

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА. ЗАДАЧА СИНТЕЗА*

Рассмотрена работа гидроакустического преобразователя волноводного типа содержащего соосный набор водозаполненных пьезоцилиндров, возбуждаемых по принципу «бегущей волны», и излучающего через апертуры крайних пьезоцилиндров. Показана возможность расширения полосы пропускания преобразователя до 3.5 октав при обеспечении выраженной асимметрии излучения.

Широкополосность, гидроакустический преобразователь, волновод, синтез частотных характеристик

В работах [1], [2] рассматривалась задача об излучении идеализированной модели водозаполненного цилиндрического преобразователя волноводного типа с непрерывным распределением на его внутренней цилиндрической поверхности радиальной составляющей колебательной скорости в виде бегущей волны. Реализация такого преобразователя может быть осуществлена соосным набором N идентичных пьезоцилиндров (рис. 1) с внутренним радиусом a и высотой l , акустически разделенных по торцам гибкими прокладками толщиной Δ , и возбуждаемых электрическими напряжениями $U_i = U_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$. Здесь $U_{im}(\omega)$ и $\psi_i(\omega)$ – амплитуды и фазы электрических напряжений, в общем случае являющихся функциями гео-

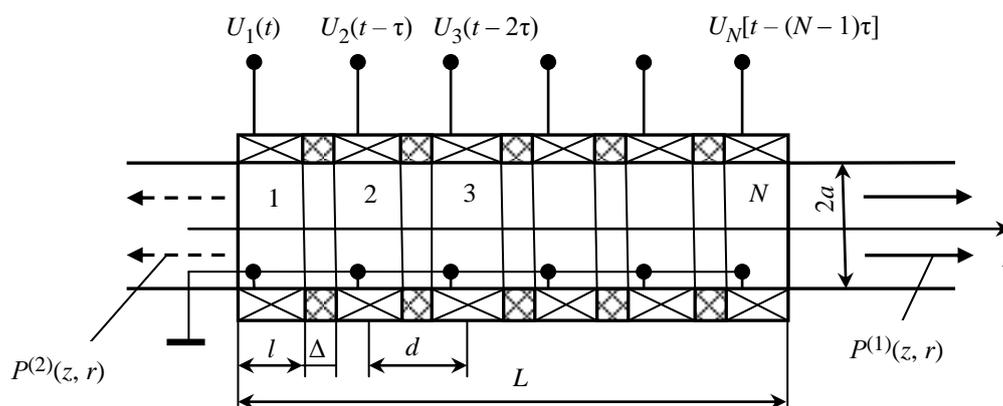


Рис. 1

метрических параметров преобразователя и частоты; $i = 1, 2, \dots, N$. В данном случае фазовый множитель выбирается в виде $\psi_i(\omega) = k_0 d(i-1) = \omega \tau(i-1)$, что определяется необходимостью реализации звукового поля внутри преобразователя волноводного типа в виде бегущей волны. Здесь $\tau = d/c_0$; $d = l + \Delta$; $k_0 = \omega/c_0$; c_0 – скорость звука в жидкости, заполняющей всю внутреннюю полость преобразователя (пьезоцилиндров) и внешней среды (полубесконечные волноводы, на которые нагружены излучающие апертуры преобразователя). Внешние цилиндрические поверхности пьезоцилиндров не являются излучающими, т. е. изолируются звукомягким экраном или газом. Принцип работы преобразователя волноводного типа подобен рассмотренному в [1] и заключается в том, что акустические волны, последовательно

* Начало. Окончание в № 4.

излучаемые пьезоцилиндрами, распространяются вдоль оси преобразователя волноводного типа в двух противоположных направлениях. Во фронтальном направлении (по оси z) пьезоцилиндры возбуждаются с последовательно нарастающей амплитудой и временной задержкой $\tau_i = d / c_0 (i - 1)$, что приводит к последовательному усилению акустического поля благодаря синфазному сложению акустических волн, излученных каждым последующим пьезоцилиндром. В противоположном (тыльном) направлении, ввиду некогерентности сложения акустических волн, происходит ослабление акустического поля, чем достигается ярко выраженная асимметрия (однонаправленность) излучения преобразователем волноводного типа. Благодаря усилению акустического поля во фронтальном направлении, каждое последующее кольцо оказывается нагруженным на большее, по сравнению с предыдущим, активное сопротивление излучения (кольца работают как бы на более плотную среду). В итоге это приводит к расширению рабочего диапазона частот всего преобразователя волноводного типа.

