

Акустические приборы и системы

УДК 534.231

А.Г. Лейко, д. - р., техн. наук., А.И. Нижник, И.В. Кандрачук, канд. техн. наук

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

Механические поля цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции, образующих планарные гидроакустические антенны

Методом связанных полей в многосвязных областях решена задача излучения звука планарной антенной решеткой, образованной из цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции с окружной поляризацией. Проведен анализ численных характеристик физических полей, возникающих в процессе работы антенны. Приведены графики частотных зависимостей смещений и колебательных скоростей поверхностей излучателей в составе решетки. Рассмотрены частотные зависимости как излучения в целом, так и составляющих его мод. Библ. 4, рис. 4.

Ключевые слова: физические поля; антенная решетка; цилиндрический пьезокерамический излучатель; силовая конструкция; метод связанных областей.

Введение

В классической постановке задач об излучении звука системами колеблющихся тел обычно исходят из допущения о том, что нормальные составляющие колебательных скоростей на поверхностях излучателей заданы [1]. Однако при такой постановке принципиально исключается возможность учета изменения этих колебательных скоростей за счет реакции окружающей среды и акустического взаимодействия между излучателями системы. Такой упрощенный подход может быть оправдан только в тех случаях если излучатели системы разнесены на значительные расстояния друг от друга или их собственные механические импедансы существенно превышают импедансы излучения. Однако, при построении систем излучателей такие условия не представляют какого-либо интереса, поскольку реальные колебательные скорости излучателей в антенных решетках будут определяться уровнем подводимой к каждому излучателю энергии, значением частоты излучения и другими характеристиками и, в общем случае, могут существенно отличаться между собой,

особенно, если их собственные резонансные частоты попадают в диапазон используемых частот. Изложенные эффекты могут существенно отразиться на энергетической эффективности рассматриваемых антенных решеток и затруднить согласование их излучателей с возбуждающими антенны генераторами. Действительно, значительные отличия колебательных скоростей излучателей не позволяют в полной мере реализовать потенциальные возможности планарных антенных решеток по излучаемой мощности, поскольку возникающие при этом в материале излучателей уровни механических напряжений пропорциональны величинам колебательных скоростей и всегда существует предельно допустимая колебательная скорость, выше которой наступает механическое разрушение конструкции излучателей.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования механических полей планарных антенных решеток. При этом остановимся на практически интересном случае, когда все излучатели решетки возбуждаются либо от одного генератора, либо каждый излучатель «запитывается» от своего генератора, но возбуждающие напряжения одинаковы для всех излучателей.

Результаты исследований

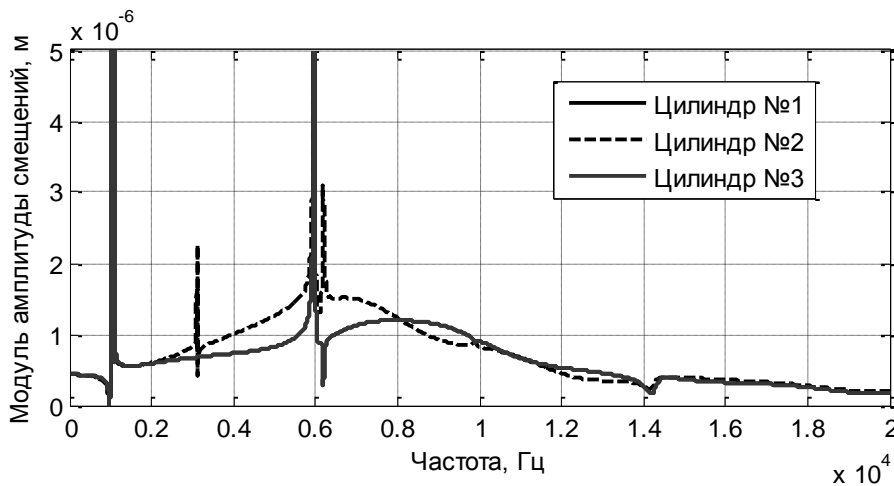
Изучим свойства механических полей излучателей планарных антенных решеток, электрически возбуждаемых описанным выше образом. Решетки образованы из конечного числа N идентичных круговых излучателей, продольные оси которых расположены на расстоянии l один от другого. Все излучатели имеют окружную поляризацию и возбуждаются одинаковым гармоническим сигналом $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$. Антенные решетки расположены в среде с плотностью ρ и скоростью звука c , а их излучатели, выполненные в виде силовых конструкций, внутренние

полости которых вакуумированы ($\rho_1 c_1 = 0$) или заполнены воздухом ($\rho_1 c_1 = 424$), где ρ - плотность и скорость звука сред внутри излучателей.

