

Акустические приборы и системы

УДК 534.231

А.Г. Лейко, д.-р. тех. наук, **А.И. Нижник**

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

Влияние состава пьезокерамики цилиндрических излучателей на их механические поля при работе в составе планарных антенн

Исследовано влияние на частотные свойства механических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей при работе их в составе планарных антенн такого важного элемента их конструкций как составов пьезокерамики и дана физическая интерпретация выявленных особенностей в их поведении. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: цилиндрический излучатель; планарная антенна; состав пьезокерамики; механические поле.

Введение

При работе гидроакустических планарных антенн в режиме излучения в элементах конструкций их преобразователей образуются механические динамические напряжения. Эти напряжения создаются при колебаниях пьезокерамических элементов излучателей и являются циклически переменными. Величина механических динамических напряжений определяет напряженное состояние пьезокерамических элементов излучателей и является одним из основных факторов, ограничивающих энергетическую эффективность планарных антенн [2].

Она зависит от характеристик режима излучения антенн, уровня неравномерности акустического поля в их ближней зоне, характера колебаний излучателей в составе антенн, параметров их колебательных систем и ряда других факторов. Поэтому исследованию вопросов динамической прочности гидроакустических излучателей посвящено много работ, наиболее полный перечень которых приведен в монографиях [2, 8]. Однако практически все они посвящены изучению динамической прочности одиночных излучателей. В то же время при работе излучателей в составе антенн существенно изменяются условия их работы, поскольку возникает обмен энергией между излучателями в составе антенн и возрастает роль реакции среды на возбуждение в ней акустического поля [7, 1].

Рассмотрению их влияния в плоских антеннах были посвящены работы [4,5]. Целью данной работы является дальнейшее изучение влияния характеристик элементов конструкций колебательных систем излучателей в составе плоских антенн на их механические поля, в частности, использованного в излучателях антенн состава пьезокерамики.

Постановка задачи

Обычно энергетическую эффективность излучающего электроакустического устройства оценивают через удельную акустическую мощность $W_{y\partial}$. Чем больше величина $W_{y\partial}$, – тем большие механические динамические напряжения σ_m , ограничивающие максимальный уровень излучаемой мощности, создаются в активном элементе излучателя. Для механической колебательной системы цилиндрического излучателя эта связь выражается соотношениями [3]:

$$W_{y\partial} = \frac{1}{2} \alpha (\rho c)_{\text{ж}} S W_m; W_m = \frac{\sigma_m}{(\rho c)_k}, \quad (1)$$

где – α безразмерный коэффициент активной составляющей сопротивления излучения преобразователя; $(\rho c)_{\text{ж}}$ и $(\rho c)_k$ – удельные волновые сопротивления среды, в которую излучается звук, и пьезокерамической оболочки излучателя; S – площадь излучающей поверхности преобразователя; W_m – максимальная амплитуда радиальной колебательной скорости. Таким образом, энергетическая эффективность антенн зависит не только от величины колебательной скорости её излучателей, но и от типа образующих конструкции этих излучателей таких ее составляющих как состав используемой пьезокерамики. Если при этом учесть, что амплитуды колебательных скоростей излучателей антенны определяются обменом энергией между ними по акустическому полю, а влияние ре-

акции среды зависит от сравнимости собственных механических импедансов пьезокерамических оболочек излучателей с их импедансами излучения, то становится понятным интерес к установлению зависимостей механических полей излучателей в составе планарной антенны от физических характеристик состава пьезокерамики, образующей конструкции излучателей. Это подтверждают и аналитические соотношения, полученные в работе [6].

Результаты исследований

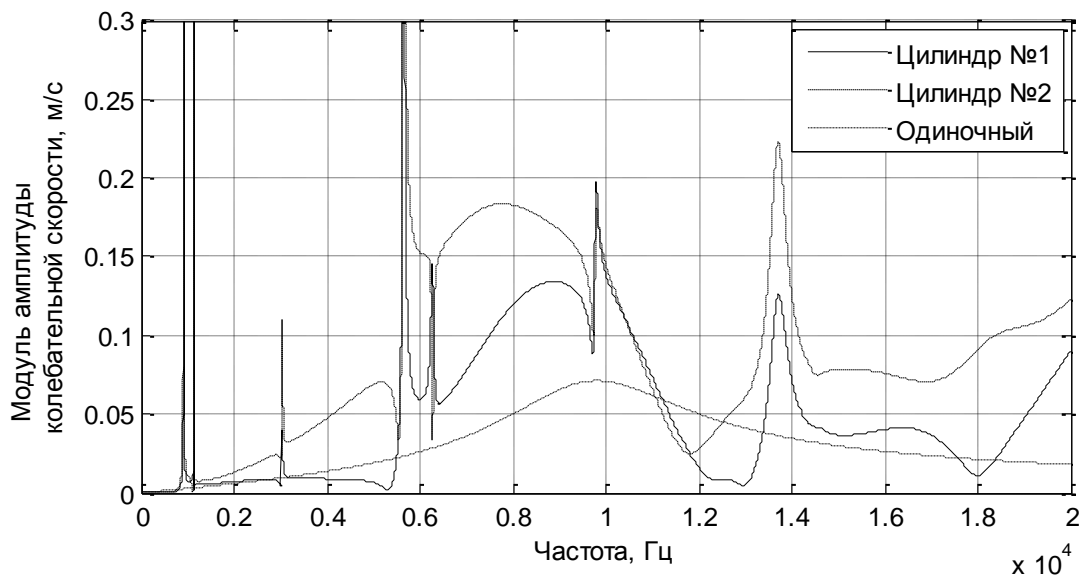
Оценим свойства механических полей планарных антенн, образованных из конечного числа N идентичных цилиндрических излучателей, продольные оси которых расположены на расстоянии l одна от другой.

