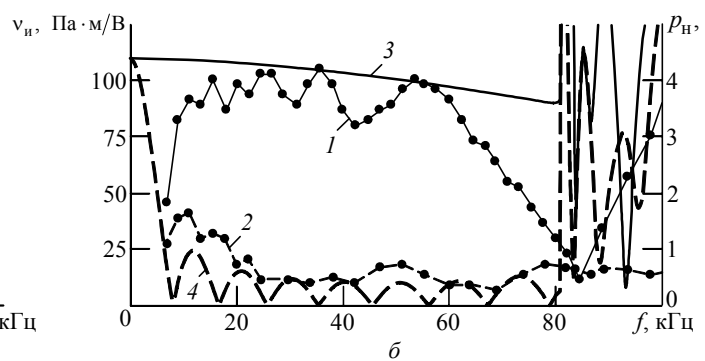
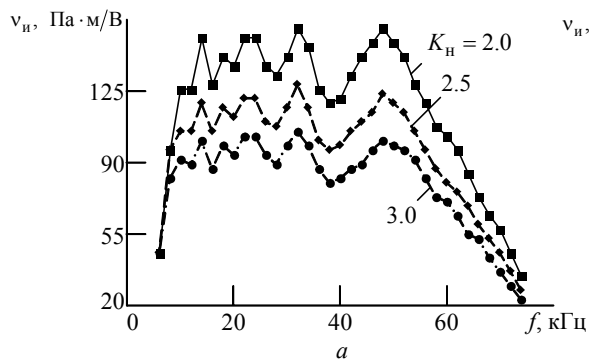


Рис. 4

¹ На рис. 3, а также далее в статье значения U_{nm} даны в условных единицах, соответствующих $v_{km} = 1$.

чину $d_{31}/(aS_{11}^E)$, где d_{31} , S_{11}^E – пьезомодуль и упругая податливость соответственно. Резкие вы-

бросы на расчетных АЧХ в области $k_0a \approx 3,83$ ($f \approx 72...75$ кГц) обусловлены наличием в выражениях для звукового давления [8] делителя вида $\sqrt{\beta_i^2 - (k_0a)^2}$, где $\beta_1 \approx 3.83$ – первый корень уравнения $J_1(\beta_i) = 0$. Корни этого уравнения β_i соответствуют значениям k_0a , при которых в цилиндрическом волноводе зарождаются нормальные волны i -х порядков.

В реальных ПВТ на частотах, близких к частоте формирования нормальной волны первого порядка ($k_0a \approx \beta_1$), возникают стоячие волны в радиальном направлении, препятствующие распространению звука вдоль его оси. Это приводит к появлению минимума на экспериментальных АЧХ излучения.

Аналогичные АЧХ излучения были получены и для других макетов антенн, составленных из ПВТ и содержащих $N = 10$ и 20 пьезоцилиндров. АЧХ излучения (рис. 4) измерялись в квазигармоническом режиме с использованием радиоимпульсов длительностью 8...12 периодов колебаний, а также средств автоматизации процесса измерений [9].

Влияние количества пьезоцилиндров ПВТ на АЧХ излучения ГАС. В [8] теоретически рассмотрена возможность получения широкополосных АЧХ излучения при возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза для разно-

лосы пропускания более трех октав вплоть до значения $N = 2$. Это положение подтверждено экспериментально. На рис. 5, а показаны нормированные расчетные АЧХ звукового давления p_n , а на рис. 5, б – экспериментальные АЧХ чувствительности v_n макета 2 (см. рис. 2)² для разного количества подключенных к МБУМ пьезоцилиндров N (в режиме без сканирования ХН). Черными линиями показаны АЧХ излучения во фронтальном, серыми – в тыльном направлении. Результаты расчетов и измерений качественно подобны и показывают возможность сохранения ширины полосы пропускания порядка трех октав в основном диапазоне рабочих частот ПВТ (при $k_0a < \beta_1$, т. е. в области формирования квазиплоской волны [8]) при уменьшении числа пьезоцилиндров N . Однако при этом снижается уровень излучения во фронтальном направлении, а уровень тыльного излучения относительно него увеличивается.