В составе свойств механических полей рассмотрим зависимости амплитуд смещений поверхностей излучателей и фаз колебательных скоростей излучателей в составе решеток от параметров излучателей и решеток, частоты возбуждения и углового положения точек на поверхности излучателей. Расчеты численных характеристик механических полей проводились с использованием аналитических соотношений, полученных в работе [3], для тех же параметров излучателей, которые были выбраны в работе [4]. При построении излучателей антенн в качестве пьезокерамики использовался состав ЦТБС-3 с параметрами: плотность $\rho_k = 7210 \text{ кг/м}^3$; пьезомодуль $d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$; модуль упругости $C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Средний радиус обложки принимался равным $r_0 = 0,068 \text{ м}$; при толщине стенки $h = 0.008 \text{ м}$ и количестве призм $n=48$. Расстояние между продольными осями излучателей выбиралось равным $0,15 \text{ м}$ и $0,25 \text{ м}$, при их количестве $N=3$ и $N=5$. Параметры

воздуха и воды составляли, соответственно, $\rho_1 = 1,27 \text{ кг/м}^3$ $c_1 = 330 \text{ м/с}$ и $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ $c = 1500 \text{ м/с}$. Величина напряжения возбуждения выбиралась равной $\psi_0 = 200 \text{ В}$. Количество комплексных неизвестных, удерживаемых в фактически решаемой алгебраической системе, составляло 21. Проверка качества выполнения граничных условий и условий сопряжения на границах областей показала, что при указанном количестве удерживаемых неизвестных невязка компонент поля не превышала 3%.

Проанализируем полученные численные результаты. Анализ кривых рис.1 свидетельствует о нарушении радиальной симметрии излучателей при работе их в составе планарной антенной решетки. Физической причиной этого нарушения является взаимодействие излучателей в решетке по звуковому полю. При этом кроме радиальных смещений поверхностей излучателя возникают и тангенциальные смещения. Частотные зависимости и радиальных, и тангенциальных смещений отличаются крайней неоднородностью, а амплитуды последних в 2-10 раз меньше, чем амплитуд радиальных смещений.



а)