Все излучатели имеют окружную поляризацию, возбуждаются одинаковым гармоническим сигналом $\psi^{(s)} = \psi_0 e^{-i\omega t}$ для всех $s = 1, \dots, N$, выполнены в виде силовых конструкций, внутреннее полости которых вакуумированы ($\rho_1 c_1 = 0$) или заполнены воздухом при нормальном атмосферном давлении, где ρ_1 и c_1 – плотность и скорость звука сред внутри излучателей. Антенны расположены в среде с плотностью ρ и скоростью звука c .

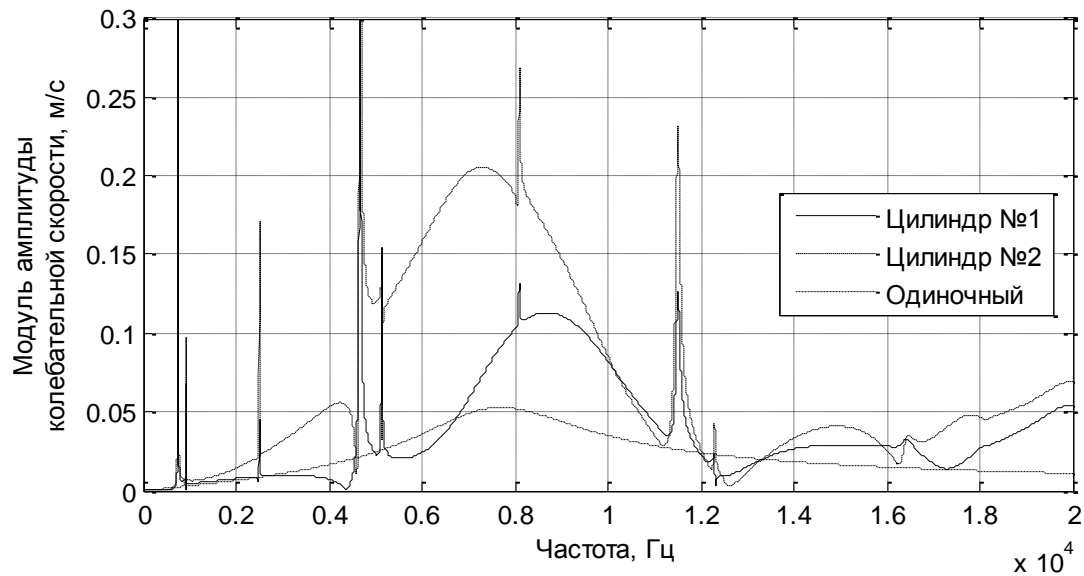
В качестве оцениваемых параметров механических полей рассмотрим частотные зависимости колебательных скоростей излучателей антенн. Расчеты проводились на основе аналитических соотношений, полученных в работе [6]

для следующих параметров антенн и излучателей: количество излучателей в антенне $M=3$ при расстоянии между ними $l = 0,15$ м; средний радиус оболочек излучателей $r_0 = 0,068$ м при толщине стенки $h = 0,008$ м и количестве призм $N = 48$; составы пьезокерамики ТБК-3, ЦТБС-3 и ЦТС-19; параметры воздуха и воды соответственно $\rho_1 = 1,27 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 340 \text{ м/с}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1500 \text{ м/с}$. Напряжение возбуждения излучателей $\psi_0 = 200 \text{ В}$.

