

Акустические приборы и системы

УДК 534.232

А.Г. Лейко, д.-р., техн. наук., З.Т. Гусак

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

Механические поля цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости

Выполнен численный анализ свойств механических полей цилиндрических антенн, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей с окружной поляризацией и плоских акустически мягких экранов, располагаемых в диаметральной плоскости излучателей. Рассмотрены излучатели силовой и компенсированной конструкций. Сопоставительный анализ частотных свойств и угловых распределений радиальных и окружных скоростей антенн позволил установить ряд тонких эффектов в формировании механических полей антенн рассматриваемого типа в зависимости от вида их конструктивного исполнения. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: механические поля; цилиндрическая антенна с экраном; силовая и компенсированная конструкция; излучатель с окружной поляризацией.

Введение

В гидроакустике часто возникают ситуации, когда требуется сформировать эффективное излучение звуковой энергии в широком диапазоне углов, а за пределами этой зоны звуковая энергия должна быстро снижаться. Антенны с такого типа направленными свойствами получили название антенн с секторной характеристикой направленности [1,2]. Одним из вариантов технической реализации таких антенн является антенна, образованная из кругового цилиндрического пьезокерамического излучателя и плоского акустического экрана, расположенного вблизи излучателя в его диаметральной плоскости [3]. Такая антенна является предельным случаем вырождения уголкового рупорной антенны [4], когда рупор превращается в ленту (рис. 1).

Вопросам анализа физических полей, формируемых такими антеннами, были посвящены работы [4-7, 9, 10]. В работе [4] исследовались звуковые поля, создаваемые антеннами с секторными характеристиками направленности в традиционной постановке, когда на поверхности

излучателя антенны задана и поддерживается постоянной колебательная скорость. Задание значения колебательных скоростей принципиально исключает возможность изменения этих колебательных скоростей за счет реакции окружающей среды на возбуждение в ней звукового поля. Такой упрощенный подход к решению задачи об излучении звука секторной антенной неизбежно приводит к значительным ошибкам при оценке локальных и интегральных характеристик поля. Рассматриваемая ситуация в техническом отношении соответствует случаю электрического возбуждения антенны от генератора неограниченной мощности. Более реальным является подход, использованный в работах [5,7].

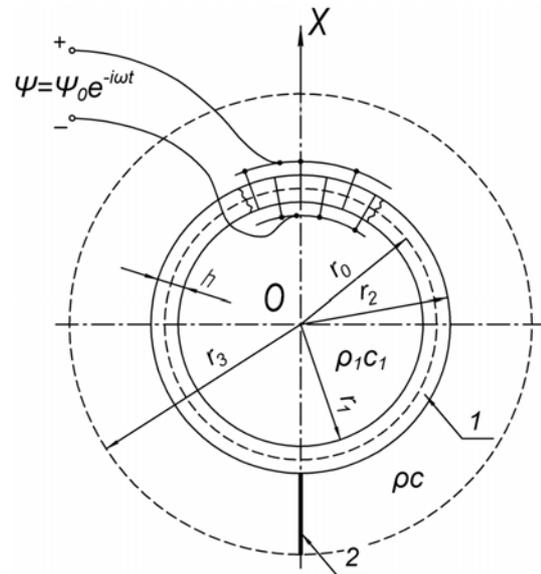


Рис. 1. Изображение нормального сечения гидроакустической антенны с экраном

При этом подходе в качестве излучателей рассматриваются реальные пьезокерамические преобразователи силовой и компенсированной конструкций, которые возбуждаются генератором конечной мощности. Это позволяет, во-первых, определить все физические поля, участвующие в работе антенны – электрические, механические и звуковые, и, во-вторых, при их

определении учесть как взаимодействие всех этих полей в процессе преобразования электрической энергии в акустическую, так и взаимодействие антенны с окружающими средами в процессе формирования акустических полей в них. Свойства акустических полей, создаваемых секторными антеннами с пьезокерамическими излучателями силовой и компенсированной конструкций, были предметом изучения в работе [7, 9, 10]. Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования ещё одного вида физических полей таких антенн, а именно, механических.