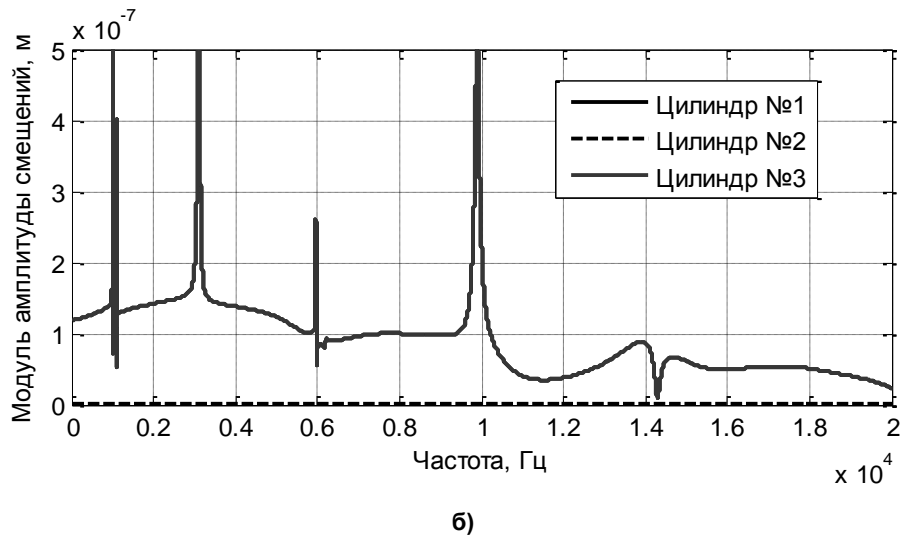
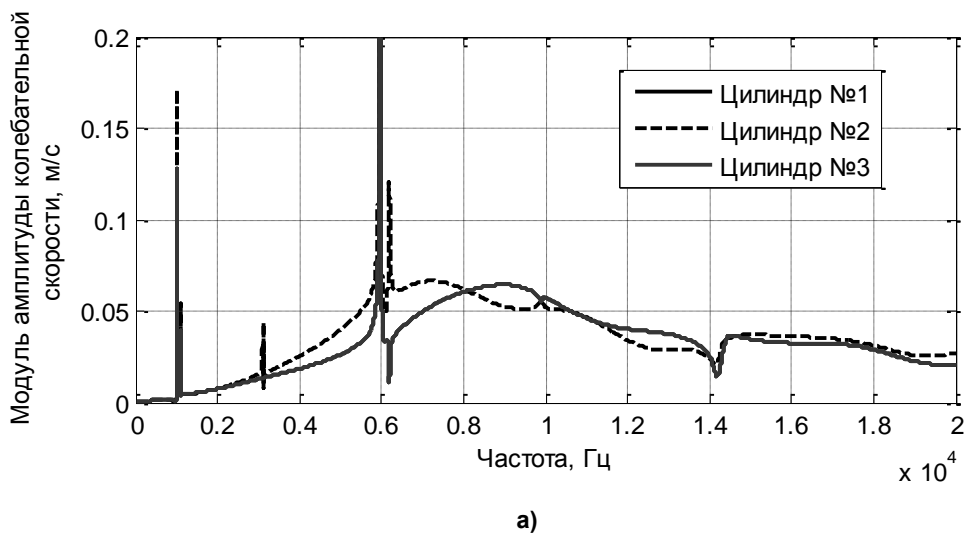


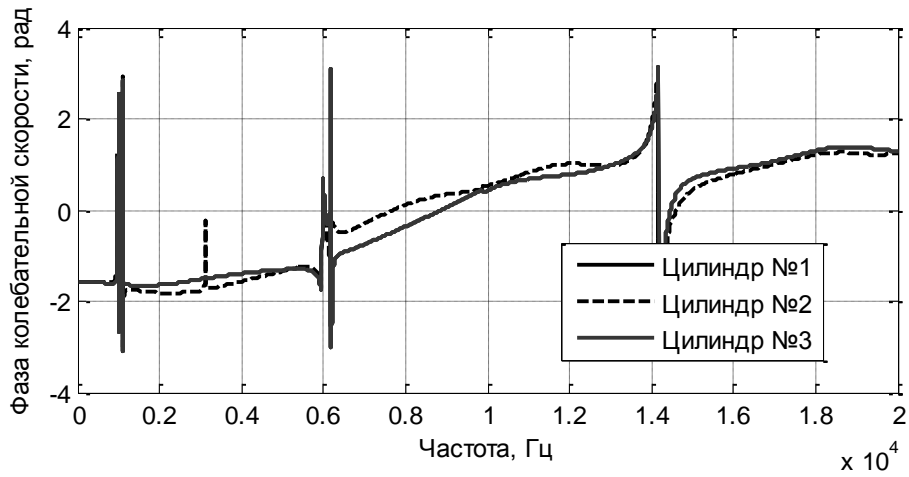
Рис. 1. Частотные зависимости амплитуд радиальных (а) и тангенциальных (б) смещений поверхностей отдельных вакуумированных излучателей трехэлементной решетки при $\varphi = 0$ и $l = 0,15$ м

Анализ частотных зависимостей амплитуд и фаз радиальных колебательных скоростей в составе планарной решетки (рис. 2) показывает, что в них можно выделить три области: первую – низкочастотную область $f < 7 \cdot 10^3$ Гц, вторую – резонансную область $7 \cdot 10^3 < f < 11 \cdot 10^3$ Гц и