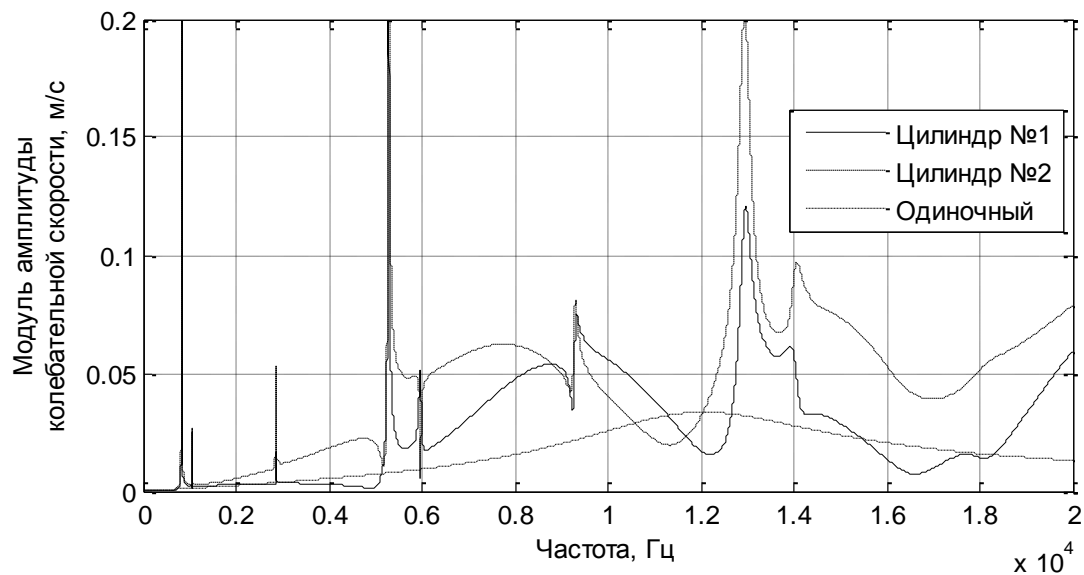
Анализ полученных численных результатов позволил установить следующее. Для всех составов пьезокерамики размещение излучателей в составе планарной антенны обуславливает, во-первых, существенное изменение их частотных зависимостей амплитуд скоростей по сравнению с одиночным излучателем (рис. 1). Во-вторых, указанные изменения зависят от места размещения излучателя в антенне. В-третьих, эти изменения при прочих равных условиях зависят от состава использованной в излучателях пьезокерамики. И, в-четвертых, значительное влияние на эти изменения оказывает выбор диапазона рассматриваемых частот. Физическими причинами этих изменений являются возникновение в антенне явления многократного обмена энергиями между её излучателями в процессе их работы по звуковому полю и частотная зависимость реакции окружающих излучателей сред на возбуждение в них акустических полей.



а)



б)



в)

Рис. 1. Частотные зависимости амплитуд радиальных скоростей центров открытых поверхностей вакуумированных излучателей в составе (кр. 1,2) и вне (кр. 3) антенны при разных составах пьезокерамики излучателей: ЦТБС-3 (а), ЦТС-19 (б), ТБК-3 (в)

Влияние явления многократного обмена энергиями на физические поля излучателей в антенне зависит от количества излучателей в антенне, расстояния между ними, места их расположения, геометрических и физических параметров излучателей. Последние, в свою очередь, определяются свойствами составов пьезокерамики.

Реакция сред зависит от соотношения величин импедансов излучателей – собственного механического и импеданса излучения. Соб-

ственный механический импеданс излучателя определяется составом использованной в нем пьезокерамики. Импеданс излучения излучателя в составе антенны содержит две составляющие – собственный импеданс, равный импедансу излучения одиночного излучателя, и взаимный импеданс излучения, обусловленный воздействием на излучатель звуковых полей других излучателей антенны.

Изложенные физические причины объясняют существенные различия в частотных зави-

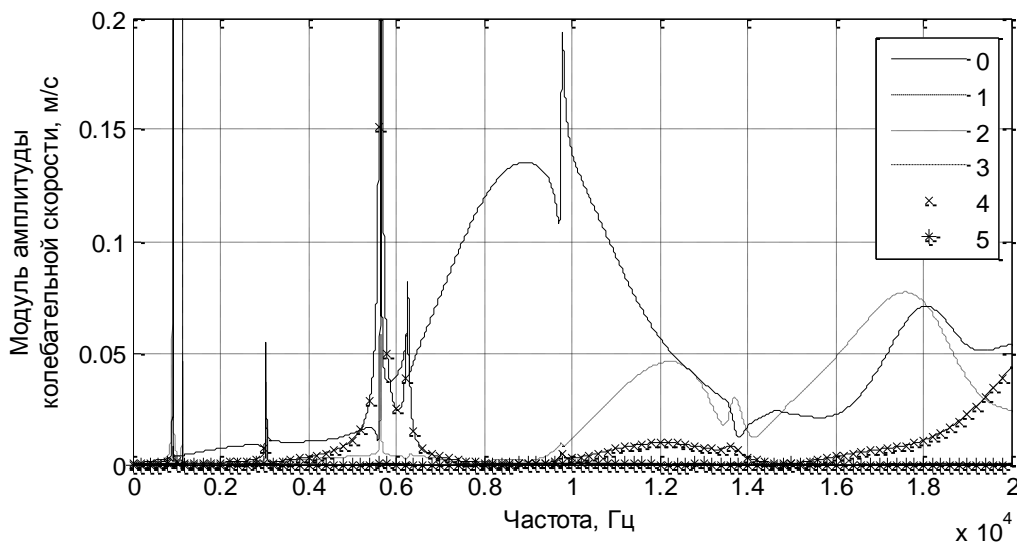
симостях колебательных скоростей всех излучателей антенны по сравнению с одиночным излучателем, излучателей антенны между собой и одних и тех же излучателей в различных частотных диапазонах (рис. 1).