Результаты исследований

Рассмотрим частотные свойства механических полей, создаваемых гидроакустической антенной, образованной (рис. 1) из цилиндрического пьезокерамического излучателя 1 с окружающей поляризацией и плоского акустически мягкого экрана 2. Излучатель может быть выполнен в виде силовой (внутренняя полость вакуумирована или заполнена воздухом при нормальном атмосферном давлении) или компенсированной (внутри излучателя жидкость) конструкций [8].

Окружная поляризация обеспечивается образованием излучателя из жёстко склеенных между собой пьезокерамических призм, электрически включенных параллельно. К электродам призм приложен гармонический электрический сигнал вида $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$ частотой ω . Плоский акустически мягкий экран (выполнен в виде ленты) расположен в диаметральной плоскости излучателя вдоль всей его длины, имеет ширину $r_3 - r_2$ и малую толщину. Антенна расположена в среде с плотностью ρ и скоростью звука c , а её излучатель вакуумирован $\rho_1 c_1 = 0$, заполнен воздухом $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 0,000288$ или жидкостью с разным $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$, где ρ_1 и c_1 – плотность и скорость звука в среде внутри излучателя. Частотные свойства механических полей таких антенн будем изучать в виде зависимостей, во-первых, амплитуд и фаз нормальных составляющих колебательных скоростей поверхности излучателя антенны в центральной незэкранированной его части от частоты излучаемого сигнала, во-вторых, углового распределения этих амплитуд и фаз для разных частот, и в-третьих, от вида конструктивного исполнения этого излучателя.

Расчеты численных характеристик механических полей проводились с использованием аналитических соотношений, полученных в работе [5], для тех же параметров излучателей, которые были выбраны в работе [7]. При этом отметим, что для построения антенны в рассматриваемом случае $\varphi_0 = \pi$ и уголкового рупора вырождается в акустически мягкую ленту, толщина которой стремится к нулю.

При построении излучателя антенны в качестве пьезокерамики использовался состав ЦТБС-3 с параметрами: плотность

$$\rho_K = 7210 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \text{пьезомодуль } d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}};$$

$$\text{модуль упругости } C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \text{ Средний}$$

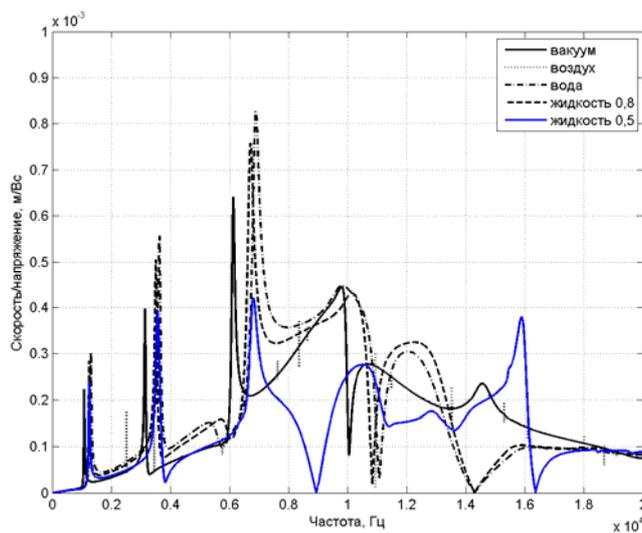
радиус оболочки излучателя принимался равным $r_0 = 0,068 \text{ м}$ при толщине стенки $h = 0,008 \text{ м}$ и количестве призм $N = 48$. Ширина акустического экрана выбиралась равной $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ и $r_3 - r_2 = 0,5 \text{ м}$. Параметры воздуха и воды принимались соответственно равными $\rho_1 = 1,27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $c_1 = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

$c = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Величина напряжения возбуждения составляла $\psi_0 = 200 \text{ В}$.