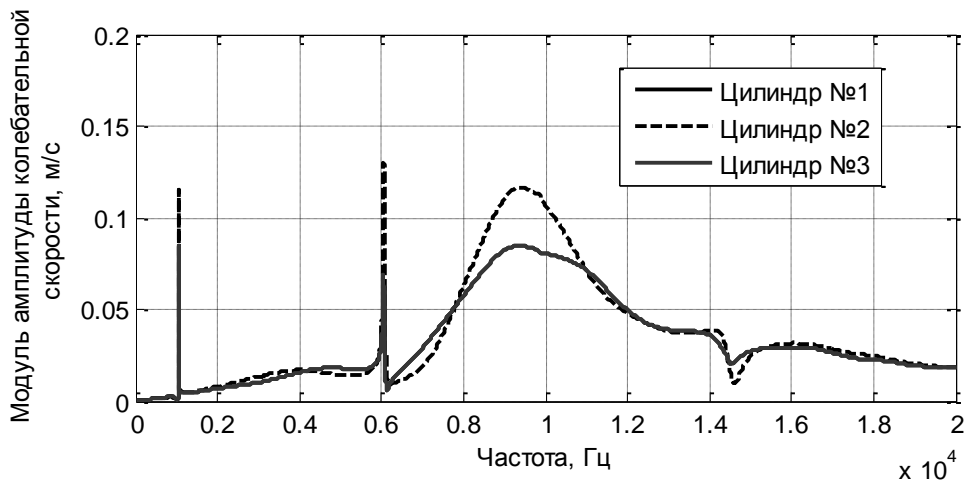
третью – высокочастотную область $f > 11 \cdot 10^3$.

Как следует из рассмотрения результатов первой области, колебательные скорости всех излучателей достаточно быстро понижаются с уменьшением частоты и их величины становятся одинаковыми для всех излучателей решетки.

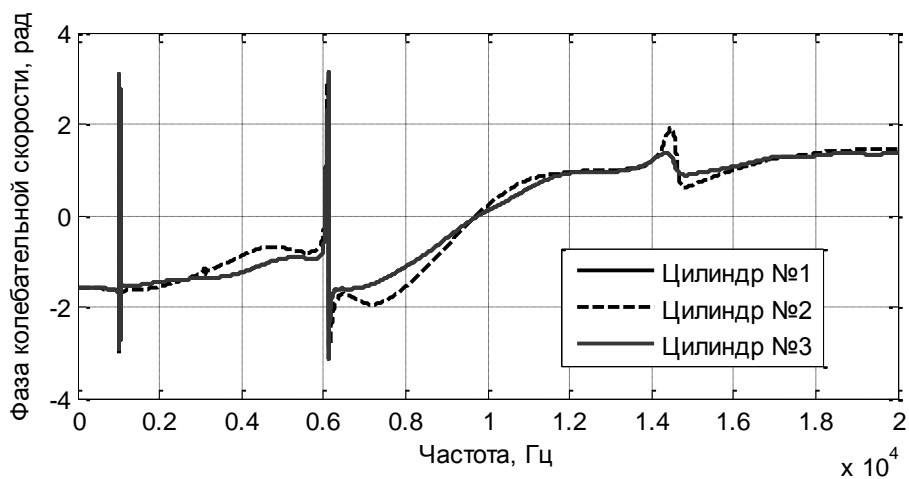




б)



в)



г)

Рис. 2. Частотные зависимости амплитуды (а, в) и фазы (б, г) радиальных колебательных скоростей вакуумированных излучателей трехэлементной планарной решетки при различном удалении излучателей друг от друга $l = 0,15 м$ (а, б), $l = 0,25 м$ (в, г)

Этот факт является прогнозируемым и связан с тем, что с понижением частоты быстро растет собственный механический импеданс пьезокерамических оболочек излучателей, который в этой области имеет упругий характер, а их импедансы излучения падают в связи с тем, что волновые диаметры излучателей уменьшаются. Поэтому роль эффекта взаимодействия излучателей в решетке по звуковому полю является незначительной и колебательные скорости полностью определяются собственными

механическими импедансами оболочек излучателей. Неожиданным для этой области является появление ряда узкополосных низкочастотных резонансов, мало отличающихся для разных излучателей решетки с одинаковым расстоянием l между ними. Для того чтобы понять физические причины такого поведения механического поля планарной решетки, изучим частотные зависимости первых шести мод радиальных скоростей излучателей решетки (рис. 3).