Расчетная модель преобразователя волноводного типа предполагает его использование в составе антенны, которая обеспечивает достаточную нагруженность излучающих апертур таких преобразователей во всем рабочем диапазоне частот. При этом собственно гидроакустическая антенна формируется параллельным набором таких преобразователей, подобно антенне, составленной из стержневых преобразователей. Требуемая характеристика направленности антенны определяется размерами ее апертуры, формируемой набором выходных отверстий преобразователей волноводного типа (пьезоцилиндров).

Характер колебаний i -го пьезоцилиндра в соответствии с общей теорией электроакустических преобразователей [3] может быть описан уравнением

$$v_i [r_{м.п} - j(\omega m_3 - 1/(\omega C_3)) + Z_{Si}] = N_T U_i, \quad (1)$$

где v_i – колебательная скорость излучающей поверхности пьезоцилиндра; $r_{м.п} \approx R_{Si} (1 - \eta) / \eta$ – сопротивление механических потерь (η – механоакустический КПД); $m_3 = 2\pi a_{ср} l \delta \rho_k$ и $C_3 = a_{ср} S_{11}^E / 2\pi \delta l$ – эквивалентные масса и гибкость пьезоцилиндра (ρ_k – плотность материала пьезоцилиндра; $a_{ср} = a + \delta / 2$; δ – толщина стенки пьезоцилиндра); $Z_{Si} = R_{Si} - jX_{Si} = z_0 S (r_{Si} - jx_{Si})$ – полное сопротивление излучения ($S = 2\pi a l$; z_0 – удельный импеданс воды (жидкой среды, заполняющей волновод)); $N_T = 2\pi d_{31} l / S_{11}^E$ – коэффициент электромеханической трансформации (d_{31} – пьезомодуль; S_{11}^E – упругая податливость); U_i – возбуждающее электрическое напряжение. Полное сопротивление излучения (Z_{Si}) определяется с учетом взаимодействия по полю с другими пьезоцилиндрами [4] в соответствии с формулой $Z_{Si} = Z_{i1} \frac{v_1}{v_i} + Z_{i2} \frac{v_2}{v_i} + \dots + Z_{ii} + \dots + Z_{iN} \frac{v_N}{v_i}$, где Z_{ii} – собственное и взаимные $Z_{ik} = Z_{ki}$ сопротивления излучения.

Используя структуру уравнения (1) и полученные в [5] выражения для собственного и взаимных сопротивлений излучения, можно записать систему уравнений, описывающих колебательный процесс для N пьезоцилиндров, образующих преобразователь волноводного типа:

звуковых давлений при излучении во фронтальном $p^{(1)}$ и тыльном $p^{(2)}$ направлениях в следующем виде:

$$p^{(1)} = z_0 \left[-\frac{l \sin(lx_0/2a)}{a \quad lx_0/2a} \sum_{i=1}^N v_i e^{jk_0 z_i^{(1)}} + j2x_0 \sum_{i=1}^N v_i \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_m r/a) \operatorname{sh}(\gamma_m l/2a) e^{-\gamma_m z_i^{(1)}/a}}{J_0(\beta_m) \gamma_m^2} \right]; \quad (3)$$

$$p^{(2)} = z_0 \left[-\frac{l \sin(lx_0/2a)}{a \quad lx_0/2a} \sum_{i=1}^N v_i e^{-jk_0 z_i^{(2)}} + j2x_0 \sum_{i=1}^N v_i \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_m r/a) \operatorname{sh}(\gamma_m l/2a) e^{\gamma_m z_i^{(2)}/a}}{J_0(\beta_m) \gamma_m^2} \right], \quad (4)$$

где $z_i^{(1)} = d(N-i) + l/2 + z$; $z_i^{(2)} = -[d(i-1) + l/2 + z]$; $\gamma_m = \sqrt{\beta_m^2 - x_0^2}$; β_m – корни уравнения $J_1(\beta_m) = 0$; r – координата в радиальном направлении; z – координата, определяющая расстояние от излучающих апертур преобразователя волноводного типа во фронтальном и тыльном направлениях. Первые члены в квадратных скобках формул (3) и (4) определяют сумму квазиплоских волн, распространяющихся, соответственно, во фронтальном и тыльном направлениях, а вторые члены в виде двойных сумм – совокупность нормальных волн более высокого порядка ($m \geq 1$), которые при $x_0 = k_0 a < \beta_1 = 3.83$ являются вырожденными и сравнительно быстро убывающими с ростом координаты z и номера нормальной волны m .

