

УДК 534.232

И. С. Пестерев

ГНЦ РФ АО «Концерн „ЦНИИ “Электроприбор”»

Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Электроакустические характеристики преобразователей волноводного типа

Приводятся результаты расчетов полной входной проводимости и угла сдвига между фазами токов и электрических напряжений, возбуждающих пьезоцилиндры, которые образуют преобразователь волноводного типа (ПВТ). Расчеты выполняются на базе модели ПВТ, излучающей в перестраиваемые по углу раскрытия конусные полубесконечные пространства. Анализируется характер влияния углов раскрытия конусных полупространств и отраженных от апертур ПВТ волн на результаты расчетов. Рассматривается распределение амплитуды и фазы нормальной компоненты колебательной скорости в излучающих фронтальной и тыльной апертурах ПВТ. Получены расчетные соотношения для оценки электроакустического коэффициента полезного действия (КПД) ПВТ. Приводятся результаты расчетов электроакустического КПД при излучении ПВТ в соосные полубесконечные волноводы и полупространства. Анализируется влияние значения коэффициента электроакустической связи пьезокерамики (варианты пьезоцилиндров с радиальной и тангенциальной поляризацией) на рассматриваемые характеристики ПВТ.

Входной электрический импеданс, коэффициент полезного действия, пьезоцилиндры, преобразователь волноводного типа, частотная характеристика

При разработке систем возбуждения и генераторных устройств, формирующих необходимые сигналы, подаваемые на преобразователи гидроакустических антенн, необходима информация о входных электрических импедансах этих преобразователей. Несмотря на то, что общие подходы к определению входных электрических импедансов традиционных типов преобразователей известны [1]–[3], каждая конкретная модель преобразователя, тем более обладающая специфическими свойствами, требует своего решения. Важным параметром для оценки эффективности преобразователей является также их электроакустический коэффициент полезного действия (КПД) [4]. Эти характеристики представляют особый интерес для преобразователей, работающих в широкой полосе частот, к которым, безусловно, относятся преобразователи волноводного типа (ПВТ), позволяющие получить близкую к равномерной амплитудно-частотную (АЧХ) и линей-

ную фазочастотную (ФЧХ) характеристики излучения в полосе частот порядка 3 октав [5]–[8]. ПВТ представляют собой соосный набор заполненных жидкостью пьезоцилиндров, разделенных по торцам гибкими тонкими прокладками и возбуждаемых электрическими напряжениями, обеспечивающими в заполненной жидкостью полости ПВТ режим бегущей волны. ПВТ излучают звуковые волны через заполненные жидкостью (водой) апертуры и компонуются в антенне параллельным их набором подобно стержневым преобразователям [5]. Характер возбуждения пьезоцилиндров ПВТ предусматривает использование многоканальных генераторных устройств.

Общие сведения, задача исследования. Обобщенная расчетная модель ПВТ [6], [7], которая излучает через свои апертуры в перестраиваемые по углу конусные полупространства, позволяет дать описание его звукового поля с учетом реального расхождения волнового фронта (обу-

словленного ограниченными размерами антенн, составленных из ПВТ) и объединяет использованные ранее частные модели излучения ПВТ в соосные водозаполненные волноводы [8] и в полупространства [9]. В [7] представлено решение задачи синтеза для обобщенной модели ПВТ, обеспечивающее наиболее широкополосный режим его работы и выполненное с учетом акустической нагруженности его пьезоцилиндров. Показано, что сопротивления излучения пьезоцилиндров ПВТ изменяются при перестроении конусных областей излучения с углами раскрыва $\theta_{F,T}$ (индексы F и T соответствуют фронтальному и тыльному направлениям ПВТ) от одного частного случая (излучение в цилиндрические волноводы, $\theta_{F,T} \rightarrow 0$) к другому (излучение в полупространства, $\theta_{F,T} = 90^\circ$). Первый случай ближе к работе ПВТ в составе многоэлементной антенны [5], а другой – к работе одиночного ПВТ. Результатом решения задачи синтеза [7] являются частотные зависимости электрических напряжений возбуждения пьезоцилиндров $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$, обеспечивающие заданный режим излучения ПВТ ($U_{im}(\omega)$ и $\psi_i(\omega)$ – амплитуды и фазы электрических напряжений; ω – круговая частота; $i = 1, 2, \dots, N$ – порядковый номер пьезоцилиндра).