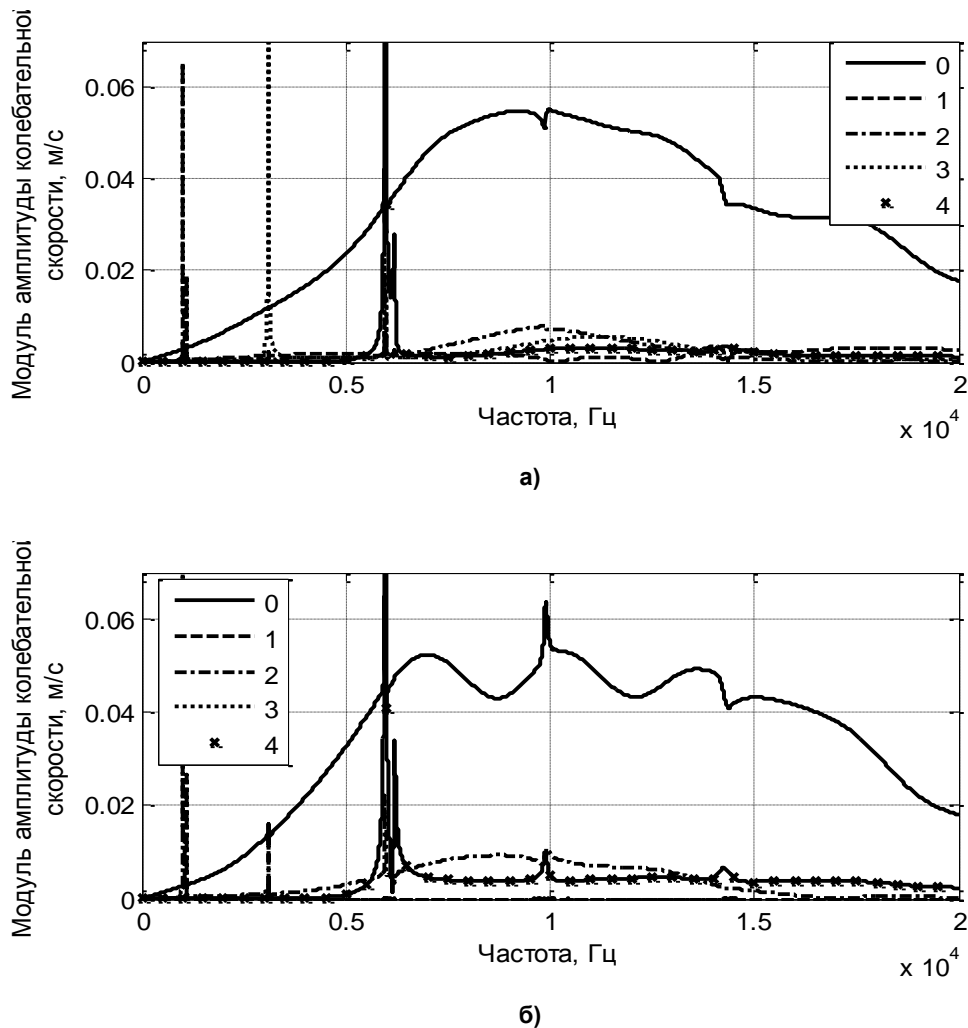


Рис. 3. Частотные зависимости амплитуд первых шести мод радиальных колебательных скоростей первого (а) и второго (б) вакуумированных излучателей трехэлементной решетки при $l = 0,15 м$

Их анализ показывает, что в рассматриваемой планарной решетке при выбранном способе электрического нагружения на нулевой моде радиальных колебаний излучателей происходит нарушение радиальной симметрии излучателей. В связи с этим в системе с нарушенной

симметрией появляются последующие моды колебаний, сравнимые или даже превышающие амплитуды пульсирующей моды.