С позиции определения полосы пропускания по уровню -3 дБ частотный диапазон преобразователя волноводного типа ограничен сверху величиной $k_0 a \leq \beta_1$. Другим ограничением может служить требование отсутствия добавочного максимума в тыльном направлении, что определяется условием $k_0 d \leq \pi$. Эти требования приводят к соотношению по выбору геометрии пьезокерамических колец, образующих преобразователь волноводного типа: $d/a \leq \pi/3.83 \approx 0.82$.

На рис. 2 для различного числа пьезоцилиндров N ($a - 3$; $b - 10$; $v - 20$) приведены примеры расчетов амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик звукового давления соответственно: $p_N^{(1),(2)} = |p^{(1),(2)}|/M_N$ и $\varphi_p^{(1),(2)} = \arg p^{(1),(2)}$ при излучении во фронтальном (кривые 1) и тыльном (кривые 2) направлениях. Расчет выполнен в предположении заданных единичных амплитуд колебательной скорости $|v_{mi}| = v_m = 1$ при расположении точки наблюдения на акустической оси преобразователя ($r/a = 0$). Для удобства сопоставления полученных результатов нормировка АЧХ излучения выполнена к величине $M_N = z_0 N_T l/a$. Значения параметров преобразователя волноводного типа были выбраны следующими: $l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$; $Q_0 = 3$; $n_{0k} = 0.52$; $\eta = 0.7$. Результаты расчетов АЧХ излучения приведены для случая дальнего поля, что практически получается при $z \geq 10l/a$. При меньших значениях z начинает сказываться действие вырожденных нормальных волн высших порядков, которое проявляется в основном в виде загибов вверх

или вниз кривых I в области частот $k_0 a \geq 3.5$ в зависимости от значения r/a . Как видно, для фиксированного значения d/a вид АЧХ излучения во фронтальном направлении $p_N^{(1)}$ не зависит от числа пьезоцилиндров, в основном определяется первым слагаемым формулы (3) и сравнительно слабо зависит от частоты (волнового размера $k_0 a$). При этом уровень излучения во фронтальном направлении, ввиду синфазности сложения распространяющихся в направлении оси z волн, увеличивается с ростом N (см. также коэффициент нормировки). В тыльном направлении, по мере увеличения числа пьезоцилиндров N , уровень излучения уменьшается и носит осциллирующий характер.