На рис. 6 показаны полученные в результате решения задачи синтеза частотные зависимости амплитуд возбуждающих напряжений U_{nm} , необходимых для реализации приведенных на рис. 5 АЧХ излучения при различных значениях N . Из представленных зависимостей следует, что уменьшение N приводит к снижению амплитуд напряжений в области частот f_p , соответствующих $k_0a \approx 2$, особенно для последних по номеру

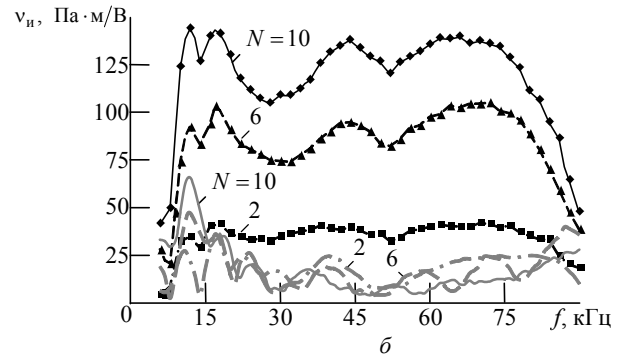
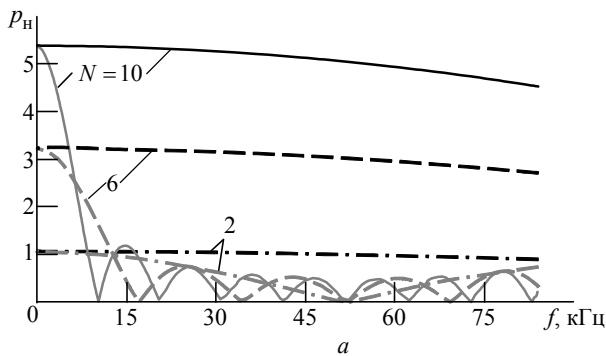


Рис. 5

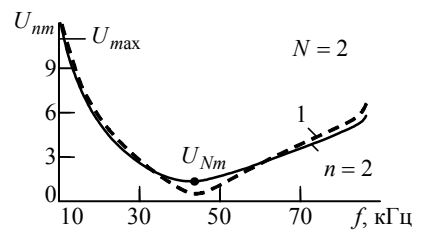
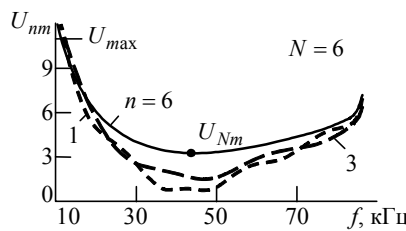
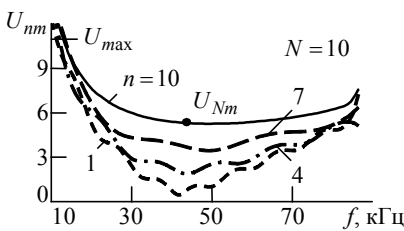


Рис. 6

го числа N пьезоцилиндров в его составе. В частности, была показана возможность сохранения по-

² Условия получения результатов совпадают с условиями для рис. 4.

пьезоцилиндров ПВТ. Поэтому поддержание широкой полосы пропускания при условии сохранения частоты фиксации напряжения U_{\max} требует повышения коэффициента нормировки K_H , т. е. уменьшения амплитуды U_{Nm} .

Излучение коротких акустических сигналов.

При формировании с помощью макетов антенн коротких импульсов (1...1.5 периода колебаний), а также акустических импульсов сложной формы характер частотных зависимостей $U_{nm}(\omega)$ учитывался на этапе расчета в соответствии с решением задачи синтеза сигналов возбуждения $u_{np}(t)$, которые должны подаваться на пьезоцилиндры. Их расчет выполнялся по заданной форме акустического импульса с учетом структурных параметров ПВТ с использованием обратного преобразования Фурье [10]:

$$u_{np}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_n(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где ω_B – верхний предел интегрирования, определяющий набор спектральных составляющих в спектральной характеристике $\Phi(\omega)$ заданного акустического импульса. Значение ω_B определяется заданным пределом полноты набора спектральных составляющих, например по уровню $\Phi_{\min}(\omega)/\Phi_{\max}(\omega) \leq 0.1$.

В процессе измерений расчетные сигналы $u_{np}(t)$ отображались а окне реализованного на ПК виртуального прибора, преобразовывались БФС в аналоговые сигналы $u_n(t)$, которые после усиления контролировались с помощью осциллографа на соответствие расчетным сигналам. Расчетный акустический импульс $s_{ак.р}(t)$, формируемый ПВТ во фронтальном направлении и служащий для контроля реальных акустических сигналов, излучаемых макетом, определялся как

$$s_{ак.р}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) p_{\phi}(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $p_{\phi}(\omega)$ – частотная характеристика звукового давления ПВТ во фронтальном направлении [8].