Действительно, в области низких частот с понижением частоты собственное механическое сопротивление пьезокерамических излучателей, которое имеет упругий характер, быстро возрастает. В то же время их волновые размеры уменьшаются, следствием чего является снижение импеданса излучения. Поэтому роль эффекта взаимодействия излучателей по акустическому полю является низкой и колебательные скорости излучателей определяются их собственными механическими импедансами. В области высоких частот собственный механический импеданс излучателей имеет инерционный характер и с ростом частоты увеличивается. Поэтому их колебательные скорости уменьшаются и выравниваются для разных излучателей антенны при одинаковых составах их пьезокерамики. В резонансной области собственные механические импедансы излучателей сопоставимы по величине с их импедансами излучения. Поэтому в этой области и реакция сред, и взаимодействие излучателей по акустическому полю приобретают существенную роль. Следствием этого является существенное отличие механических полей излучателей антенны между собой.

Анализ кривых рис. 1 позволяет выделить ещё одну особенность механических полей излучателей антенны. Она состоит в появлении ряда резонансных всплесков колебательных скоростей излучателей как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях. При этом их амплитуды сравнимы или даже превышают ам-

плитуды колебательных скоростей излучателей в области основного резонанса их пьезокерамических оболочек, являются разными для разных излучателей антенны, но с близкими резонансными частотами. И такая тенденция имеет место для излучателей в антенне при разных составах образующей их пьезокерамики.

Объяснения причин такого поведения частотных зависимостей могут быть установлены путем анализа кривых рис. 2. Из физических соображений ясно, что при работе одиночного излучателя радиационная нагрузка на него со стороны среды является радиально симметричной и при выбранном способе электрического нагружения в нем возбуждается только одна собственная форма колебаний и имеет место один резонанс излучателя. Работа излучателей в антенне приводит к нарушению радиальной симметрии радиационной нагрузки излучателей. В количественном отношении величина этих нарушений будет зависеть от места расположения излучателя в плоской антенне, от величины расстояния между элементами антенны и от состава пьезокерамики излучателей. В излучателях с нарушенной симметрией, как видно из графиков рис. 2, появляются последующие моды колебаний, сравнимые по амплитуде с нулевой модой. Это означает, что при этом происходит эффективное перераспределение энергии, «закачиваемой» в каждый излучатель антенны на нулевой моде, между последующими формами колебаний. В количественном отношении это перераспределение энергии при прочих равных условиях существенно зависит от электрофизических свойств составов пьезокерамики излучателей. При этом изменяются не только соотношения между амплитудами мод колебаний, но и резонансные частоты этих мод.



а)