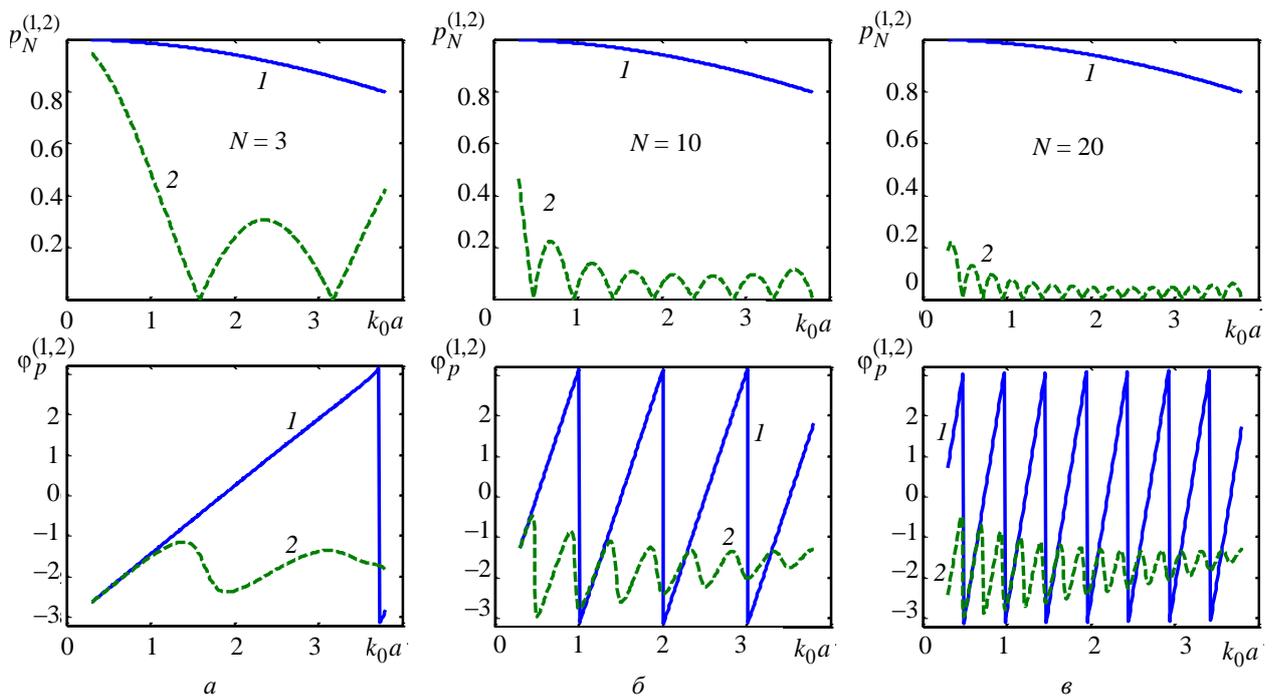


Рис. 2

Что касается ФЧХ излучения $\varphi_p^{(1)}$ и $\varphi_p^{(2)}$, то для лучшей наглядности они приведены для случая $z=0$, соответствующего расположению точки наблюдения в плоскости излучающих апертур преобразователя волноводного типа. Приведенная структура ФЧХ излучения сохраняется до значений $r/a \leq 0.6$. При $r/a \geq 0.7$ пределы изменения ФЧХ излучения в тыльном направлении достаточно быстро увеличиваются, достигая тех же значений, что и для излучения во фронтальном направлении, но линейность изменения $\varphi_p^{(2)}$ нарушается. При удалении от излучающих апертур (увеличении z) значения ФЧХ излучения перестают зависеть от радиальной координаты r и достаточно быстро нарастают, приводя в рамках принятого представления результатов расчетов к многочисленным пульсациям в пределах значений $[-\pi, \pi]$. Однако линейность изменения ФЧХ излучения при любом положении точки наблюдения обеспечивается только для $\varphi_p^{(1)}$ – излучения во фронтальном направлении.

Для рассмотренных примеров построения преобразователя волноводного типа на рис. 3 приведены частотные зависимости амплитуд U_{im} и φ_i фаз электрических напряжений, возбуждающих пьезоцилиндры с номером i и обеспечивающих АЧХ и ФЧХ излучения, показанные на рис. 2. Обозначения кривых на рис. 3 соответствуют определенным номерам i пьезоцилиндров. Необходимые для реализации задачи синтеза значения амплитуд электрических напряжений U_{im} имеют достаточно сложную частотную зависимость.