Все исследованные в составе ГАС макеты антенн, составленных из ПВТ, продемонстрировали возможность излучения коротких, перестраиваемых по частоте акустических импульсов и более

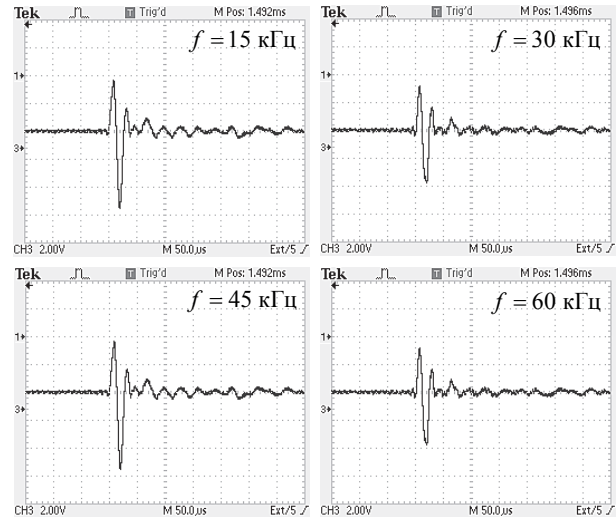


Рис. 7

сложных по структуре сигналов, имитирующих сигналы дельфинов.

Возможность излучения ультракоротких акустических импульсов, перестраиваемых по частоте формирования в двухоктавной полосе, иллюстрируется осциллограммами акустических сигналов $s_{ак}(t)$ (рис. 7), полученных с использованием макета 1 (см. рис. 2) при возбуждении ПВТ одноперiodными импульсами, соответствующими решению задачи синтеза. Акустические импульсы принимались гидрофоном TC4034 (фирмы "Reson") и фиксировались осциллографом Tektronix TDS 2024B с последующей записью на флеш-накопитель. На осциллограммах рис. 7 развертка по времени составляет: для $f = 15$ и 30 кГц – 100 мкс/дел.; для $f = 45$ и 60 кГц – 50 мкс/дел.

На рис. 8 для акустического импульса с частотой $f = 45$ кГц (рис. 7) приведен нормированный на максимальное значение расчетный акустический импульс $s_{ак.р}(t)$. Полученные в результате расчета нормированные импульсы возбуждения отдельных пьезоцилиндров $u_{np}(t)$ для рассматриваемого случая и $N = 10$ показаны на рис. 9, а на рис. 10 представлены осциллограммы сформированных БФС импульсов $u_n(t)$ (развертка по времени 25 мкс/дел.).

Форма экспериментальных акустических импульсов $s_{ак}(t)$ (рис. 7) достаточно близка к одному периоду возбуждающих колебаний и может быть сохранена практически в двухоктавном диапазоне частот, но все же несколько отличается от расчетной (рис. 8). Приближение вида акустического импульса к одноперiodному с выравниванием амплитуд его полупериодов можно осу-

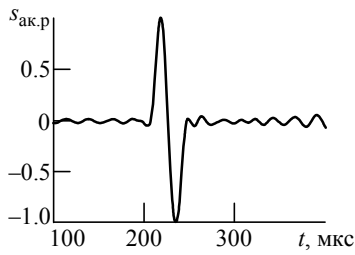


Рис. 8

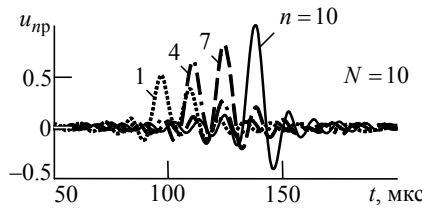


Рис. 9

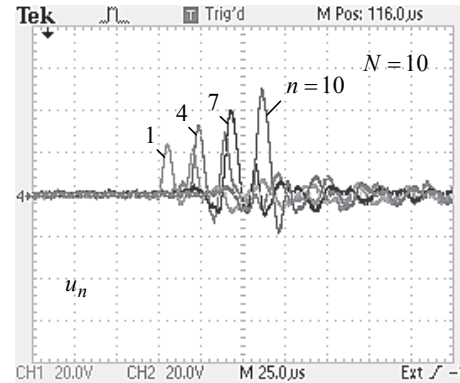


Рис. 10

шествить возбуждением ПВТ также однопериодным импульсом, но с соотношением амплитуд полупериодов 2:1 (в отличие от базового соотношения 1:1). Отмеченный факт иллюстрируют осциллограммы (рис. 11), где показаны сформированные макетом 2 (см. рис. 2) акустические импульсы $s_{ак}(t)$, а также импульсы возбуждения $u_{10}(t)$, подаваемые на пьезоцилиндры макета с номерами $n = N = 10$, на частотах 33 и 55 кГц (рис. 11, а, б соответственно). Масштаб горизонтальной развертки составляет 250 мкс/дел. Для более детального изучения те же акустические импульсы представлены в увеличенном масштабе по оси времени (25 мкс/дел.) на рис. 11, в, г.

При возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза сигналы возбуждения $u_n(t)$, подаваемые на пьезоцилиндры, заметно отличаются по форме как от расчетного $s_{ак.p}(t)$, так и экспериментального $s_{ак}(t)$ акустического импульса, причем это различие постепенно снижается по мере роста номера пьезоцилиндра. Различие обусловлено разницей частотных зависи-

мостей комплексных функций $U_n(\omega)$ и давления во фронтальном направлении $p_{ф}(\omega)$, а также разницей амплитудных и, главное, фазовых соотношений между $U_n(\omega)$ [8].

Следует отметить, что при возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза уменьшение числа пьезоцилиндров, влияние которого показано на рис. 5 и 6, мало сказывается на форме и амплитуде коротких импульсов, излучаемых макетами антенн, поскольку необходимые сигналы возбуждения $u_n(t)$ формируются с учетом характера частотных зависимостей $U_{nm}(\omega)$.

Направленные свойства макетов антенн, составленных из ПВТ. Практически во всем рабочем диапазоне частот ПВТ их водозаполненные апертуры можно рассматривать как круглые поршневые излучатели, поскольку распределение нормальной к плоскости апертуры компоненты колебательной скорости близко к равномерному [10]. Поэтому ХН макета антенны ГАС будет определяться расположением излучающих апертур ПВТ относительно друг друга в плоскости антенны. Результаты измерения ХН хорошо согласуются с результатами расчетов для плоских антенн, составленных из круглых поршневых излучателей, которыми можно считать водозаполненные апертуры ПВТ. Причем это относится как к стационар-

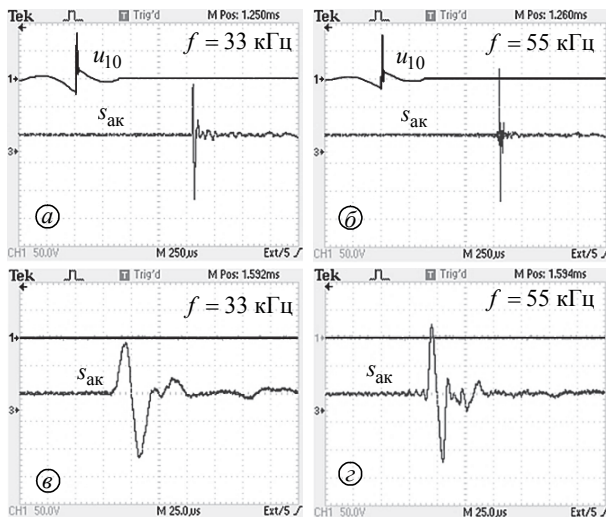


Рис. 11

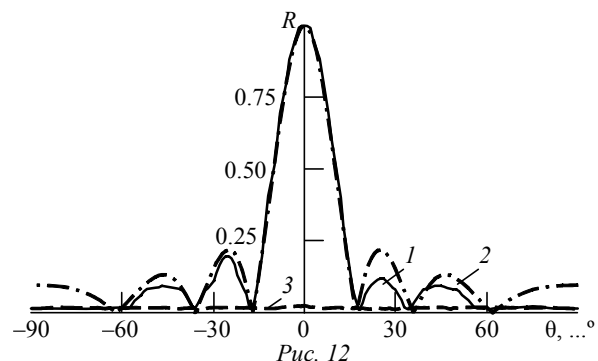


Рис. 12

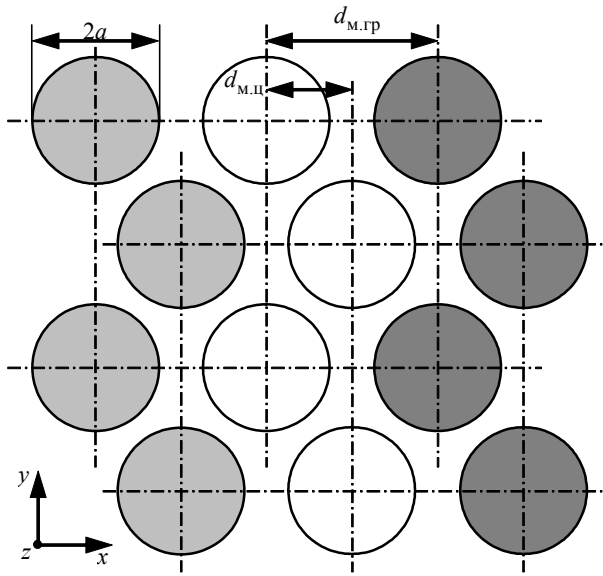


Рис. 13

ному (радиоимпульсы), так и к импульсному (короткие импульсы) режимам работы ГАС.

