

Акустические приборы и системы

УДК 534.6

А.В. Коржик, канд. техн. наук

Закономерности эффективности излучения звука антенной решеткой, состоящей из многомодовых цилиндрических электроупругих преобразователей

В условиях дифракционного взаимодействия круговых цилиндрических излучающих электроупругих преобразователей с разрезными электродами рассмотрена ситуация акустического разгрузки и снижения эффективности излучения преобразователя за счет уменьшения активной составляющей импеданса излучения, что обусловлено взаимодействием по акустическому полю. Показано положительное влияние многомодовости и связанности мод колебаний преобразователей системы на эффект разгрузки, практически исключающее отбор энергии преобразователем извне.

In the conditions of diffraction interaction of circular cylindrical radiating electroelastic transducer with cutting electrodes the acoustic unloading situation and decrease in efficiency of transducer radiation at the expense of an active component reduction of radiation impedance that is caused by interaction on an acoustic field is considered. Positive influence of multimode and coherence of fluctuations modes of system transducer on effect unloading, almost excluding selection of energy by the transducer from the outside is shown.

Ключевые слова: дифракционное воздействие, антенная решетка, преобразователь, разрезные электроды, импеданс излучения, мода колебаний.

Введение

В электроупругих системах, работающих в жидкости в виду взаимосвязанности акустических и механических полей установившийся режим колебаний преобразователей есть результат взаимных многократных переотражений звуковых волн от преобразователей системы [1]. Очевидно, что указанные условия скажутся на характере нагружения преобразователей на рабочую среду, на форме характеристики направленности системы излучателей и на весьма критичном к внешним проявлениям изменению нагрузки – акустическом импедансе излучения $Z_i^{(s)}$.

Таким образом, особое место при работе излучающих антенн занимает импеданс излучения $Z_i^{(s)} = R_i^{(s)} - iX_i^{(s)}$, характеризующий способность излучающей системы обеспечивать передачу звуковой энергии рабочей среде. Известно [2–4], что при определенных волновых условиях и количестве преобразователей $N = 5 - 15$, эффекты взаимодействия по акустическому полю могут приводить к значительному уменьшению активной составляющей сопротивления излучения $R_i^{(s)}$ центральных преобразователей системы излучения. Уменьшение, а также равенство нулю составляющей $R_i^{(s)}$ говорит о том, что s -й преобразователь при оставшемся неизменным электрическом возбуждении, прекращает излучать звуковую энергию в рабочую среду. В работах [3–5] даже описана ситуация, когда активная составляющая импеданса излучения становится отрицательной, показывая, что преобразователь из режима излучения звуковой энергии переходит в режим ее потребления, меняя таким образом свое физическое состояние. Такой отбор звуковой энергии приводит к снижению общей производительности антенны и создает опасность разрушения преобразователя. Там, же показано, что критическим расстоянием между таким взаимодействующими излучателями является половина длины волны в рабочей среде для выбранной рабочей частоты.

В упомянутых работах ситуация взаимодействия приведена для чисто радиальных колебаний кругового цилиндрического преобразователя. В нашем случае, когда преобразователем с разрезными электродами формируется поле, имеющее многомодовый характер, ситуации полного разгрузки s -го преобразователя (как и отрицательных значений $R_i^{(s)}$) достичь сложно. Это объясняется тем, что каждая мода имеет свои критические расстояния между элементами (в общем случае не совпадающие с расстояниями для других мод) [6,7], при которых взаимодействие приводит к минимизации поле-

вых характеристик на поверхностях элементов решетки. Таким образом, при любых волновых соотношениях в силу связанности колебаний преобразователя, снижение значения полевой характеристики для одной моды будет компенсировано увеличением ее для другой. При этом полностью такая возможность теоретически исключена быть не может.

Результаты расчетов и анализ полученных данных

Для выяснения обстоятельств взаимодействия такого рода рассмотрим антенные решетки из двух и трех элементов и определим характер изменения $\operatorname{Re}\{Z_i^{(s)}\}$ и $\operatorname{Im}\{Z_i^{(s)}\}$ в виде нормированных зависимостей от расстояния $d, (d/\lambda)$ при возбуждении оболочек с парой разрезных электродов на частоте резонанса нулевой моды. На рис. 1 приведены результаты расчетов нормированных значений активной и реактивной составляющих $Z_i^{(s)}$ преобразователей в зависимости от расстояния $d, (d/\lambda)$ между преобразователями системы из $N=2$ и $N=3$ элементов в заданных условиях расчета.