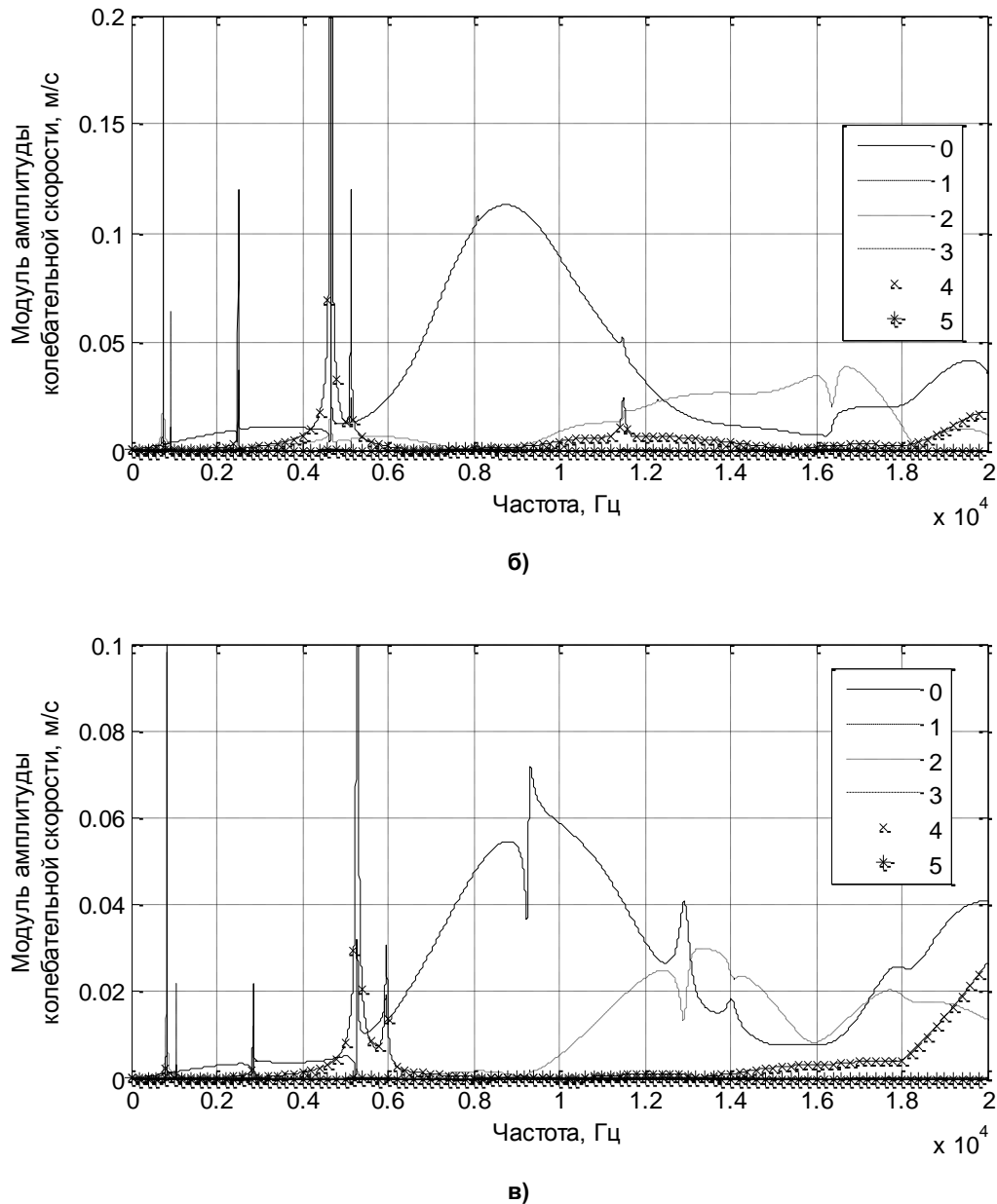


Рис. 2. Частотные зависимости амплитуд мод радиальных скоростей центров открытых поверхностей крайних излучателей антенн при разных составах пьезокерамики излучателей: ЦТБС-3 (а), ЦТС-19 (б), ТБК-3 (в)

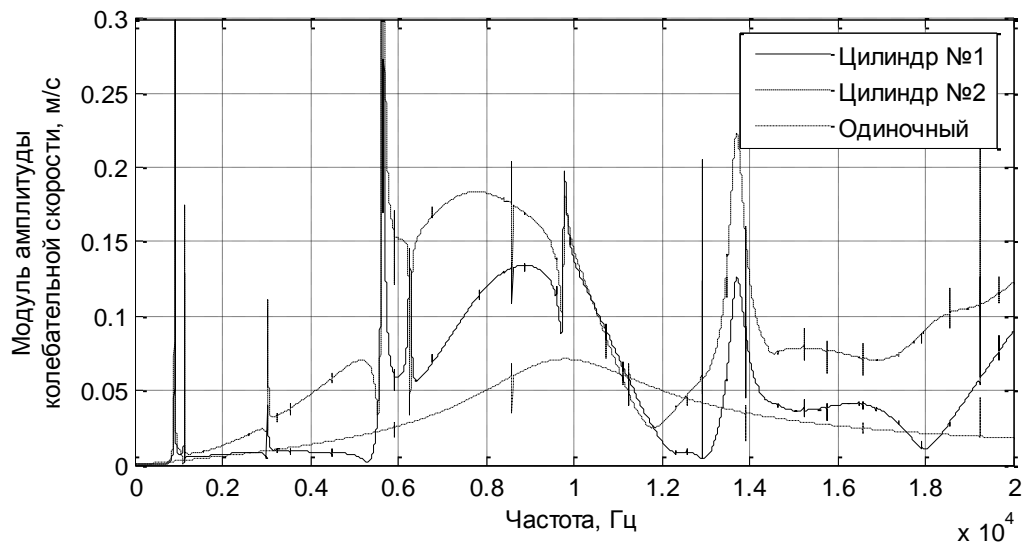
Сопоставление между собой кривых рис. 1 и 2 для одних и тех же излучателей позволяет сделать вывод о том, что расширение и обогащение спектра резонансных частот излучателей в составе антенны является результатом проявления в них собственных резонансов отдельных, вновь образовавшихся из энергии возбуждаемой нулевой моды, новых дополнительных мод колебаний соответствующих излучателей антенны. Так, например, в антенне, образованной из излучателей состава ЦТС-19, резонансные частоты в низкочастотной области крайних излучателей (рис. 1,в) определяются, соответ-

ственно 1, 2 и 3 модами колебаний (рис. 2). Для средних излучателей антенны проявления мод в частотной зависимости их механического поля будут другими. Подобное влияние дополнительных образовавшихся более высоких мод колебаний на частотные характеристики механических полей излучателей в планарной антенне будет иметь место и при других составах пьезокерамики излучателей.