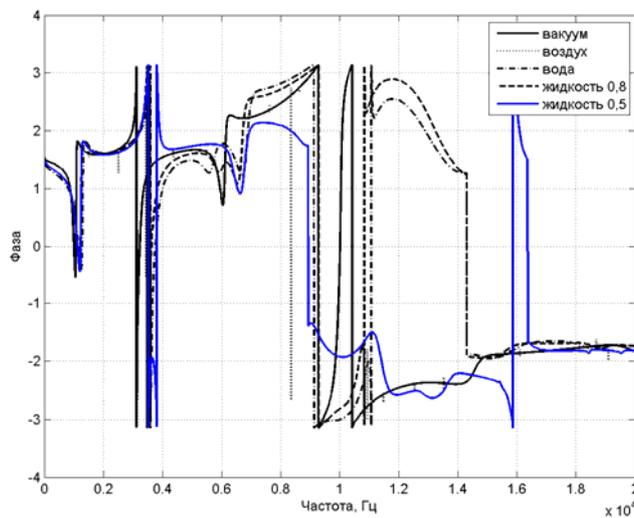
Результаты расчетов частотных зависимостей амплитуд и фаз радиальных скоростей центра незэкранированной внешней поверхности антенны и амплитуд первых шести мод этих скоростей представлены соответственно на рис. 2 и 3. Анализ кривых рис. 2 позволяет установить следующее. Прежде всего отметим, что частотные зависимости радиальных скоростей антенн с излучателями силовой и компенсированной конструкций близки по форме в области частот до резонанса нулевой моды колебаний вакуумированной пьезокерамической оболочки излучателя антенн ($\sim 9000 \text{ Гц}$) и существенно разнятся после этого резонанса. При этом в представленных зависимостях можно условно выделить три области: первую (низкочастотную) область $f < 6000 \text{ Гц}$, вторую (резонансную) область $6 \cdot 10^3 \text{ Гц} < f < 1,1 \cdot 10^4 \text{ Гц}$ и третью (высокочастотную) область $f > 1,1 \cdot 10^4 \text{ Гц}$. В первой области колебательные скорости антенн с излучателями различной конструкции достаточно быстро уменьшаются с понижением частоты и, что интересно, эти скорости становятся близкими по величине для всех антенн независимо от

конструктивного исполнения их излучателей. Этот результат вполне ожидаем и связан с тем, что с понижением частоты быстро растет собственный механический импеданс пьезокерамической оболочки, поскольку в этой области он имеет упругий характер, в то время как импе -

данс излучения антенн падает, поскольку их волновые размеры уменьшаются. Поэтому колебательные скорости антенн с излучателями разной конструкции полностью определяются собственными механическими импедансами оболочек, которые одинаковы у всех рассматриваемых антенн.



(а)



(б)

Рис. 2. Графики частотных зависимостей амплитуд (а) и фаз (б) колебательных скоростей антенн с излучателями силовой (вакуум, воздух) и компенсированной (вода, жидкости) конструкций

Во второй резонансной области собственные механические импедансы оболочек сравнимы с импедансами излучения антенн и существенную роль начинают играть реакции внутренней и внешней сред. Поэтому в этой области колебательные скорости антенн с излучателями

различного конструктивного исполнения существенно отличаются между собой. На отдельных частотах этой области модули колебательных скоростей различных по конструкции антенн могут отличаться в 5-10 раз (рис. 2а), а значения частот, где фазовая характеристика

принимает значение нуль, у всех антенн разные (рис. 2б). В третьей области на высоких частотах уменьшение колебательных скоростей с ростом частоты также обусловлено увеличением собственного механического импеданса пьезокерамической оболочки антенн различной конструкции, который в этой области уже имеет

инерциальный характер. Здесь также наблюдается тенденция к выравниванию скоростей, но не так быстро, как в первой области, поскольку действительная часть импеданса излучателя растет с частотой, а роль реакций внешней и внутренней сред излучателей является более весомой, чем в первой области.