На рис. 12 приведены экспериментально полученные ХН $R(\theta)$ макета 2 (см. рис. 2) в горизонтальной плоскости zOx при работе в стационарном режиме на частоте 50 кГц во фронтальном (кривая 2) и в тыльном (кривая 3) направлениях, а также расчетная ХН во фронтальном направлении (кривая 1) при угле компенсации $\theta_k = 0^\circ$. Расчет при отсутствии сканирования ХН проводился по формуле

$$R(\theta) = \left| \frac{2J_1(k_0 a \sin \theta) \sin(Qk_0 d_{м.ц} \sin \theta/2)}{k_0 a \sin \theta \quad Q \sin(k_0 d_{м.ц} \sin \theta/2)} \right|,$$

где $Q = 6$ (6 рядов по 2 ПВТ по оси x); $d_{м.ц}$ – межцентровое расстояние (см. схему макета 2 – рис. 13). При измерениях использовались радиоимпульсы длительностью 10 периодов колебаний. Экспериментальные ХН как макета 2, так и остальных макетов антенн ГАС показали выраженную однонаправленность излучения ПВТ во всем рабочем диапазоне частот в соответствии с АЧХ.

Поскольку от значения соотношения $d_{м.ц}/\lambda$ (λ – длина звуковой волны в воде) зависит возможность появления добавочного лепестка ХН, а рабочий диапазон частот ПВТ достаточно широк, в макетах антенн излучатели в рядах располагались со смещением (см. рис. 2, 13). Однако из-за ограниченного числа каналов в имевшихся МБУМ_н (для макетов 1 и 2 требовалось $Q \times N = 60$ каналов, имелось же только 30) для проверки функциональности режима сканирования ХН 2 ряда ПВТ объединялись в группы по 4

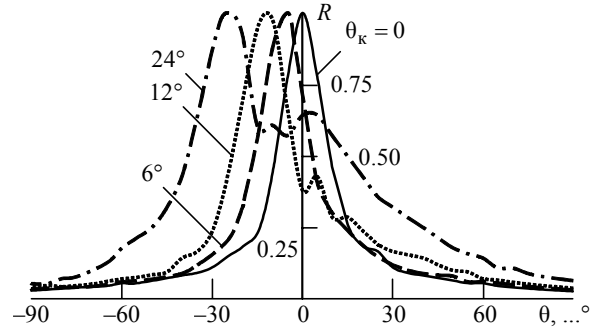


Рис. 14

ПВТ (показано заливкой на рис. 13). При этом в расчетах использовалось расстояние между центрами соседних групп $d_{м.гр} = 2d_{м.ц}$. Группировка рядов ПВТ привела к ограничению сектора сканирования (до момента появления добавочного лепестка ХН).

Рис. 14 иллюстрирует возможность сканирования ХН в плоскости zOx для макета 2 при различных значениях угла компенсации θ_k . ПВТ возбуждались в соответствии с решением задачи синтеза однопериодным импульсом с частотой формирования 50 кГц. Для $\theta_k = 24^\circ$ хорошо видно проявление добавочного максимума. Если в группы объединять меньшее число ПВТ (например, по 2 в ряд с образованием шести рядов вдоль оси x), то $d_{м.гр} = d_{м.ц}$ и, как показывают расчеты, сектор сканирования может быть увеличен почти до $\pm 90^\circ$. Однако это требует увеличения в 2 раза числа усилителей мощности УМ_{qn}.

При излучении коротких импульсов максимумы побочных лепестков и нули ХН не имеют четкого проявления. Это связано с изменением формы импульса при увеличении угла θ и некогерентностью сложения сигналов, приходящих в точку наблюдения от разных участков поверхности антенны. Указанные обстоятельства хорошо согласуются с теоретическими данными, например [11], [12].