Как видно из полученных результатов с ростом расстояния $d, (d/\lambda)$ изменение $R_i^s = \operatorname{Re}\{Z_i^s\}$ характеризуется затухающими осцилляциями, которые имеют практически периодический характер, с образованием экстремумов в виде максимумов и минимумов. При этом период осцилляций составляет для $N=2, s=1$ и $N=3, s=2$ величину $\lambda/2$, определяемую между точками на поверхностях соседних цилиндров, положение которых определяется для цилиндра $s=1$ углом $\varphi_1 = 0^\circ$, а для цилиндра $s=2$ углом $\varphi_2 = 180^\circ$. Значение $\lambda/2$ для случая $N=3, s=1;3$ отсчитывалось между фазовыми центрами преобразователей.

В рассматриваемых зависимостях наибольшие отличия между максимальными и минимальными значениями R_i^s по сравнению с одиночным цилиндром R_{i0}^1 (кривая 4) составляют в случае использования решетки из $N=2$ элементов (кривая 1, $s=1,2$) до 6–7 дБ в области малых d/λ и до 15–17 дБ для случая использования решетки из $N=3$ элементов (кривая 3, $s=2$).

Таким образом, активная составляющая сопротивления излучения систем преобразовате-

лей содержит области значений импеданса как большие, так и меньшие R_{i0}^1 .

Реактивная составляющая сопротивления излучения $X_i^s = \operatorname{Im}\{Z_i^s\}$ характеризуется осцилляциями во всей области изменений d/λ для каждого из периодов $\operatorname{Re}\{Z_i^s\}$. При этом размах наибольший размах осцилляций – до 13–15 дБ с последующим затуханием. По отношению к значению реактивной составляющей импеданса одиночного цилиндра X_{i0}^1 , рассматриваемое изменение X_i^1 крайних преобразователей в среднем незначительно отличается от X_{i0}^1 . Отличие же X_i^2 для центрального преобразователя решетки из $N=3$ элементов составляет до ± 12 дБ, а сама реактивная составляющая периодически меняет свой характер с упругого на инерционный и наоборот. При этом диапазон изменения X_i^s для крайних элементов решеток из $N=2$ и $N=3$ элементов составляет до 40 дБ (от 0,01 до 1), что показано на рис. 1, б (кривые 1 и 2). Изменение фазы импеданса излучения Ψ_i^s составляет до $\pm 45^\circ$ и характеризуется множеством периодических переходов через ноль (рис. 1, в).

Таким образом, увеличение числа цилиндрических преобразователей усложняет картину взаимодействия, что иллюстрируется разными по амплитуде и периоду осцилляций зависимостями R_i^s и X_i^s для крайних и центральных цилиндров, а также общим изменением характера нагружения центрального цилиндра системы. Наиболее сильно взаимодействие сказывается при малых расстояниях между преобразователями ($d \approx 138–150$ мм, $d/\lambda \approx 0,75–0,82$). Расчеты показывают существование области значений $d \approx 300–320$ мм, $d/\lambda \approx 1,6–1,75$, для которых значения фаз для всех зависимостей практически равны нулю (рис. 1, в), а значения активной составляющей импедансов проходят свой очередной максимум.

При изменении расстояния $d, (d/\lambda)$ в решетке из $N=3$ элементов наиболее подвержен взаимодействию центральный преобразователь (рис. 1, а, б, кривые 3). Для него величина R_i^s может уменьшаться в 10 раз по сравнению с наибольшим расчетным значением и быть в 3