Для реализации полученных частотных зависимостей $U_i(\omega)$ обобщенной модели ПВТ, которые имеют довольно сложный характер, требуется специальная электронная система возбуждения, принципы построения которой изложены в [10]. Построение такой системы возбуждения ввиду ее особенностей, в числе которых рабочий диапазон частот свыше 3 октав и большое число однотипных независимых каналов $Q \times N$ (где Q – число рядов ПВТ в составе антенны, необходимое для сканирования характеристики направленности [5]), требует однозначного представления о характере электрической нагрузки, т. е. о входных электрических импедансах образующих ПВТ пьезоцилиндров.

Электрические нагрузочные характеристики пьезоцилиндров ПВТ. Оценка входного электрического импеданса пьезоцилиндров ПВТ может быть выполнена расчетным путем с использованием метода эквивалентных схем. В этом случае полная входная проводимость i -го пьезоцилиндра может быть определена по формуле [11]

$$Y_{\Sigma i} = \frac{N_T^2}{z_0 S} \left[-jk_0 a \frac{z_0}{z_k} \frac{a(1-k_{31}^2)}{\delta k_{31}^2} (1+j \operatorname{tg} \theta) + \frac{1}{z_{Mi}} \right], \quad (1)$$

где $N_T = 2\pi d_{31} l / S_{11}^{(E)}$ – коэффициент электро-механической трансформации (l – длина пьезоцилиндра; d_{31} и $S_{11}^{(E)}$ – пьезомодуль и упругая податливость используемого состава пьезокерамики); $z_0 = \rho_0 c_0$ (ρ_0 и c_0 – плотность и скорость звука в жидкости, заполняющей ПВТ, например воды); $k_0 = \omega / c_0$; a и δ – внутренний радиус и толщина стенки пьезоцилиндра; z_k и k_{31} – удельный импеданс и коэффициент электромеханической связи пьезокерамики; $\operatorname{tg} \theta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; $z_{Mi} = Z_{Mi} / (z_0 S)$ – нормированный входной механический импеданс i -го пьезоцилиндра ($Z_{Mi} = r_{M.п} - j\omega m_3 - 1 / (j\omega C_3) + Z_{Si}$); $r_{M.п}$ – сопротивление механических потерь; m_3 и C_3 – эквивалентные масса и гибкость пьезоцилиндра; Z_{Si} – полное сопротивление излучения, учитывающее влияние других пьезоцилиндров ПВТ и влияние отраженных от апертур ПВТ волн [7]; $S = 2\pi a l$ – площадь излучающей поверхности пьезоцилиндра. Первое слагаемое в (1) соответствует емкостной компоненте полной проводимости, учитывающей сопротивления электрических потерь, а второе – пересчитанному на электрическую сторону входному механическому импедансу i -го пьезоцилиндра, который определяет влияние его колебательной системы.

В качестве примера на рис. 1 показаны нормированные к величине $N_T^2 / (z_0 S)$ частотные характеристики (построенные в зависимости от волнового размера $k_0 a$) модуля полной входной проводимости $|Y_{\Sigma i}|$ пьезоцилиндров с i -ми номерами для разных углов раскрыва $\theta_{F,T}$ обобщенной модели ПВТ при его возбуждении согласно решению задачи синтеза. Для расчета приняты следующие параметры ПВТ: $N = 10$; $l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$ (d – расстояние между центрами соседних пьезоцилиндров вдоль оси ПВТ); $z_{фл}/a = 0.95l/a$ ($z_{фл}$ – высота фланцев герметичного корпуса ПВТ); $k_{31} = 0.35$; $\operatorname{tg} \theta = 0.025$; $a/\delta = 5.6$; $z_k = 23 \cdot 10^6$ Па·с/м. Указанные параметры ПВТ используются также при построении других ча-

стотных зависимостей, приведенных в данной статье. Для случая излучения ПВТ в соосные цилиндрические волноводы принималось значение углов раскрыва $\theta_{F,T} = 0.1^\circ$ [6], [7].