Излучение акустических сигналов, имитирующих сигналы китообразных. Интерес к исследованию акустических сигналов китообразных, в том числе дельфинов [13], [14], а также к построению имитирующих эти сигналы акустических систем [15], [16] не ослабевает уже многие годы. В определенной мере это объясняется уникальной способностью морских млекопитающих к ориентированию в пространстве и эффективному обнаружению подводных объектов в сложной помеховой обстановке. Эхолокация и коммуникация дельфинов обеспечиваются с помощью последовательности коротких акустиче-

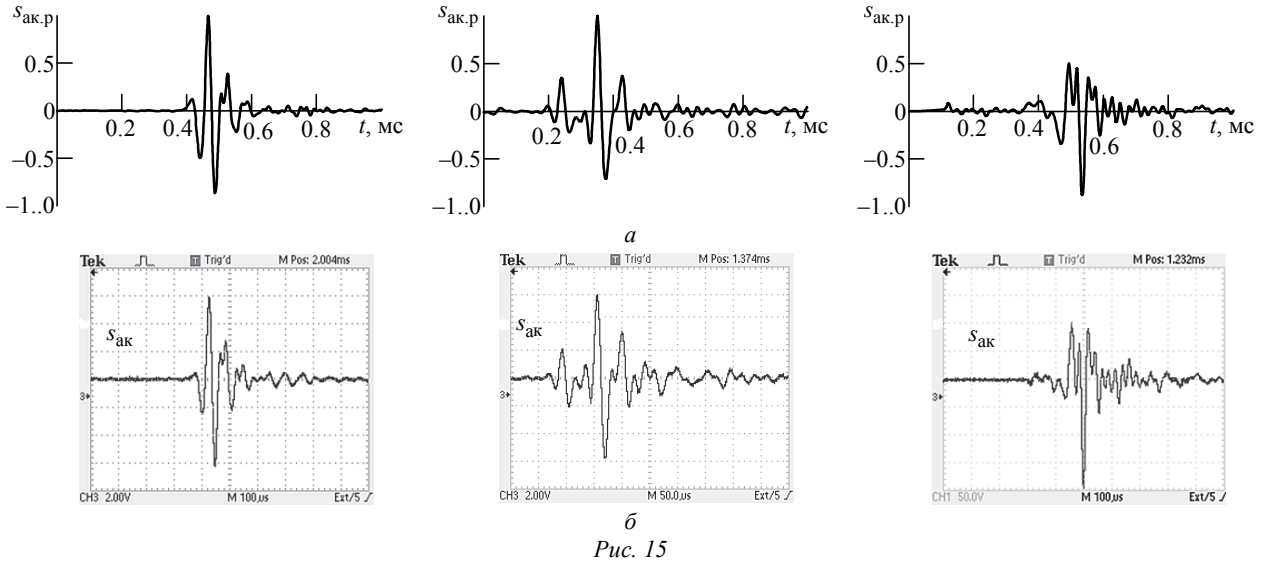


Рис. 15

ских импульсов с переменным периодом их следования [13], [16]. В связи с этим определенный интерес представляет возможность формирования сложных по структуре акустических сигналов, в том числе имитация сигналов китообразных, с помощью ГАС и макетов антенн, составленных из ПВТ при возбуждении их в соответствии с решением задачи синтеза.

Для технической реализации импульсов китообразных требуется диапазон частот от двух до четырех октав со средней частотой для разных видов китообразных от 10...20 кГц (кашалоты, усатые киты) до 90...120 кГц (дельфины, белухи). Средняя частота рабочего диапазона имеющихся макетов антенн ГАС была в 2–3 раза ниже средней частоты спектра реальных эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов и белух (предоставленных лабораторией морской биоакустики СПбГУ). Поэтому при измерениях спектры этих сигналов пересчитывались на более низкие частоты так, чтобы их основная область частот соответствовала полосе пропускания макетов.

На рис. 15, а показаны реальные нормированные эхолокационные и коммуникационные сигналы дельфина, восстановленные после пересчета их спектра в область более низких рабочих частот макетов антенн ГАС, а на рис. 15, б – акустические импульсы $s_{ак}(t)$, сформированные с помощью макетов 1 и 2 (см. рис. 2). Приведенные результаты показывают удовлетворительное визуальное соответствие акустических импульсов, излученных с помощью макетов ГАС, и реальных, хотя и промасштабированных по частоте, сигналов дельфина. Следует отметить возможность формирования двух расположенных рядом

однополярных полупериодов колебаний (особенно заметных на правой паре диаграмм рис. 15), которая трудно реализуется с помощью других преобразователей и систем.

Для непосредственной работы с дельфинами и белухами требуются макеты антенн ПВТ, пьезоцилиндры которых имеют внутренний диаметр около 10 мм, а для имитации сигналов более крупных морских млекопитающих – 60...90 мм.