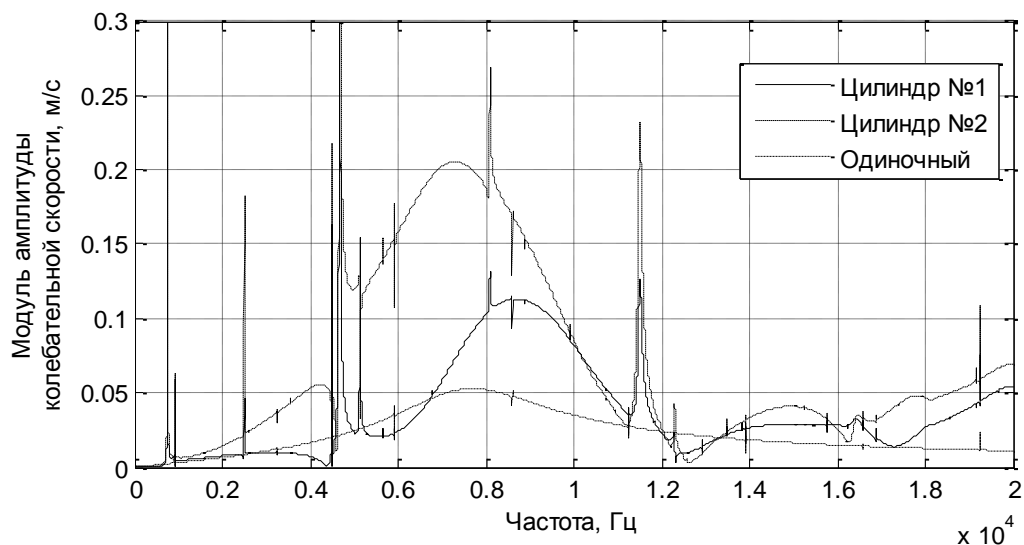
До сих пор рассматривался вариант конструктивного исполнения антенны с вакуумированными излучателями. К силовым конструкциям излучателей относятся также и конструкции,

внутренние объемы которых заполнены воздухом. Являясь упругой средой, в которой также возникает акустическое поле, воздушные полости излучателей принимают активное участие в формировании физических полей антенны. Анализ кривых рис. 3 показывает, что при всех составах пьезокерамики заполнение воздухом излучателей антенны сопровождается даль-

нейшим расширением и обогащением спектра резонансных частот антенны. Однако в отличие от дополнительных резонансов, обусловленных появлением новых мод колебаний, резонансы внутренних воздушных полостей излучателей являются более узкополосными и в зависимости от состава пьезокерамики имеют различные резонансные частоты и амплитуды.



а)



б)

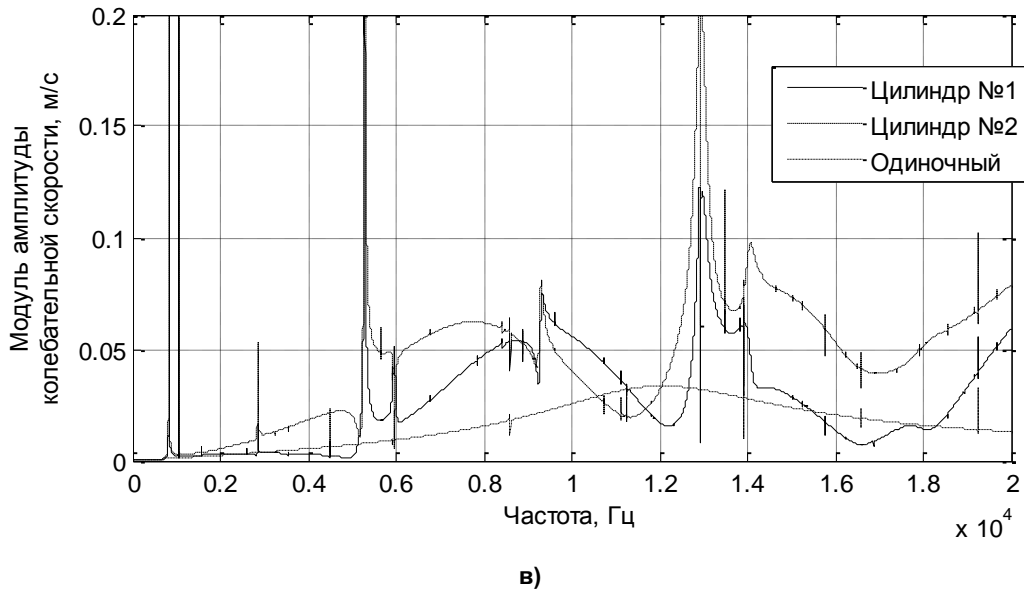
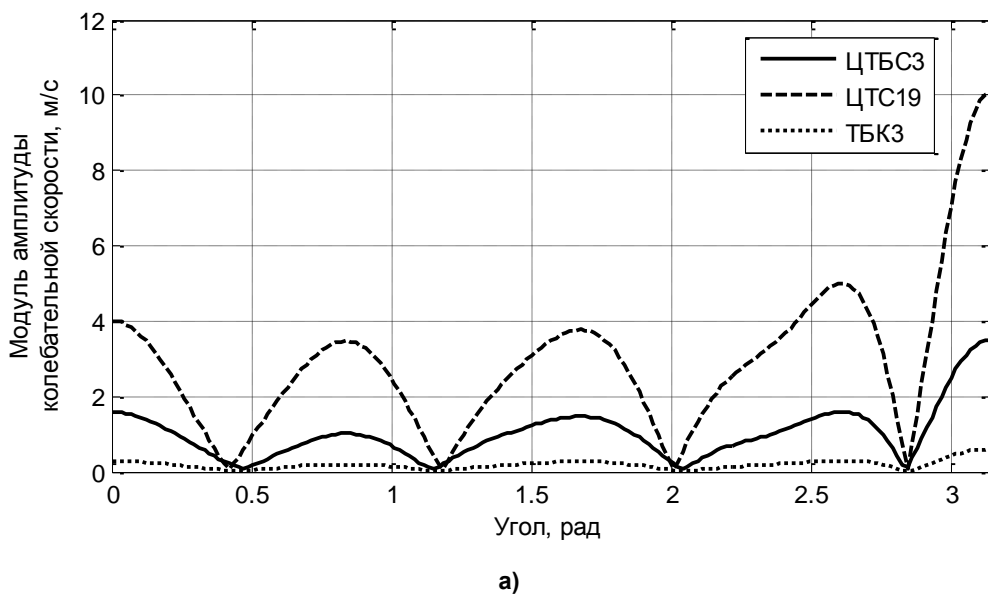