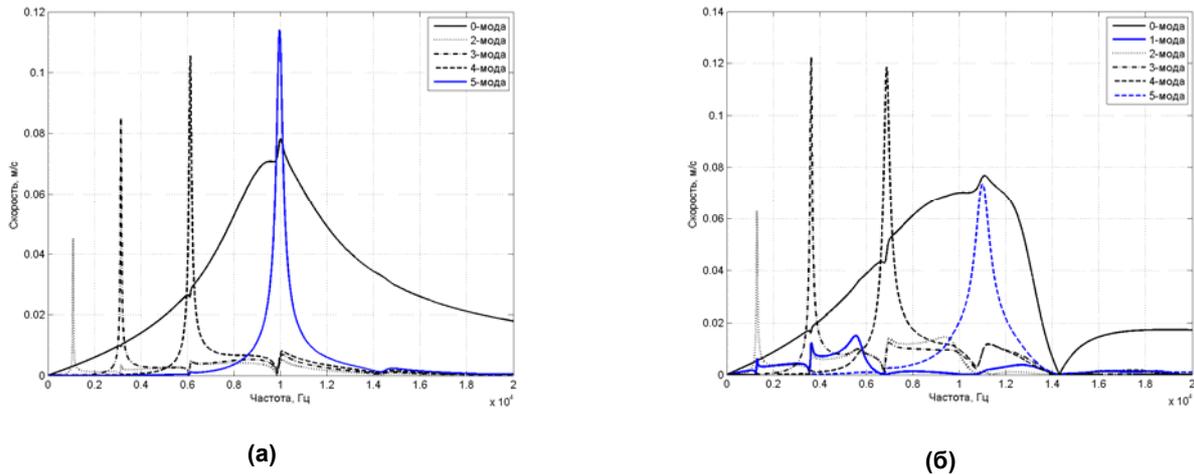


Рис. 3. Графики частотных зависимостей амплитуд первых шести мод радиальных колебаний антенн с излучателем силовой (а) и компенсированной (б) конструкций

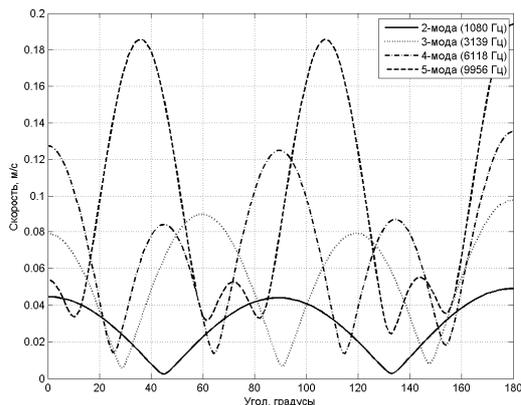
Возвращаясь к анализу частотных зависимостей колебательных скоростей антенн с различным конструктивным исполнением их излучателей в первой области (рис. 2а), следует обратить внимание на появление в ней большого числа узкополосных выбросов, амплитуды скоростей в которых в несколько раз превышают амплитуду скорости нулевой моды на этих частотах. При этом ряд из них связан с появлением дополнительных резонансов, о чем свидетельствует переход через нуль (рис. 2б) фазовых характеристик этих антенн. Поскольку частоты этих выбросов незначительно отличаются между собой для антенн силовой и компенсированной конструкций, то напрашивается вывод о том, что все они обусловлены реакцией внешней среды, которая в свою очередь определяется появлением в конструкции антенны плоского акустически мягкого экрана, расположенного в диаметральной плоскости излучателя. Такая реакция среды вызвана в том числе и появлением на поверхности излучателя резонирующего объема, образованного его излучающей поверхностью и боковыми плоскостями акустического экрана. Присоединенная масса этого объема и упругость пьезокерамической оболочки излучателя и создают низкочастотные резонирующие контура.

Анализ фазовых характеристик колебательных скоростей антенн различного конструктивного исполнения (рис. 2б) показывает многократное пересечение ими оси абсцисс. Частоты, на которых это происходит, являются собственными частотами системы «внутренняя среда – пьезокерамическая оболочка – акустически мягкий плоский экран – внешняя среда». Таким образом, введение в состав антенны кроме пьезокерамического излучателя плоского акустически мягкого экрана и размещение его в диаметральной плоскости излучателя приводит к расширению и обогащению спектра собственных частот антенны.