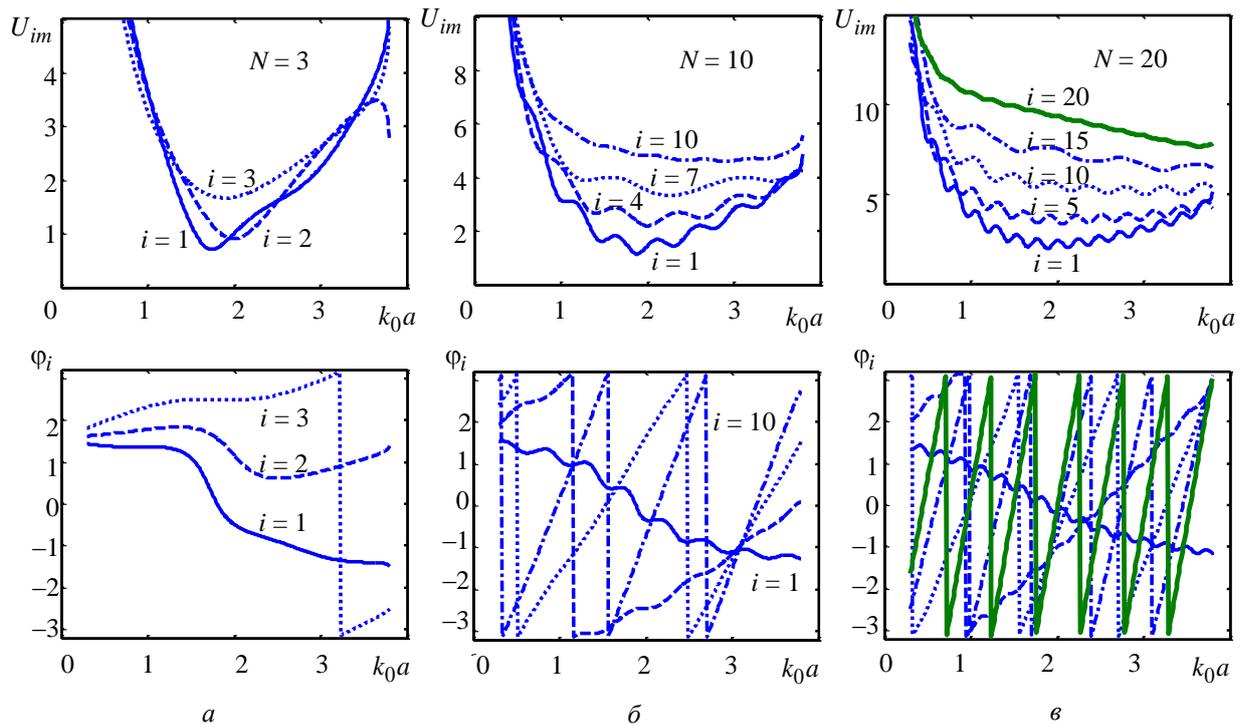


Рис. 3

Однако здесь можно выделить две характерные (для любых значений N) тенденции: рост амплитуд электрических напряжений U_{im} с увеличением номера i пьезоцилиндра (при фиксации частоты – волнового размера k_0a) практически во всем рабочем диапазоне частот преобразователя волноводного типа, а также – подобность частотных зависимостей для U_{im} частотной характеристике полосового фильтра. Указанный рост амплитуд U_{im} при увеличении номера i пьезоцилиндра обусловлен необходимостью поддержания амплитуд колебательных скоростей $|v_{im}| = v_m = \text{const}$, а характерные минимумы в частотных зависимостях U_{im} в области $k_0a \approx 2$ – проявлением резонансных свойств пьезоцилиндров (особенно первых их номеров). Характер поведения ФЧХ возбуждающих электрических напряжений φ_i последовательно изменяется с ростом номера i пьезоцилиндра от вида подобного ФЧХ излучения одиночного пьезоцилиндра до ФЧХ излучения преобразователя волноводного типа. Достаточно быстрый рост значений U_{im} в области низких частот может послужить ограничивающим фактором полосы пропускания преобразователя волноводного типа. Условно эту границу можно определить как $k_0a \approx 0.3...0.4$. Тогда практи-

чески реализуемая полоса пропускания при учете верхней границы $k_0 a \approx 3.83$ может, соответственно, составить 3.7...3.2 октавы.

Для фиксированного числа пьезоцилиндров N на рис. 4 показано влияние отношения l/a (d/a) на АЧХ и ФЧХ звукового давления при излучении во фронтальном (кривые 1–3) и тыльном (кривые 1'–3') направлениях. Номера кривых соответствуют: 1(1') – $d/a = 0.4$; 2(2') – $d/a = 0.6$; 3(3') – $d/a = 0.8$; $d/a = 1.1l/a$. Значения других параметров приняты равными: $N=10$; $Q_0=3$; $n_{0k}=0.52$; $\eta=0.7$. По мере увеличения отношения d/a увеличивается суммарная длина преобразователя, что отражается на уменьшении уровня тыльного излучения, более быстром спаде АЧХ излучения во фронтальном направлении с ростом частоты, а также – увеличении угла наклона ФЧХ излучения.