Рис. 3 Частотные зависимости амплитуд радиальных скоростей центров открытых поверхностей заполненных воздухом излучателей в составе антенны при разных составах пьезокерамики излучателей: ЦТБС-3 (а), ЦТС-19 (б), ТБК-3 (в)

Анализируя полученные (рис. 1-3) результаты, обращает на себя внимание тот факт, что размещение цилиндрического пьезокерамического излучателя, в конструкции которого использован любой состав пьезокерамики, в составе планарной антенны приводит, во-первых, к появлению ряда дополнительных резонансов колебательной скорости, амплитуды которых значительно (иногда в несколько раз) превышают максимальную амплитуду колебательной скорости одиночного излучателя, и, во-вторых, эти максимальные амплитуды имеют разную

величину, в зависимости от места расположения излучателя в антенне и состава использованной пьезокерамики.

Приведенные частотные зависимости рассчитывались для центральных точек на открытой поверхности излучателей антенны. Представляет интерес сравнительная оценка углового распределения колебательных скоростей поверхностей излучателей в зависимости от состава использованной в них пьезокерамики, например, на частотах с максимальными уровнями этих скоростей, приведенными на рис. 1.



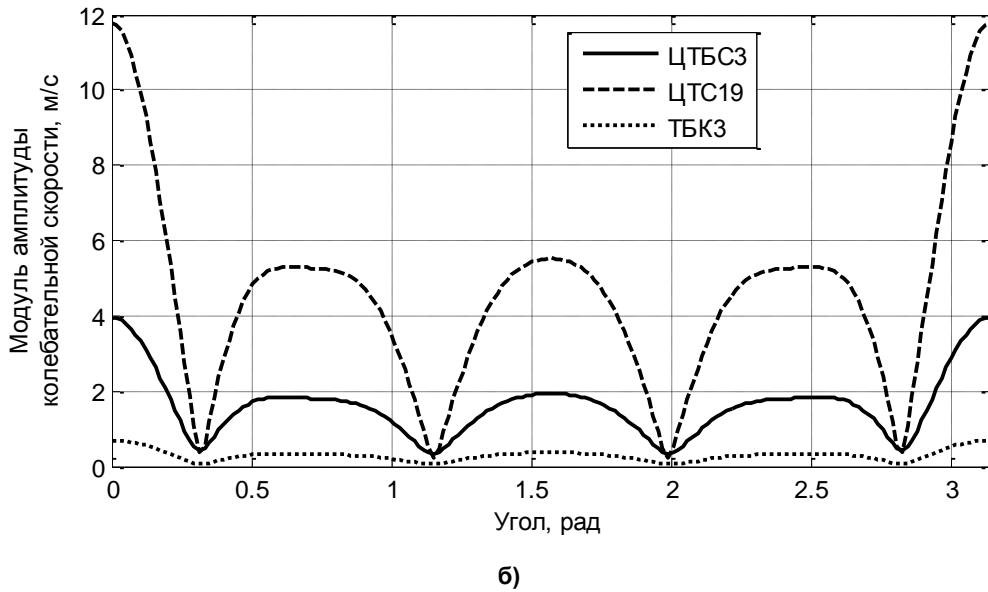


Рис. 4. Угловые зависимости колебательных скоростей на поверхности крайнего $s=3$ (а) и среднего $s=2$ (б) излучателей в составе антенны на частотах f максимальных значений их амплитуд скоростей для излучателей с разными составами пьезокерамики: ЦТБС-3 (а), ЦТС-19 (б), ТБК-3 (в)

Анализ графиков на рис. 4 позволяет выделить в них несколько особенностей. Во-первых, угловая неоднородность колебательных скоростей различна для антенн с излучателями, образованными из разных составов пьезокерамики. Наибольшей неоднородностью характеризуются излучатели с пьезокерамикой системы ЦТС. Во-вторых, центральные излучатели имеют симметрию распределений колебательных скоростей относительно осей O_2X_2 и O_2Y_2 [6], а крайние – только относительно оси OX и зеркально симметричные относительно оси OY . В-третьих, максимальные значения колебательных скоростей излучателей приходятся на точки, размещенные на оси OX со сторон поверхностей излучателей, противоположащих друг другу. Это значит, что максимальные механические динамические напряжения в излучателях вырастут по сравнению с рассчитанными в соответствии с кривыми на рис. 1 по-разному в зависимости от использованного состава пьезокерамики – от приблизительно 1,3 раза для состава ТБК-3 и до 3 раз для состава ЦТБС-3. И, в-четвертых, наибольшие значения колебательных скоростей, следовательно, и механических динамических напряжений при одних и тех же питающих электрических напряжениях среди рассмотренных составов пьезокерамики имеют излучатели, образованные из состава ЦТБС-3.