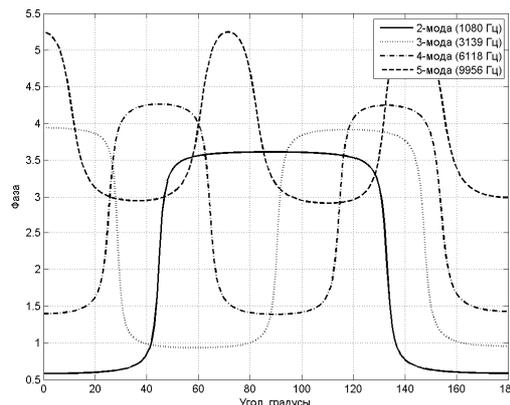
Для того, чтобы понять причины такого поведения рассматриваемых антенн, обратимся к рис. 3, на котором изображены частотные зависимости первых шести мод радиальных скоростей антенн. Остальные моды возбуждаются слабее и их амплитуды малы по сравнению с первыми шестью. Анализ приведенных кривых показывает, что в отличие от радиально симметричной системы, какой является излучатель антенны, в котором при выбранном способе электрического нагружения возбуждается только одна собственная форма колебаний и поэтому существует один резонанс излучателя, в системе с нарушенной симметрией, какой явля-

ется антенна с плоским экраном, появляются последующие моды, сравнимые по амплитуде с пульсирующей. Таким образом, в данном случае происходит эффективное перераспределение энергии, которая вводится в антенну на пульсирующей моде, между последующими формами колебаний. Как уже отмечалось выше, все резонансные частоты антенны с различной конструкцией её излучателя определяются взаимодействием масс и упругостей оболочки

излучателя и слоя среды внутри излучателя, а также присоединенной массы и упругости внешней среды. Поэтому ясно, что увеличивая общую податливость среды внутри излучателя при прочих равных условиях можно добиться снижения частот всех резонансов антенны. Этого можно достигнуть, заменяя в антенне излучатель компенсированной конструкции (рис. 3б) на излучатель силового типа (рис. 3а), что и демонстрируют приведенные графики.

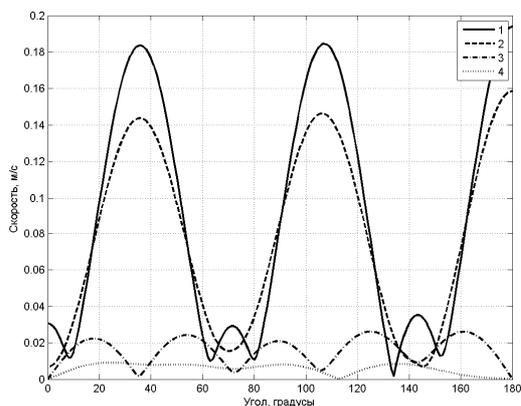


(а)

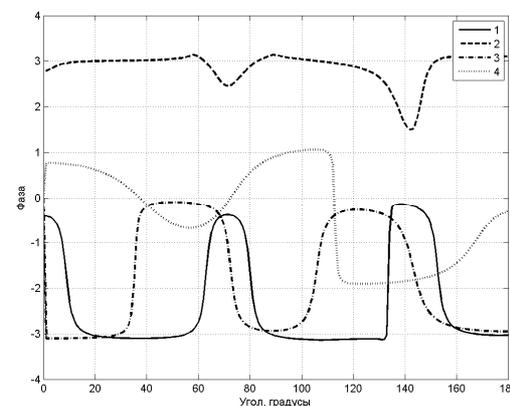


(б)

Рис. 4. Графики угловых распределений амплитуд (а) и фаз (б) радиальных колебательных скоростей антенны с вакуумированным излучателем на частотах дополнительных резонансов в первой и второй областях



(а)



(б)

Рис. 5. Графики угловых распределений амплитуд (а) и фаз (б) радиальных (кривые 1, 2) и окружных (кривые 3, 4) колебательных скоростей антенн с излучателями силовой (кривые 1, 3) и компенсированной (кривые 2, 4) конструкций на частоте пульсирующих колебаний оболочки излучателя