Согласно полученным результатам расчетов можно сделать вывод о том, что полная входная проводимость пьезоцилиндров (за исключением их первых номеров) определяется главным образом их электрической емкостью. Изменение углов раскрыва конусных областей $\theta_{F,T}$ не оказывает существенного влияния на вид частотных зависимостей $|Y_{\Sigma i}|$. Для первых номеров пьезоцилиндров резонансный характер их полной входной проводимости в области $k_0 a \approx 2$ (соответствует частоте радиального резонанса пьезоцилиндра) физически обусловлен сравнительно еще малой их нагруженностью на жидкую среду. Ввиду синфазного сложения звуковых волн во фронтальном направлении излучения ПВТ, с ростом порядкового номера i пьезоцилиндров их нагруженность увеличивается (пьезоцилиндры нагружены как бы на более плотную среду), обеспечивая тем самым расширение полосы пропускания всего ПВТ. Указанная тенденция в поведении частотных зависимостей $|Y_{\Sigma i}|$ характерна и для других вариантов возбуждения пьезоцилиндров ПВТ [11].

Для обобщенной модели ПВТ с параметрами, принятыми для расчета проводимости, на рис. 2 приведены частотные зависимости косинуса угла фазового сдвига между возбуждающим электрическим напряжением U_i и током I_i , протекающим через i -й пьезоцилиндр, $\cos \varphi_i =$

$$= \frac{\operatorname{Re} Y_{\Sigma i}}{\sqrt{(\operatorname{Re} Y_{\Sigma i})^2 + (\operatorname{Im} Y_{\Sigma i})^2}} \quad [12].$$

Подобно случаю излучения ПВТ в соосные цилиндрические волноводы [11], величина $\cos \varphi_i$ уменьшается с ростом порядкового номера i пьезоцилиндра, а его частотная зависимость становится более равномерной. Максимальные значения $\cos \varphi_i$ и их осцилляции наблюдаются в основном для первых номеров пьезоцилиндров.

По мере увеличения углов раскрыва конусных полупространств область осцилляций расширяется и появляются отрицательные значения $\cos \varphi_i$. Это говорит об увеличении влияния на электрические нагрузочные характеристики волн, отраженных от излучающих апертур ПВТ, а также о том, что в ограниченных частотных областях пьезоцилиндры первых номеров для обеспечения своих колебаний не используют энергию своего источника, а потребляют энергию колебаний других пьезоцилиндров.