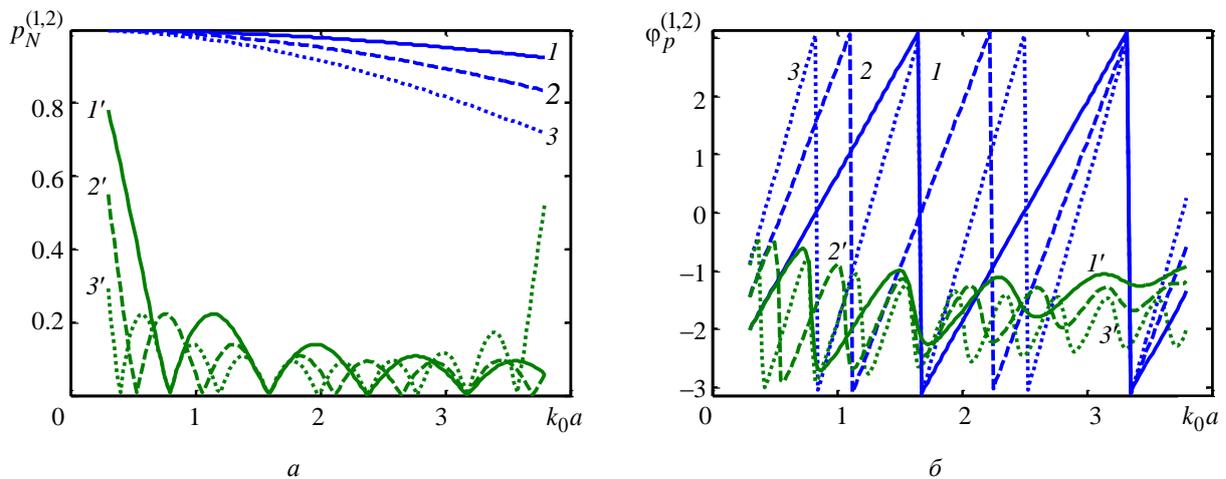


Рис. 4

В случае задачи синтеза увеличение числа пьезоцилиндров N при сохранении общей длины преобразователя ($N d/a = \text{const}$) или при сохранении отношения $d/a = \text{const}$ – приводит к увеличению уровня излучения во фронтальном направлении и уменьшению – в тыльном. Причем, для выбранного значения $d/a = \text{const}$, независимо от числа пьезоцилиндров N , сохраняется качественный вид АЧХ излучения во фронтальном направлении. С уменьшением отношения d/a ($d/a \leq 0.8$) излучение во фронтальном направлении становится все менее зависящим от частоты (рис. 4, а, кривая 1). Формально это обстоятельство объясняется тем, что в диапазоне частот до $k_0 a \leq 3.83$ преобразователем волноводного типа формируется и излучается квазиплоская волна, частотная зависимость амплитуды которой, при условии $|v_{mi}| = \text{const}$, определяется функцией $\Phi_{\text{п}}(x_0) = \frac{\sin(x_0 l / 2a)}{x_0 l / 2a}$ (см., например, формулу (3)). Иными словами, чем меньше отношение l/a , тем кривая, характеризующая АЧХ излучения во фронтальном направлении, становится графически ближе к линии, параллельной оси частот $x_0 = k_0 a$. Это положение также находит свое отражение в работах [1], [2], в которых на базе упрощенной модели преобразователя волноводного типа, по сути, показаны предельные его возможности.

Помимо уменьшения отношения l/a (d/a), выравниванию АЧХ излучения во фронтальном направлении, т. е. когда она становится параллельной оси частот, способствует

частотная коррекция амплитуды колебательной скорости с помощью функции, обратной $\Phi_{\Pi}(x_0)$: $v_{im} = v_m \frac{x_0 l / 2a}{\sin(x_0 l / 2a)}$. Причем, эта коррекция не приводит к существенному изменению частотных зависимостей возбуждающих электрических напряжений U_{im} , а также активной и реактивной составляющих сопротивления излучения R_{Si} и X_{Si} . Чем больше отношение l/a , тем сильнее сказывается дополнительно вводимая коррекция для v_{im} на АЧХ излучения и виде частотных зависимостей U_{im} . В качестве примера на рис. 5 приведены нормированные АЧХ излучения во фронтальном (кривые 1 и 2) и тыльном (кривые 1' и 2') направлениях для $k_0 a U_{im} k_0 a l/a = 0.82$ ($d/a = 0.9$), а также частотные зависимости необходимых амплитуд возбуждающих электрических напряжений U_{im} в случае введения частотной коррекции амплитуды колебательной скорости (сплошные кривые) и без нее (штриховые кривые). Значения других параметров, принятые при расчете: $N=12$; $Q_0=3$; $n_{0k}=0.52$; $\eta=0.7$. Поскольку значение d/a здесь принято больше, чем рекомендуемое ($d/a \leq 0.82$), то на АЧХ излучения в тыльном направлении формируется добавочный максимум, определяемый дискретом линейной фазированной антенны. Выбор значения $d/a = 0.9$ обусловлен, с одной стороны, тем, чтобы лучше показать различия в АЧХ, а с другой стороны, продемонстрировать указанное ранее обстоятельство – появление добавочного максимума в тыльном направлении излучения. Указанное введение частотной коррекции амплитуды колебательной скорости обеспечивает практически постоянную АЧХ излучения во фронтальном направлении, но требует небольшого увеличения с ростом частоты значений амплитуд возбуждающих электрических напряжений U_{im} , не меняя качественного характера их изменения с частотой. В области частот, соответствующей формированию добавочного максимума (при излучении в тыльном направлении), и после нее нарушается структура поведения и усложняется частотная зависимость амплитуд возбуждающих электрических напряжений U_{im} .