В завершение исследования проанализируем угловые распределения амплитуд и фаз колебательных скоростей антенн как на отдельных модах (рис. 4), так и с учетом всех мод

(рис.5). Анализ кривых рис. 4 позволяет установить ряд интересных фактов. Во-первых, среди энергетически активных мод радиальных колебаний отсутствует осциллирующая мода. Во-

вторых, угловые распределения как амплитуд, так и фаз радиальных скоростей всех мод характеризуются значительной неоднородностью. В-третьих, обращает на себя внимание то, что фазы четных и нечетных мод противоположны. И, наконец, в-четвертых, для всех мод колебаний радиальные скорости в точках поверхности излучателя, примыкающих к акустически мягкому экрану, являются наибольшими по амплитуде. Такой же неоднородностью углового распределения амплитуд и фаз и увеличением амплитуд скорости в точках, примыкающих к экрану, характеризуются и радиальные скорости колебаний антенны с учетом всех мод колебаний (рис. 5). Как уже отмечалось, нарушение радиальной симметрии антенны обуславливает появление не только радиальных но и окружных смещений. Представляется интересным сравнить для одних и тех же условий поведения радиальных и окружных колебательных скоростей антенны, тем более, что такие сравнения в литературе не описывались. Анализ кривых рис. 5 показывает, что амплитуды окружных скоростей существенно меньше амплитуд радиальных скоростей, в то время как угловое распределение их по поверхности излучателя также не однородно. Амплитуды окружных скоростей также возрастают по мере приближения точек поверхности излучателя к экрану. Однако в месте прилегания экрана к поверхности излучателя и в центре открытой поверхности антенны окружные скорости равны нулю. Угловые распределения фаз окружных и радиальных скоростей близки по виду. Расчеты показывают, что увеличение ширины экрана практически не влияет на изучаемые свойства механических полей антенн рассматриваемого типа.

Выводы

Численный анализ свойств механических полей цилиндрической антенны с плоским акустически мягким экраном, расположенным в её диаметральной плоскости, показал, что нарушение радиальной симметрии антенны путем описанного размещения экрана привело к появлению не только радиальных, но и окружных мод колебаний. При этом для радиальных колебаний последующие моды колебаний не только сравнимы, но и существенно превышают по амплитуде скорости колебаний нулевой моды на отдельных частотах. Установлено, что независимо от вида конструктивного исполнения излучателя частоты дополнительных мод и радиальных, и окружных колебаний близки для одной и той же моды и определяются реакцией

внешней среды антенны, а появление самих мод обусловлено эффективным перераспределением энергии, потребляемой антенной на нулевой моде, между последующими формами и радиальных, и окружных колебаний.

Список использованных источников

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973 г. – 277 с.
2. *Дідковський В.С., Порошин С.М., Коржик О.В., Лейко О.Г., Петрищев О.М. Найда С.А.* Акустичні антени. – К.: НТУУ «КПІ», 2014 р. – 244 с.
3. *Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П.* Подводные акустические антенны. – К.: Авантпостприм, 2001 г. – 256 с.
4. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т.* Волновые задачи акустики. – К.: Интерсервис, 2013 г. – 572 с.
5. *Гусак З.Т., Лейко А.Г.* Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из углового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией // *Электроника и связь*. – 2014 г. – №1 с. 102-108.
6. *Гусак З.Т., Лейко А.Г.* Поле излучения угловой рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией // *Электроника и связь*. – 2014 г. – №2. С. 75-81.
7. *Гусак З.Т., Лейко А.Г., Кандрачук И.В., Мельниченко М.А.* Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости // *Электроника и связь*. – 2015 г. - №2. – С.71-78.
8. *Дідковський В.С., Порошин С.М., Лейко О.Г., Лейко А.О., Дрозденко О.І.* Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. Харків: НТУ «ХПІ». 2013 р. – 390 с.
9. *Коржик А.В.* Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // *Акустичний вісник*. – 2009 – Т. 12, – №3 – с. 33-40.
10. *Коржик А.В.* Фазо-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // *Акустичний вісник*. – 2009 – Т. 12, – №4 – с. 29-33.