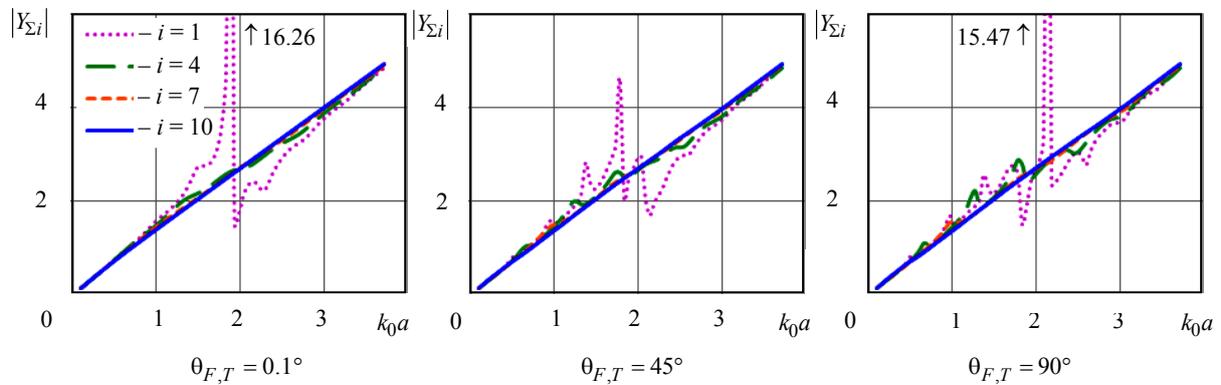


Рис. 1

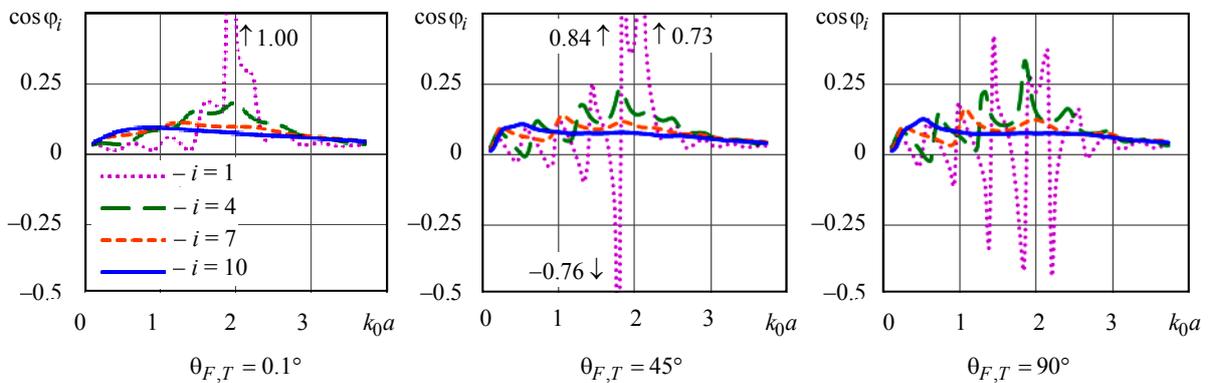


Рис. 2

Выполненная теоретическая оценка входных электрических характеристик пьезоцилиндров позволяет сделать вывод о том, что вид рассматриваемых частотных зависимостей в первую очередь определяется положением пьезоцилиндра в составе ПВТ. С увеличением порядкового номера i пьезоцилиндра резонансный характер его колебаний быстро ослабевает, а частотная зависимость модуля полной входной проводимости $|Y_{\Sigma i}|$ приближается к линейной благодаря преобладающему влиянию ее емкостной составляющей. Изменение углов раскрыва конусных полупространств и усиление влияния отраженных от апертур ПВТ волн в основном проявляется также для первых номеров пьезоцилиндров, на которые подаются сравнительно небольшие по амплитуде электрические напряжения [7], [8]. Это позволяет использовать одну и ту же систему возбуждения для экспериментальных исследований антенн, составленных из разного числа ПВТ и обладающих разной степенью расхождения излученных волн.

В зависимости от рабочего диапазона частот ПВТ в его составе возможно использование пьезоцилиндров как с радиальной (k_{31}), так и с тангенциальной поляризацией (k_{33}). Для большинства современных составов пьезокерамики значения коэффициентов электромеханической связи находятся в пределах $k_{31} \approx 0.2 \dots 0.4$ и $k_{33} \approx 0.35 \dots 0.75$, т. е. отличаются почти в 2 раза. В обоих случаях возможно использование (1) с учетом замены k_{31} на k_{33} и выбора нужного коэффициента электромеханической трансформации. Для случая пьезоцилиндров с тангенциальной поляризацией $N_T = 2\pi d_{33} l \delta / (S_{33}^E d_{пр})$, где d_{33} и S_{33}^E – соответствующие значения пьезомодуля и упругой податливости; $d_{пр}$ – межэлектродное расстояние. В частности, для пьезоцилиндров с тангенциальной поляризацией, полагая $k_{33} = 0.7$, получим уменьшение наклона асимптотической прямой емкостной проводимости почти в 7 раз и увеличение значений $\cos \varphi_i$ в 4 раза по отношению к данным, приведенным на рис. 1 и 2 соответственно.

Коэффициент полезного действия ПВТ. Эффективность работы ПВТ в целом определяется его электроакустическим КПД, т. е. отношением активной мощности излучения к подведенной активной электрической мощности [4]. Электроакустический КПД для ПВТ может быть опреде-

лен по общей формуле для двусторонне нагруженного излучателя [12]:

$$\eta_{за} = \frac{W_F + W_T}{0.5 \sum_{i=1}^N \operatorname{Re}(U_i I_i^*)}, \quad (2)$$

где $W_{F,T} = 0.5 \operatorname{Re}(Z_{ап}) |v_z^{(F,T)}|^2$ – мощности излучения ПВТ во фронтальном (индекс F) и тыльном (индекс T) направлениях; $Z_{ап}$ – сопротивление излучения апертур ПВТ; $v_z^{(F,T)}$ – z -компонента колебательной скорости в плоскости фронтальной и тыльной апертур ПВТ; I_i^* – величина, комплексно-сопряженная току I_i , который протекает через i -й пьезоцилиндр.