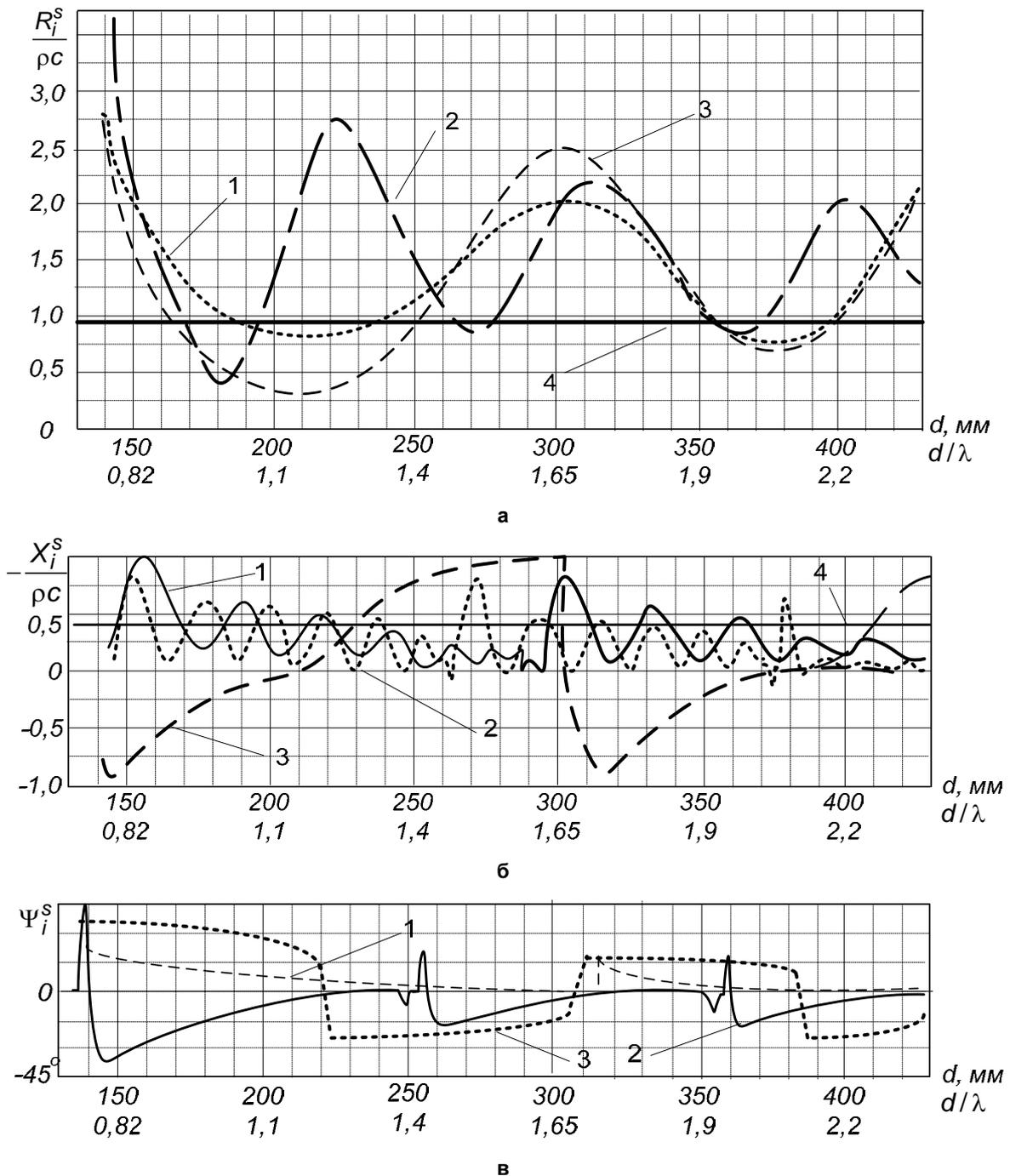


Рис. 1. Нормированные значения действительной R_i^s (а), мнимой X_i^s (б) составляющих импеданса излучения преобразователей системы круговых электроупругих цилиндров и фазы Ψ_i^s (в) от расстояния d : кривая 1 ($N=2, s=1$), кривая 2 ($N=3, s=1;3$), кривая 3 ($N=3, s=2$), кривая 4 – одиночный цилиндр ($N=1$)

раза меньше R_{i0}^1 , что говорит также о наибольшем разгрузении этого элемента. Определено также, что реактивная составляющая импеданса излучения X_i^s крайних элементов претерпевает значительные осцилляции, а для центрального они практически отсутствуют. Это связывается с отличием волновых путей прямого и рассеянного звука, так как физиче-

ская природа осцилляций состоит в образовании разности фаз в точках наблюдения на поверхности s -го цилиндра между излученными и рассеянными ближними и дальними цилиндрами волнами.