Заключение. Сравнением результатов расчета в соответствии с решением задачи синтеза и экспериментальных исследований макетов антенн ГАС с использованием ПВТ показана эффективность антенн в обеспечении широкополосного (около трех октав) излучения и формирования коротких, перестраиваемых по частоте, и сложных по структуре акустических сигналов, в том числе сигналов китообразных. Оценка эффективности излучения ПВТ по результатам измерения полевых характеристик макетов антенн показывает возможность получения удельной мощности излучения $W_{уд} \approx 1 \text{ Вт/см}^2$ при возбуждении электрическим полем напряженностью $E = 500 \text{ В/см}$. При излучении коротких акустических импульсов возможно увеличение напряженности электрического поля без нарушения прочностных характеристик пьезоцилиндров ПВТ, однако этот вопрос требует более детального как теоретического, так и экспериментального изучения. Полученная оценка влияния структурных параметров ПВТ и составленных из них антенн на характеристики ГАС позволяет проектировать необходимые для конкретных целей широкополосные ГАС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широкополосность преобразователей. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 696–697.

2. Пат. RU 2270533 С2. МПК H04R 1/14 (2006.01) Гидроакустический стержневой преобразователь / В. И. Позерн, Р. П. Павлов, О. Б. Ступак, Л. А. Виноградова, М. В. Кудрявцев, О. Н. Дудаков, Е. А. Апукхтина. Опубл. 20.02.2006. Бюл. № 5.

3. USA Pat. 8072843 B1 I.Cl. H04R 17/00. Stepped multiply resonant wideband transducer apparatus / J. L. Butler, A. L. Butler. Publ. 2009/03/18.

4. USA Pat. 6722003 I.Cl. H04R 17/00. Underwater broadband electroacoustic transducer / D. S.-Dong, Y. C.-Zen, J.-Yow. Publ. 2004/04/20.

5. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.

6. Широкополосный низкочастотный малоапертурный мозаичный преобразователь / В. К. Качанов, И. В. Соколов, А. Б. Родин, Д. В. Тимофеев // 8-я Международ. конф. "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности", М., 18–20 марта 2009 г. М.: Изд. дом "Спектр", 2009. С. 113–115.

7. Пат. RU 176673 А1. МПК G01S 3/801 (2000.01) Устройство формирования акустических сигналов / Б. Г. Степанов, И. С. Пестерев. Опубл. 25.01.2018. Бюл. № 3.

8. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 3. С. 87–96.

9. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. О расширении функциональных возможностей контрольно-измерительного

стенда кафедры ЭУТ для автоматизации измерений частотных и направленных характеристик антенн // 69-я науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб., 26 янв. – 4 февр. 2016. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016, С. 215–220.

10. Степанов Б. Г. О возможности дополнительного увеличения рабочего диапазона частот гидроакустического преобразователя волноводного типа и его работы в импульсном режиме. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 4. С. 71–80.

11. Авдеев В. Б. Энергетические характеристики направленности антенн и антенных систем при излучении и приеме сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2002. Вып. 7(62). С. 5–27.

12. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Влияние переходных процессов в преобразователях на направленность антенны в импульсном режиме // Акуст. журн. 1994. Т. 40, № 3. С. 457–458.

13. Ryabov V. Some Aspects of Analysis of Dolphins' Acoustical Signals // Open J. of Acoustics. 2011. № 1. С. 41–54.

14. Directional Properties of Bottlenose Dolphin (Tursiops Truncatus) Clicks, Burst-Pulse, and Whistle Sounds / B. K. Branstetter, P. W. Moore, J. J. Finneran and oth. // J. Acoust. Soc. Am. 2012. Vol. 131, № 2. P. 1613–1621.

15. Пат. RU 2220462 С2 МПК G10K 9/04 (2000.01) Устройство для имитации эхолокационных импульсов дельфина / Н. А. Дубровский. Опубл. 27.12.2003. Бюл. № 36.

16. Development of Dolphin-speaker / Y. Mishima, K. Uchida, K. Amakasu, Y. Miyamoto, T. Sasakura // J. Marine Acoust. Soc. Jpn. 2013. Vol. 40, № 1. P. 27–36.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

Пестерев Иван Сергеевич – магистр по направлению "Приборостроение" (2015), аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и исследование электроакустических преобразователей, а также систем формирования электрических сигналов возбуждения.

E-mail: ivanpesterev@mail.ru

E-mail: mary-v-s@yandex.ru

Степанов Борис Георгиевич – кандидат технических наук (1987), доцент (1996) кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – разработка и исследование различных электроакустических преобразователей и систем с заданными направленными и частотными свойствами.