В случае произвольного раскрыва конусных полупространств определение сопротивления излучения апертур ПВТ требует решения отдельной задачи, поэтому в рамках настоящей статьи рассмотрим два крайних случая излучения – в соосные цилиндрические волноводы ($\theta_{F,T} = 0.1^\circ$) и в полупространства ($\theta_{F,T} = 90^\circ$). Ток I_i , протекающий через пьезоцилиндр, может быть определен через ранее определенную входную электрическую проводимость $Y_{\Sigma i}$, в этом случае $\operatorname{Re}(U_i I_i^*) = \operatorname{Re}[U_i (Y_{\Sigma i} U_i)^*]$.

Нормальная к плоскости апертур ПВТ z -компонента колебательной скорости $v_z^{(F,T)}$ определяется по формуле $v_z^{(F,T)} = \frac{1}{j\omega\rho_0} \left. \frac{\partial p_{F,T}^I}{\partial z} \right|_{z=z_{фл}}$ с использованием выражений

для звуковых давлений $p_{F,T}^I$ во внутренней водозаполненной полости ПВТ, приведенных в [7]. При излучении ПВТ во фронтальном (кривые 1–3) и тыльном (кривые 1'–3') направлениях в полубесконечные волноводы ($\theta_{F,T} = 0.1^\circ$) на рис. 3 приведены результаты расчета распределения вдоль радиуса апертуры ПВТ нормированных к максимальному значению амплитуд $v_{z\max}^{(F,T)} = |v_z^{(F,T)}|$ (рис. 3, а), а также фаз $\varphi_z^{(F,T)} = \arg(v_z^{(F,T)})$ (рис. 3, б) для z -компоненты колебательной скорости. Нумерация кривых соответствует: 1 (1') – $k_0 a = 1$; 2 (2') – $k_0 a = 2$; 3 (3') – $k_0 a = 3$.