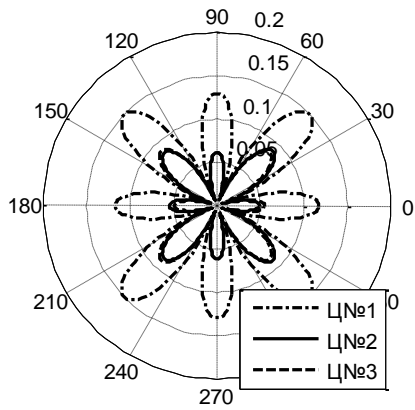
Это значит, что в данных случаях происходит эффективное перераспределение энергии «закачиваемой» в излучатели решетки на пуль-

сирующей моде их колебаний, между последующими формами колебаний. При этом соотношение между амплитудами колебательных скоростей всех имеющих место мод колебаний излучателей зависит от расстояния между излучателями в решетке, места расположения их в решетке и числа излучателей в ней (рис. 3). Чем ближе излучатели расположены друг к другу в решетке, тем больше амплитуды модовых колебательных скоростей они имеют (рис. 3, а и б), в том числе и на более высоких номерах мод. При малых расстояниях между излучателями в планарной решетке наборы мод колебаний, хотя и с разными амплитудами колебательных скоростей близких как для срединных, так и для крайних излучателей решеток. По мере увеличения расстояния между излучателями в решетке количество мод, возбуждаемых в срединных излучателях планарных решеток, уменьшается (рис. 2,б, 3,б).

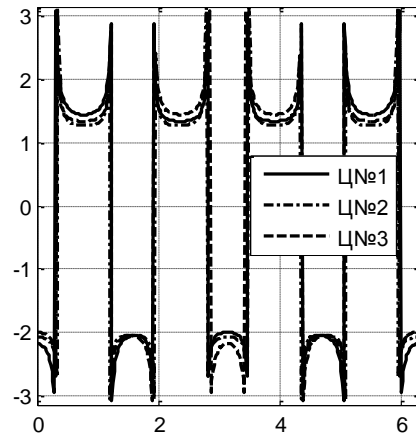
Как известно [1], при связанных продольно-изгибных колебаниях цилиндрических оболочек для каждой формы колебаний существует две собственные частоты, соответствующие принципиально разным напряженно-деформированным состоянием оболочек и принадлежащих двум ветвям решений дисперсионного уравнения – низкочастотной и высокочастотной. Для низкочастотной ветви $\omega \gg u$ (рис. 1), и тангенциальные напряжения в срединной поверхности оболочек малы. Высокочастотная ветвь отвечает состоянием со значительными тангенциальными напряжениями вдоль срединной поверхности. Частоты, принадлежащие верхней ветви, лежат выше частоты пульсирующего резонанса. Для низкочастотной ветви при выбранном значении h/r_0 в изучаемом диапазоне лежит несколько собственных частот, причем для всех частот механический импеданс пьезокерамической оболочки имеет характер массы. Именно взаимодействие массы оболочки каждого излучателя решетки, присоединенной массы внешней жидкости и слоев жидкости между оболочками излучателей решетки, выступающих на этих частотах, как упругость, и создает предпосылки для появления у

планарной решетки специфических резонансов с относительно низкой частотой. Эти частоты отсутствуют в спектре собственных частот оболочек излучателей в вакууме.