E-mail: BGStepanov@etu.ru

REFERENCES

1. *Gidroakusticheskaya entsiklopediya* [Hydroacoustic Encyclopedia]. Ed. by V. I. Timoshenko. Taganrog, *Izd-vo TGRU*, 1999, pp. 696–697. (In Russian)

2. Pozern V. I., Pavlov R. P., Stupak O. B., Vinogradova L. A., Kudryavtsev M. V., Dudakov O. N., Apukhtina E. A. *Gidroakusticheskii sterzhnevoi preobrazovatel'* [Hydroacoustic Rod Transducer]. Patent RF, no. 2270533, 2006. (In Russian)

3. Butler J. L., Butler A. L. Stepped Multiply Resonant Wideband Transducer Apparatus. Patent USA, no. 8072843, 2009.

4. Dong D. S.-, Zen Y. C., Yow J. Underwater Broadband Electroacoustic Transducer. Patent USA, no. 6722003, 2004.

5. Sherman C. H., Butler J. L. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007, 610 p.

6. Kachanov V. K., Sokolov I. V., Rodin A. B., Timofeev D. V. Broadband Low-Frequency Low-Aperture Mosaic Transducer. *8-ya Mezhdunar. konf. "Nerazrushayushchii kontrol' i tekhnicheskaya diagnostika v promyshlennosti"* [8th Intern. Conf. "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry"]. Moscow, 2009, pp. 113–115. (In Russian)

7. Stepanov B. G., Pesterev I. S. *Ustroistvo formirovaniya akusticheskikh signalov* [Device for Generating Acoustic Signals]. Patent RF, no. 176673, 2018. (In Russian)

8. Stepanov B. G. Ultra-Wideband Hydroacoustic Waveguide Converter. Synthesis Task. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2013, no. 3, pp. 87–96. (In Russian)

9. Pesterev I. S., Stepanov B. G. On Expanding the Functionality of the Measuring and Testing Facility of the EUT Department for Automating Measurements of the Frequency and Directional Characteristics of Antennas. *69 nauch.-tekhn. konf. PPS SPbGETU "LETI"* [69 Scientific and Technical Conf. Professorial and teaching staff of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"]. SPb, 2016, pp. 215–220. (In Russian)

10. Stepanov B. G. About the Possibility of Additional Increase in the Operating Frequency Range of the Wave-

guide Type Hydroacoustic Transducer and Its Operation in Pulsed Mode. Synthesis Task. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2013, no. 4, pp. 71–80. (In Russian)

11. Avdeev V. B. Energy Characteristics of Directivity of Antennas and Antenna Systems for Radiation and Reception of Ultra-Wideband Signals and Ultrashort Pulses. *Antenny [Antennas]*. 2002, vol. 62, no. 7, pp. 5–27. (In Russian)

12. Konovalov S. I., Kuzmenko A. G. Impact of Transients in Converters on the Directivity of the Antenna in a Pulsed Mode. *Akusticheskii Zhurnal [Acoustic Journal]*. 1994, vol. 40, no. 3, pp. 457–458. (In Russian)

13. Ryabov V. Some Aspects of Analysis of Dolphins' Acoustical Signals. *Open J. of Acoustics*. 2011, no. 1, pp. 41–54.

14. Branstetter B. K., Moore P. W., Finneran J. J. Directional Properties of Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncatus*) Clicks, Burst-Pulse, and Whistle Sounds. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012, vol. 131, no. 2, pp. 1613–1621.

15. Dubrovsky N. A. *Ustroistvo dlya imitatsii ekhlokatsionnykh impuls'ov del'fina* [Device for Simulating Dolphin Echolocation Impulses]. Patent RF, no. 2220462, 2003.

16. Mishima Y., Uchida K., Amakasu K., Miyamoto Y., Sasakura T. Development of Dolphin-speaker. *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.* 2013, vol. 40, no 1, pp. 27–36.

Received September, 19, 2018.

Ivan S. Pesterev – Master's Degree in Engineering in Instrumentation Technology (2015), Postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Technics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 8 scientific publications. Area of expertise: research and development of electro-acoustic transducers and electric excitation signals forming systems.

E-mail: ivanpesterev@mail.ru

Boris G. Stepanov – Ph.D. in Engineering (1987), Associate Professor (1996) of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Technics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: research and development of various electro-acoustic transducers and systems with predetermined directionality, and frequency properties.

E-mail: BGStepanov@etu.ru