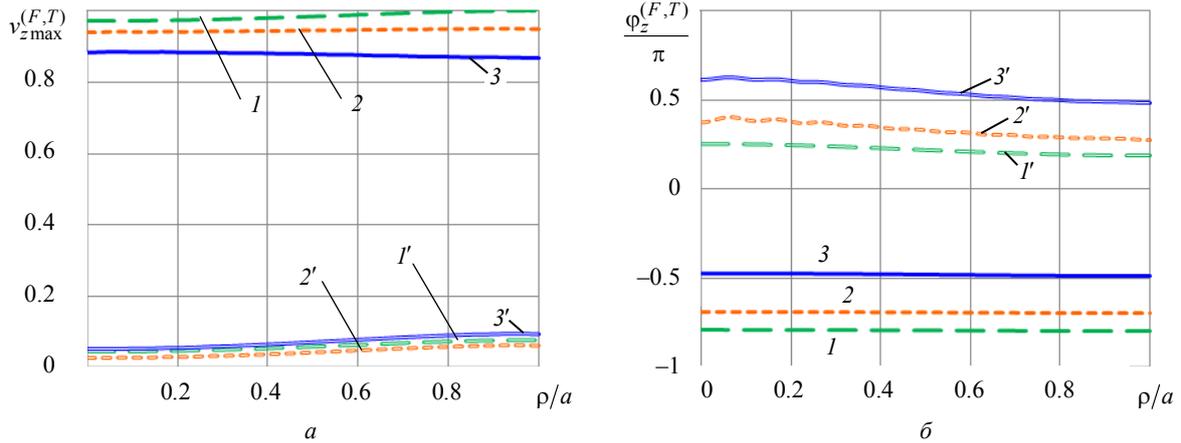


Рис. 3

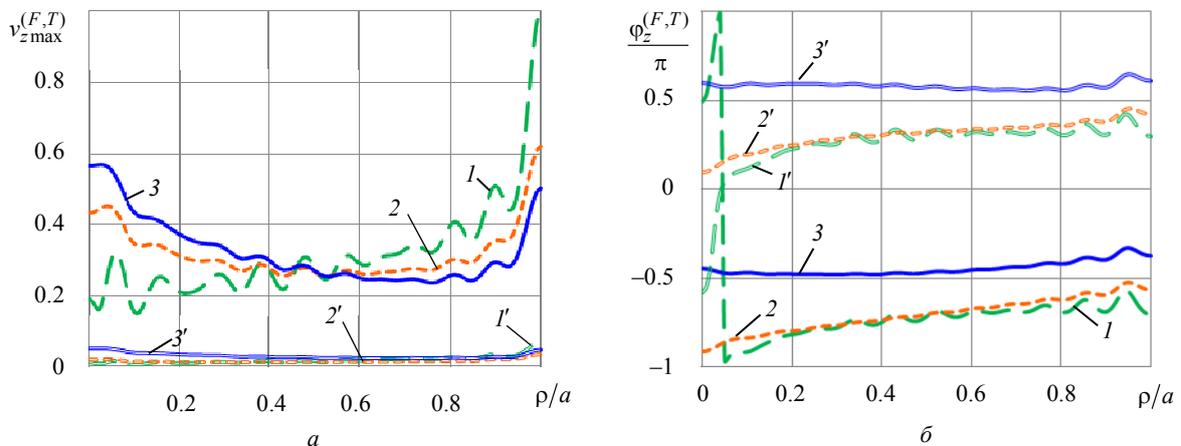


Рис. 4

Аналогичным образом на рис. 4 представлены результаты расчетов для случая излучения ПВТ в полупространства ($\theta_{F,T} = 90^\circ$). Можно наблюдать, что распределения фаз $\varphi_z^{(F,T)}$ колебательной скорости во фронтальной и тыльной апертурах ПВТ довольно близки к равномерным, поэтому можно считать излучение ПВТ подобным излучению круглого поршня радиусом a с некоторым амплитудным распределением колебательной скорости на его поверхности. Данное распределение при излучении ПВТ в соосные цилиндрические волноводы, приведенное на рис. 3, a , можно принять равномерным, что позволяет задать активное сопротивление излучения апертур ПВТ в виде $\text{Re}(Z_{\text{ап}}) = z_0 S_{\text{ап}}$ ($S_{\text{ап}} = \pi a^2$ – площадь апертуры), как для плоской волны [8].

Для излучения ПВТ в полупространства распределение амплитуд $v_{z\text{max}}^{(F,T)}$, приведенное на рис. 4, a , обладает определенной неравномерностью, характер которой зависит от частоты. В этом случае оценим электроакустический КПД с использованием усредненных значений амплитуд колеба-

тельной скорости $\bar{v}_{z\text{max}}^{(F,T)} = \frac{1}{N_d} \sum_{\rho=0}^{\rho=a} v_{z\text{max}}^{(F,T)}(\rho)$, где

N_d – число значений переменной ρ , заданной дискретно в интервале $[0, a]$. Тогда распределение амплитуды z -компоненты колебательной скорости можно считать равномерным и активное сопротивление излучения апертур ПВТ может быть задано выражением $\text{Re}(Z_{\text{ап}}) = z_0 S_{\text{ап}} [1 - J_1(2k_0 a)/(k_0 a)]$, как для круглого поршня в жестком экране ($J_1(\dots)$ – цилиндрическая функция Бесселя первого порядка). В итоге (2) может быть преобразовано к виду

$$\eta_{\text{за}} = \frac{a \left(\bar{v}_{z\text{max}}^{(F)} \right)^2 + \left(\bar{v}_{z\text{max}}^{(T)} \right)^2}{2l \sum_{i=1}^N \text{Re} \left[U_i (Y_{\Sigma_i} U_i)^* \right]} K_{\text{ап}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{ап}} = 1$ для $\theta_{F,T} = 0.1^\circ$; $K_{\text{ап}} = 1 - J_1(2k_0 a)/(k_0 a)$ для $\theta_{F,T} = 90^\circ$.