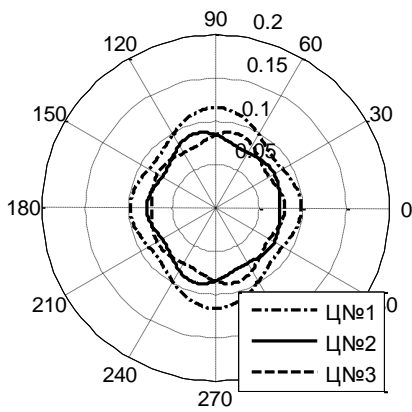
Анализ результатов расчетов в третьей высокочастотной области показывает, что на высоких частотах амплитуды колебательных скоростей излучателей решетки уменьшаются с ростом частоты и так же, как и для первой области, наблюдается тенденция к выравниванию скоростей различных излучателей решетки. При этом уменьшение колебательных скоростей излучателей решетки обусловлено увеличением их собственных механических импедансов, которые в этой области носят инерционный характер. Выравнивание же идет более медленно, чем в первой области, поскольку действительная часть импеданса излучения с частотой возрастает, а взаимодействие излучателей по звуковому полю также усиливается. Наиболее интересной является резонансная область. В этой области собственные механические импедансы излучателей сравнимы с их импедансами излучения, а реакция среды на возбуждение звукового поля и обмен энергией по звуковому полю между излучателями решетки играют более существенную роль. Анализ кривых рис. 2,а и 3,а показывает, что в этой области амплитуды радиальных колебательных скоростей излучателей на одной и той же частоте могут отличаться в 2-5 раз, а значения частот, где фазовые характеристики переходят через ноль (рис. 2,б, 3,б), у всех излучателей решетки разные. Например, фазовые характеристики крайних излучателей три раза пересекают ось частот, что свидетельствует о многократной смене характера их полного механического импеданса с упругого на инерционный и обратно. Поскольку частоты, где фазовая характеристика пересекает частотную ось, являются собственными частотами системы «планарная решетка – окружающая среда», можно сделать вывод о том, что взаимодействие в решетке излучателей по звуковому полю приводит к расширению и обогащению спектров собственных частот излучателей в составе планарных решеток.



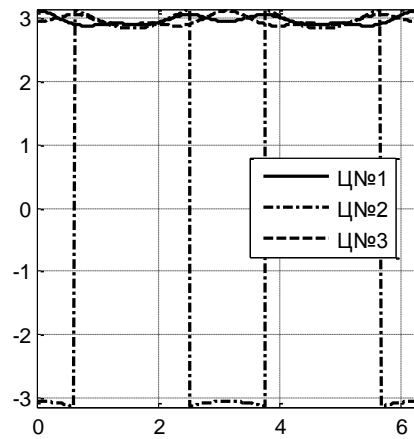
а)



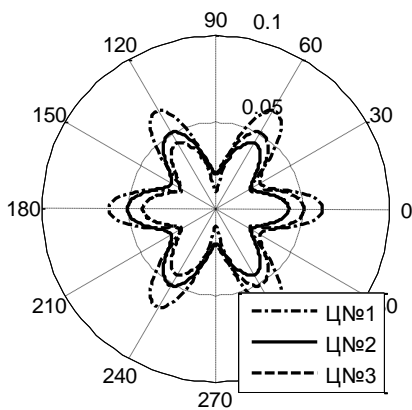
г)



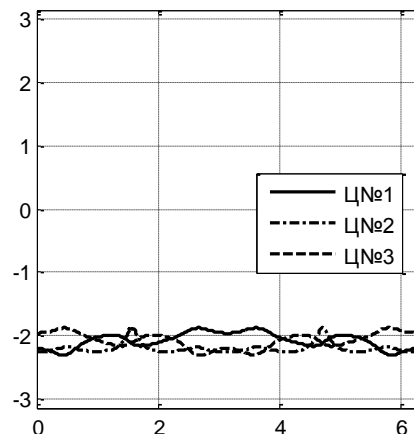
б)



д)



в)



е)

Рис. 4. Угловые зависимости амплитуд (а, б, в) и фаз (г, д, е) радиальных колебательных скоростей первого, второго и третьего вакуумированных излучателей (собственно, кривые 1, 2, 3) на частотах 6057 Гц (а, г), 9404 Гц (б, д) и 14610 Гц (в, е) трехэлементной планарной решетки при $l = 0,25m$

Интересным представляется изучить угловые распределения амплитуд и фаз радиальных колебательных скоростей излучателей планарной антенной решетки (рис. 4), особенно на тех частотах, где существенную роль играют более высокие моды колебаний. Естественно, что в отсутствие этих мод угловые распределения амплитуд и фаз радиальных скоростей излучателей имели бы однородный характер. Появление и участие в колебательном процессе оболочек излучателей решетки кроме нулевой моды более высоких мод колебаний существенно изменяет эту картину. Прежде всего это проявляется в том, что угловые распределения амплитуд и фаз колебательных скоростей существенно отличаются между собой для крайних и срединных излучателей планарной решетки. При этом у срединных излучателей при изменении набора вновь возникших мод колебаний на различных частотах, где эти моды проявляются максимально, форма угловых распределений практически сохраняется, а изменяется только амплитуда колебательных скоростей.