Выводы

Изучено влияние на механические поля цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции в составе планарных антенн такого важного элемента их конструкций как состав использованной пьезокерамики. Установлено, что эффект перераспределения энергии, «закачиваемой» в излучатели на нулевой моде, между более высокими модами в планарной антенне сохраняется при любом составе пьезокерамики её излучателей. Изменяется только эффективность перераспределения этой энергии между этими последующими формами колебаний. В частности, составы пьезокерамики системы ЦТС-19 более эффективно перекачивают механическую энергию в область частот, более низкую чем резонансная частота одиночного излучателя, по сравнению с составами системы ТБК-3.

Список использованных источников

1. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Волновые задачи акустики. – К.: Интерсервис, 2013. – 572 с.
2. Дідковський В. С., Порошин С. М., Лейко О. Г., Лейко А. О., Дрозденко О.І. Констрування електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. – Харків: 2013 р. – 390 с.

3. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Савін В. Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі. – Кіровоград: Имекс-ЛТД, 2006 р. – 448 с.
4. Кандрачук И.В., Лейко О.Г., Нижник А.И., Механические поля цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции, образующих планарные гидроакустические антенны// Электроника и связь. – 2015. – №6 – С.– 42–50.
5. Коржик О.В. Випромінення звуку циліндричним електропружним джерелом нульового порядку, яке розміщено в замкненому пружному шарі// Електроника и связь. – 2012. – №5 – С.– 30–35.
6. Лейко А.Г., Нижник А.И. Физические поля планарных гидроакустических антенн, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей// Электроника и связь. – 2015. – №2 – С.– 100–106.
7. Лейко. А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводная электроакустическая аппаратура и устройства. Т.1. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей. – Киев, 2000. – 320 с.
8. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.

Поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

УДК 534.231

О.Г. Лейко, д.-р. тех. наук, **О.І. Нижник**

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури»,
вул. Сурикова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

Вплив складу п'єзокераміки циліндричних випромінювачів на їх механічні поля при роботі у складі планарних антен

Досліджено вплив на частотні властивості механічних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів при роботі їх у складі планарних антен такого важливого елемента їх конструкцій, як складу п'єзокераміки і дана фізична інтерпретація особливостей в їх поведінці.

Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: циліндричний випромінювач; планарна антена; склад п'єзокераміки; механічне поле.

UDC 534.231

A. Leiko, Dr.Sc., **O. Nyzhnyk**

State Enterprise Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,
st. Surikova, 3, Kiev, 03035, Ukraine.

Influence of the composition of the piezoceramic cylindrical emitters on their mechanical field when working as part of the planar antenna

The effect on the frequency properties of the mechanical fields of cylindrical piezoceramic radiators when they work as a part of the planar antennas such an important element of their designs as the piezoceramic compositions studied and the physical interpretation of the identified features in their behavior given. References 8, figures 4.

Keywords: cylindrical emitter; planar antenna; piezoelectric ceramics; mechanical field.

References

1. Grinchenko, V. T., Vovk, I. V., Matcipura, V. T. (2013). The wave tasks of the acoustics. Kyiv. P. 572. (Rus)
2. Didkovskij, V. S., Poroshin, S. M., Lejko, O. G., Lejko, A. O., Drozdenko, O. I. (2013). Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology. Kharkov. P. 390. (Ukr)
3. Didkovskij, V. S., Lejko, O. G., Savin, V. G. (2006). Electroacoustic piezoceramics transducers. Kirovograd. P. 448. (Ukr)

4. *Kandrachuk, I. V., Leiko, O. G., Nyzhnyk, O. I.* (2015). Mechanical fields of cylindrical piezoceramic emitters with power design wick used in construction of planar sonars. *Electronics and Communication*. №6. pp. 42-50. (Rus)
5. *Korzhik, O. V.* (2012). Sound radiation of the cylindrical electroelastic zero order source, which is placed in a closed elastic layer. *Electronics and Communication*. №5. pp. 30-35. (Ukr)
6. *Leiko, A. G., Nyzhnyk, A. I.* (2015). Physical fields of planar sonars which consists of cylindrical piezoceramic emitters. *Electronics and Communication*. №2. pp. 100-106. (Rus)
7. *Lejko, O. G., Shamarin, Y. E., Tkachenko, V. P.* (2000). Underwater electroacoustic equipment and devices. Vol. 1. Underwater sonars. Sound fields computing methods. Kiev, P. 320. (Rus)
8. *Directory.* (1983). Underwater electroacoustic transducers. Leningrad, P. 248.