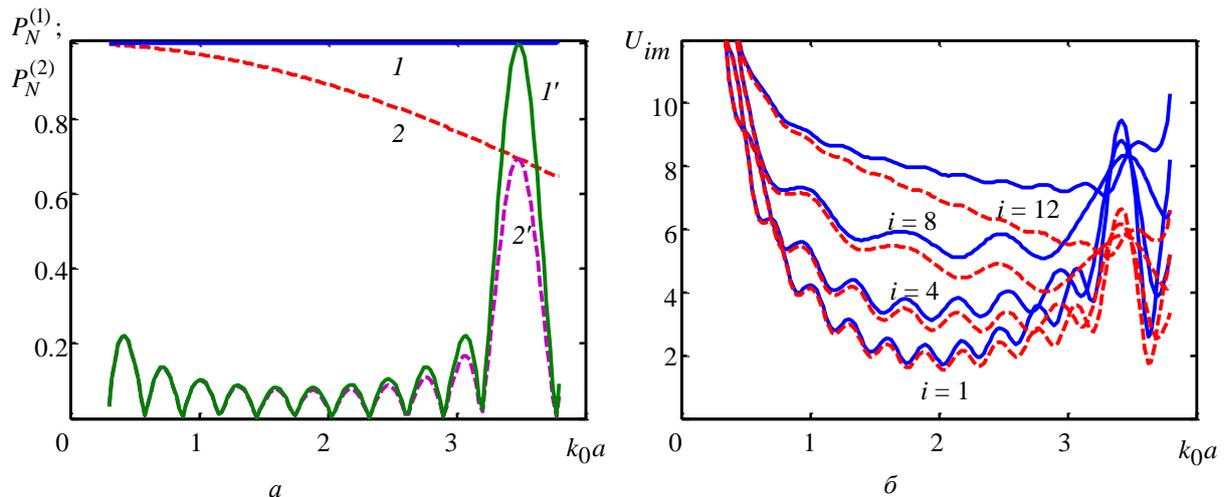


Рис. 5

На рис. 6 показаны типичные частотные зависимости нормированных активной $r_{Si} = R_{Si}/z_0 S$ и реактивной $x_{Si} = X_{Si}/z_0 S$ составляющих полного сопротивления излучения. Параметры преобразователя в данном случае были приняты следующими: $N=10$;

$l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$; $Q_0 = 3$; $n_{0k} = 0.52$; $\eta = 0.7$. Номера кривых здесь соответствуют: 1 – $i = 1$; 2 – $i = 4$; 3 – $i = 7$; 4 – $i = 10$. Практически во всем рассматриваемом диапазоне частот с увеличением номера пьезоцилиндра увеличивается его активная составляющая сопротивления излучения. Причем для i -го пьезоцилиндра величина r_{Si} в основном определяется значениями N , l/a и собственно номером i , а также – величиной вносимых активных составляющих, поскольку в рассматриваемом диапазоне частот нормированная активная составляющая собственного сопротивления излучения пьезоцилиндра слабо изменяется в пределах $(0.5 \dots 1)l/a$ (см. [5]). Реактивная составляющая x_{Si} , осциллируя, изменяется в сравнительно небольших пределах вблизи нуля, причем амплитуда и частота осцилляций уменьшаются с ростом номера i пьезоцилиндра, приближаясь для $i = N$ к виду реактивной составляющей собственного сопротивления излучения одиночного пьезоцилиндра [5]. Указанный характер изменения активной и реактивной составляющих сопротивления излучения иллюстрируются также результатами расчетов, представленными на рис. 7, для распределения r_{Si} и x_{Si} по пьезоцилиндрам вдоль преобразователя с теми же значениями параметров, что и для рис. 6. Номера в распределении r_{Si} и x_{Si} соответствуют: 1 – $k_0 a = 1$; 2 – $k_0 a = 2$; 3 – $k_0 a = 3$.