Для крайних же излучателей решеток изменения претерпевают и форма угловых распределений скорости и их амплитуда, причем на более высоких частотах эти изменения меньше, чем на низких.

Выводы

Показано, что при возбуждении излучателей планарной антенной решетки одинаковым электрическим напряжением механические смещения, колебательные скорости и излучаемые мощности у всех излучателей существенно отличаются между собой. Особенно большие различия этих параметров по излучателям наблюдаются в областях частот, близких к собственным частотам излучателей. Кроме того низкочастотная часть спектра излучателей и решетки расширяется и обогащается новыми собственными частотами. Выявленные эффекты могут

весьма отрицательно повлиять на энергетическую эффективность такого типа антенных решеток и существенно затруднить согласование излучателей с генераторами электрической энергии. В частности, значительные отличия колебательных скоростей излучателей не позволяют в полной мере реализовать потенциальные возможности таких решеток по излучаемой мощности. Это обусловлено тем, что уровни механических напряжений, возникающих в пьезокерамике излучателей, пропорциональны величинам колебательных скоростей [2]. Поэтому всегда существует предельно допустимая колебательная скорость, выше которой может наступить механическое разрушение конструкции излучателей планарных решеток.

Список использованных источников

1. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Волновые задачи акустики. – К.: Интерсервис, 2013. – 572 с.
2. Лейко А.Г., Нижник А.И. Физические поля планарных гидроакустических антенн, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей// Электроника и связь. – 2015. – №2 – С.– 100–106.
3. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами// Электроника и связь. – 2013. – №6 – С.– 62–73.
4. 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: 2013 р. – 390 с.

Поступила в редакцию 06 октября 2015 г.

А.Г. Лейко, д. - р. тех. наук., **А.И. Нижник**, **І.В. Кандрачук**, канд. техн. наук
Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури»,
вул. Сурикова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

Механічні поля циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції, що утворюють планарні гідроакустичні антени

Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях вирішена задача випромінювання звуку планарною антенною решіткою, що утворена з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції з окружною поляризацією. Проведено аналіз чисельних характеристик фізичних полів, що виникають в процесі роботи антени. Приведені графіки частотних залежностей, що виникають в процесі роботи антени. Приведено графіки частотних залежностей зміщень та коливальних швидкостей поверхні випромінювачів у складі решітки. Розглянуто частотні залежності як випромінювання в цілому, так і мод, що входять до його складу. Бібл. 4, рис. 4.

Ключові слова: фізичні поля; антенна решітка; циліндричний п'єзокерамічний випромінювач; силова конструкція; метод зв'язаних полів.

UDC 534.231

A. Leiko, Dr.Sc., **Z. Gusak**, **I. Kandrachuk**, Ph.D.

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

Mechanical fields of cylindrical piezoceramic emitters with power design wich used in construction of planar sonars

Using related fields method in multi related areas the problem of sound emitting by planar sonar, which consist of cylindrical piezoceramic emitters with power design and circular polarisation solved. Numerical characteristics of physical fields arising during operation of the antenna analyzed. The graphs of frequency dependencies of oscillatory displacements and velocities of the surfaces of radiators as part of the antenna shown. The frequency dependence of the radiation as a whole and its constituent modes considered. Reference 4, figures 4.

Keywords: physical fields; antenna array; cylindrical piezoceramic emitter; power design; related fields method.

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. *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)*
4. *Leiko, A. G., Nyzhnyk, A. I., Starovoyt, Y. I. (2013). Acoustic properties of cylindrical piezoceramic emitters with power and compensated design with longitudinal and transverse piezoelectric effect. Electronics and Communication. №6. pp. 62-73. (Rus)*