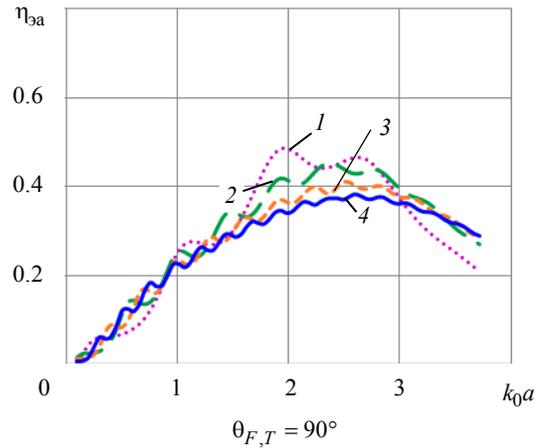
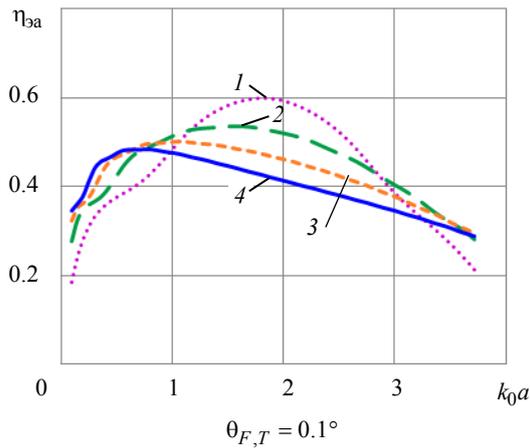


Рис. 5

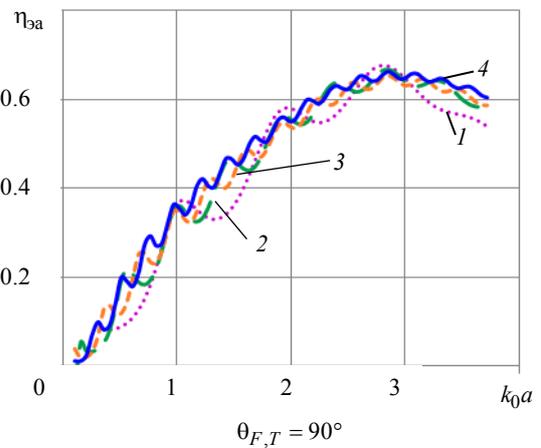
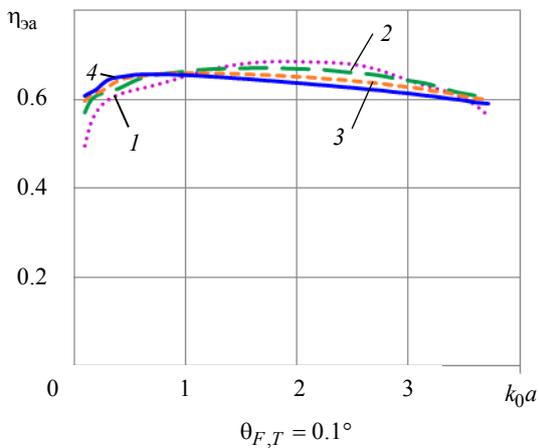


Рис. 6

Частотные зависимости электроакустического КПД $\eta_{эа}$, определенного по (3) для обобщенной модели ПВТ, при использовании пьезоцилиндров с радиальной поляризацией ($k_{31} = 0.35$) приведены на рис. 5 для двух крайних случаев излучения – в цилиндрические волноводы ($\theta_{F,T} = 0.1^\circ$) и в полупространства ($\theta_{F,T} = 90^\circ$) в зависимости от количества N образующих ПВТ пьезоцилиндров. Здесь приняты следующие обозначения кривых: 1 – $N = 5$; 2 – $N = 10$; 3 – $N = 15$; 4 – $N = 20$. При излучении ПВТ в соосные волноводы максимальные значения КПД наблюдаются в области $0.5 < k_0a < 2$ (в зависимости от N) и составляют $\eta_{эа} \approx 50\text{--}60\%$; при излучении в полупространства диапазон максимальных значений КПД $\eta_{эа} \approx 40\text{--}50\%$ смещен в область более высоких частот ($2 < k_0a < 3$), что обусловлено главным образом изменением характера нагруженности излучающих апертур ПВТ. В целом, полученные частотные зависимости электроакустического КПД соответствуют поведению АЧХ звукового

давления, получающихся для рассматриваемых вариантов излучения ПВТ [7]–[9]. Некоторое уменьшение КПД, связанное с ростом числа пьезоцилиндров N , по-видимому, обусловлено увеличением электрических потерь (ввиду увеличения числа усилителей мощности).