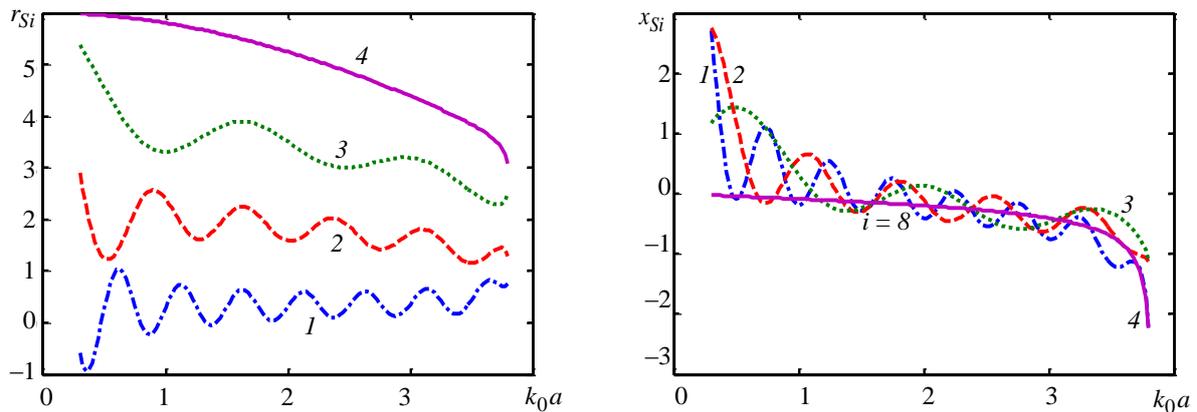


Рис. 6

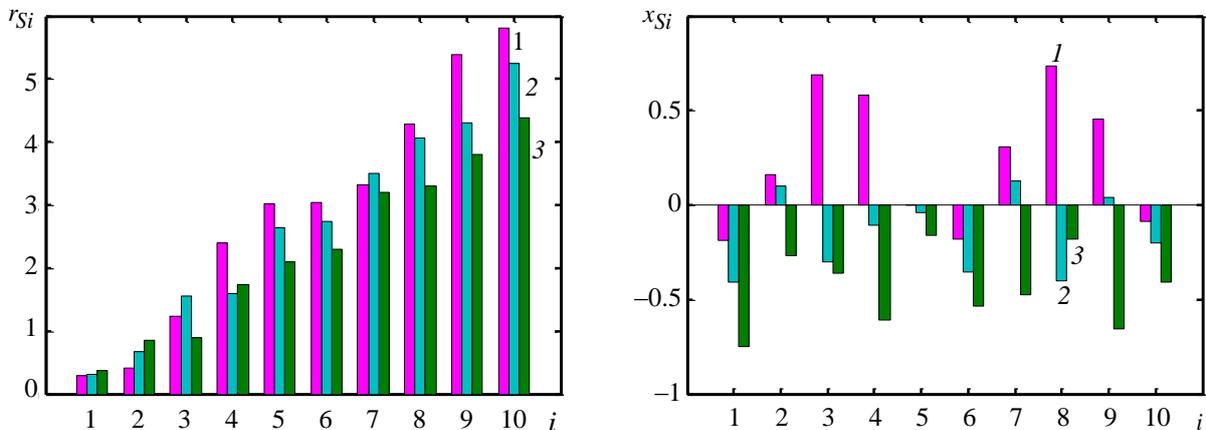


Рис. 7

Приведенные результаты расчетов иллюстрируют возможность построения достаточно эффективного гидроакустического преобразователя с полосой пропускания более трех октав, линейной ФЧХ и выраженной асимметрией излучения. Во второй части статьи будет рассмотрена возможность дополнительного расширения рабочего диапазона частот преобразователя волноводного типа и его работа в импульсном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Б. Г. Широкополосный преобразователь волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. Вып. 8. С. 39–50.
2. Степанов Б. Г. О возможности дополнительного расширения полосы рабочих частот широкополосных преобразователей волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 4. С. 58–64.
3. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
4. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
5. Степанов Б. Г., Теплякова А. В. Об излучении водозаполненного пьезоцилиндра через торцевые апертуры в волновод // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 89–95.

B. G. Stepanov

THE SUPERWIDEBAND HYDROACOUSTIC TRANSDUCER OF WAVEGUIDE TYPE. A SYNTHESIS PROBLEM

Work of the hydroacoustic transducer of waveguide type containing a coaxial set of the water filled piezocylinders, excited by the principle of "running wave", and radiating through apertures extreme piezocylinders is considered. Possibility of expanding the bandwidth of the transducer to 3.5 octaves is shown at maintenance of the expressed asymmetry of radiation.

Wideband response, hydroacoustic transducer, guide, synthesis of the frequency characteristics

УДК. 621.396

*А. М. Иванов, А. В. Немов, Д. А. Немов,
Д. Ю. Тюфтяков, М. А. Чистов*

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА МОРЕ

Создан опытный образец уникального аппаратно-программного комплекса для прецизионных измерений координат и вектора скорости в морских условиях. В изделии впервые сочетается применение радионавигационных и связанных спутниковых технологий с Интернет-технологиями. Комплекс может использоваться как для навигации, так и в метрологических целях. Гарантируется погрешность измерения абсолютных координат в режиме постобработки не более 10 см и миллиметровая точность измерения относительных координат в режиме кинематики реального времени.

Морская спутниковая геотроника, аппаратно-программный комплекс, материковый шельф, уникальность

Освоение морского шельфа, как и экономически значимых удаленных океанских территорий, в настоящее время не возможно без развития средств морской геотроники [1]. Современной многообещающей тенденцией является построение геодезических и иных приборов для высокоточного измерения координат и скорости в морских условиях на основе спутниковых радионавигационных систем (СНС).

Описываемый в настоящей статье аппаратно-программный комплекс (АПК) является одним из первых отечественных опытных образцов сложной морской спутниковой геотроники. Комплекс предназначен для обеспечения высокоточного контроля смещения