Поступила в редакцию 10 февраля 2015 г.

УДК 534.232

А.Г. Лейко, д.-р. тех. наук., З.Т. Гусак

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів»,

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

Механічні поля циліндричної гідроакустичної антени з плоским екраном в діаметральній площині

Виконано чисельний аналіз властивостей механічних полів циліндричних антен, утворених з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з окружною поляризацією та плоских акустично м'яких екранів, розташованих в діаметральній площині випромінювачів. Розглянуто випромінювачі силової та компенсованої конструкцій. Порівняльний аналіз властивостей та кутових розподілень радіальних та окружних швидкостей антен дозволив встановити ряд тонких ефектів у формуванні механічних полів антен розглянутого типу в залежності від виду їх конструктивного виконання. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: механічні поля; циліндрична антена з екраном; силова та компенсована конструкція; випромінювач з окружною поляризацією.

UDC 534.232

A. Leiko, Dr.Sc., Z. Gusak

State Enterprise Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,

st. Surikova, 3, Kiyv, 03035, Ukraine.

Mechanical fields of cylindrical sonar antenna with a flat baffle in the diametral plane

The numerical analysis of mechanical properties of the fields of cylindrical antennas formed of cylindrical piezoceramic transmitters with a circumferential polarization and acoustically soft flat baffles, located in the diametral plane of radiators was performed. Considered transmitters of compensated and power structures. Comparative analysis of the frequency characteristics and the angular distributions of the radial and circumferential speeds of antennas allowed to establish a number of subtle effects in the formation of mechanical fields of antennas of this type depending on the type of their design. References 10, figures 5.

Keywords: mechanical fields; cylindrical antenna with baffle; power and compensated design; transducer with circumferential polarization.

References

1. Smaryshev, M. D. (1973). Directivity of hydroacoustic antennas. P. 278 (Rus)
2. Didkovskii, V. S., Poroshyn, S. M., Korzhyk, A. V., Leiko, O. G., Petrishchev, O. M., Naida, S. A. (2014). Acoustic antennas. Kyiv. P. 244. (Ukr)
3. Leyko, O. G., Shamarin, U. E., Tkachenko, V. P. (2000). Underwater acoustic antennas. P. 320. (Ukr)
4. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V., Matsipura, V.T. (2013). Wave problems of acoustic. P 572. (Rus)
5. Gusak, Z. T., Leiko, A. G. (2014). Physical fields of hydroacoustic antenna consisting of the angle of the horn and the piezoceramic transducer with a circumferential polarization. Electronics and Communication. Vol. 19, №1, pp. 102-108. (Rus)
6. Gusak, Z. T., Leiko, A. G. (2014). Radiation field angled horn antenna with a piezoceramic transducer with radial polarization. Electronics and Communication. Vol. 19, №2, pp. 75-81. (Rus)
7. Gusak, Z. T., Leiko, A. G., Kandrachuk, I. V., Melnichenko, M. A. (2015). Radiation field angled horn antenna with a piezoceramic transducer with radial polarization. Electronics and Communication. Vol. 20, №2(85), pp. 71-78. (Rus)
8. Didkovskiy, V. S., Poroshyn, S. M., Leyko, O. G., Leyko, A. O., Drozdenko, O.I. (2013). Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology. Kharkov. P. 390. (Ukr)
9. Korzhik, A.V. (2009). Amplitude-frequency characteristics of some waveforms piezoceramic cylindrical sound receivers at various kinds elektrodirovaniya under bondage. Akustichny visnyk. Vol.12, No 3. pp.33 – 40. (Rus)
10. Korzhik, A.V. (2009). Phase-frequency characteristics of some waveforms piezoceramic cylindrical sound receivers at various kinds elektrodirovaniya under bondage. Akustichny visnyk. Vol.13, No 4. pp.29 – 33. (Rus)