Аналогично на рис. 6 представлены результаты расчета электроакустического КПД в случае тангенциальной поляризации пьезоцилиндров ПВТ ($k_{33} = 0.7$). При этом наблюдается увеличение максимальных значений КПД до $\eta_{эа} \approx 60\text{--}70\%$, причем КПД меньше зависит от числа пьезоцилиндров ПВТ. В обоих случаях при излучении ПВТ в цилиндрические волноводы ($\theta_{F,T} = 0.1^\circ$) в области частот $k_0a < 0.4$ наблюдается снижение КПД, обусловленное существенным ростом амплитуд электрических напряжений, подаваемых на пьезоцилиндры [6]–[8], которые определяются в результате решения задачи синтеза. Более выраженное дополнительное уменьшение КПД для случая излучения ПВТ в полупространства в области частот $k_0a < 2$ связано со снижением уровня излучения ввиду недоста-

точной нагруженности апертур ПВТ в области частот ниже радиального резонанса пьезоцилиндров ($k_0 a \approx 2$).

Результаты теоретического исследования электрических нагрузочных характеристик пьезоцилиндров ПВТ показывают, что основное влияние на них оказывает порядковый номер пьезоцилиндра, т. е. его положение в составе преобразователя. В этом отношении перестроение конусных областей излучения обобщенной модели ПВТ, которое приводит к изменению акустической нагруженности его пьезоцилиндров, не столь существенно. Характер частотных зависи-

мостей входной электрической проводимости пьезоцилиндров определяет главным образом ее емкостная составляющая, что позволяет сформировать вполне определенные требования к электронной аппаратуре формирования импульсов возбуждения ПВТ. Оценка электроакустического КПД, который составляет в зависимости от используемого типа поляризации пьезоцилиндров и работы ПВТ 40–70 %, свидетельствует об эффективности работы преобразователя, особенно с учетом реализуемой полосы пропускания шириной не менее 3 октав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша и др.; под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984.
2. Справочник по гидроакустике / А. П. Евтютов, А. Е. Колесников, Е. А. Корепин и др. Л.: Судостроение, 1988.
3. Гаврилов А. М., Медведев В. Ю., Батрин А. К. Частотные характеристики электрического импеданса пьезопреобразователя при различных условиях нагрузки // Изв. ТРТУ № 5 (28), 2002. С. 132–140.
4. Тарасова Г. Б. Коэффициент полезного действия преобразователя // Гидроакустическая энциклопедия / под общ. ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999.
5. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника, 2018. № 5. С. 60–70.
6. Пестерев И. С., Сосновский Н. Н., Степанов Б. Г. Излучение преобразователем волноводного типа в соосные с ним конусные полупространства // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. № 1. С. 70–82.
7. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 2. С. 35–45.
8. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 87–96.
9. Степанов Б. Г. Излучение одиночным преобразователем волноводного типа в полубесконечные пространства // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История, 2014. С. 360–364.
10. Пестерев И. С. Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 55–62.
11. Степанов Б. Г. Входной электрический импеданс пьезоцилиндров, образующих преобразователь волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 5. С. 44–49.
12. Степанов Б. Г., Зайцева Н. А. Нагрузочные электрические характеристики стержневых преобразователей с фазированным возбуждением секций // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 8. С. 92–99.

I. S. Pesterev

State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University

ELECTROACOUSTIC CHARACTERISTICS WAVEGUIDE TYPE TRANSDUCERS

The results of calculations for the total input conductivity and the angle of shift between currents and electric voltages, exciting piezocylinders, that form a waveguide type transducer (WTT) are presented. The calculations are performed on the basis of the WTT model, radiating into conical semi-infinite spaces that are tunable by the opening angle. The nature of the influence of the opening angles of the cone half-spaces and the waves reflected from the WTT apertures on the calculation results is analyzed. The distribution of the amplitude and phase of the normal component of the vibrational velocity in the radiating frontal and rear apertures of the WTT is considered. Calculated ratios for estimating the electroacoustic efficiency of WTT are obtained. The results of calculations of the electroacoustic efficiency when WTT radiation is emitted into coaxial semi-infinite waveguides and half-spaces are presented. The influence of the value of the electromechanical coupling coefficient of piezoceramic (variants of piezocylinders with radial and tangential polarization) on the considered characteristics of WTT is analyzed.

Input electrical impedance, efficiency, piezocylinders, waveguide type transducer, frequency response