Заметим, что взаимодействие по акустическому полю обусловлено как волновыми, так и резонансными явлениями между упругостью среды, находящейся в пространстве среды

оболочками системы и массой среды, соколеблющейся с их стенками. При изменении расстояния d величина соколеблющейся массы изменяется. Так при изменении d от значений 140-150 мм взаимодействие обуславливает существенное уменьшение R_i^s , приводящее к разгрузке преобразователей, затем его возрастание до некоторого значения, потом снова уменьшение и так далее до ситуации, когда в пределе при $d \rightarrow \infty$ R_i^s совпадает с R_{i0}^1 .

Реактивная составляющая импеданса крайних цилиндров системы имеет характер массы, а для среднего – как инерциальный так и упругий. При этом для крайних преобразователей X_i^s практически осциллирует вблизи линии, характеризующей X_{i0}^s , а для среднего – монотонно меняется в пределах от -1 до $+1$, изменяя характер с упругого на инерциальный.

Рассмотрим подробнее ситуацию акустического разгрузки центрального преобразователя решетки $s=2$ при $N=3$. Как видно из рис.2(а, б, кривая 3), R_i^s имеет первый минимум при $d \approx 226$ мм ($d/\lambda \approx 1,23$), что составляет $\lambda/2$ между крайними точками обращенных друг к другу поверхностей оболочек $s=1$ и $s=2$, определяемыми углами $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 180^\circ$. А X_i^2 при малых $d, (d/\lambda)$ имеет чисто упругий характер. По мере удаления оболочек друг от друга упругий характер сохраняется до указанного значения $d \approx 226$ мм, что определит расстояние между рассматриваемыми точками оболочек как $\lambda/2$. При этом цилиндрические волны, создаваемые излучателями $s=1, s=2$, достигают точек $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 180^\circ$ на обращенных друг к другу поверхностях с близкими по величине ($p_{0^\circ}^1 \approx 1,48, p_{180^\circ}^2 \approx 1,53$) противофазными давлениями. Таким образом, имеет место практически близкое к нулю значение суммарного поля в пространстве между оболочками. При этом становится равным нулю и реактивная составляющая импеданса излучения X_i^2 . В итоге получаем, что хотя все излучатели решетки электрически возбуждаются одинаково, средний оказывается практически ненагруженным на среду, что может приводит не только к потере мощности излучения, но и к перегрузке как самого преобразователя, так и электрических задающих устройств.

После резонанса X_i^2 меняет знак и приобретает характер массы. Это сохраняется до тех пор,

пока расстояние между рассматриваемыми точкам оболочек не стане λ (то есть $d \approx 300 - 315$ мм). При этом давления в рассматриваемых точках оболочек $s=1, s=2$ существенно повышаются, величина X_i^2 – наибольшая, а R_i^2 имеет экстремум, соответствующий первому относительному максимуму. Далее картина повторяется с уменьшением относительных значений экстремумов.

Относительно крайних преобразователей решетки из трех элементов можно заметить, что количество областей наибольших и наименьших значений R_i^1, R_i^3 увеличивается вдвое. Так как при наличии трех преобразователей, суммарное поле $p_{0^\circ}^1$ в точке $\varphi_1 = 0^\circ$ определится суперпозицией волны, излученной излучателем $s=1$ и волн, рассеянных элементами $s=2$ и $s=3$. В случае же двуэлементной решетки в точке наблюдения $p_{0^\circ}^1$ мы имеем дело лишь с волной, излученной источником и волной, рассеянной элементом $s=2$, что и обуславливает уменьшение областей максимумов и минимумов R_i^1 .

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что дифракционное взаимодействие элементов излучающей антенной системы, образованной электроупругими круговыми цилиндрическими преобразователями обуславливает увеличение, либо уменьшение активной составляющей сопротивления излучения излучателей решетки, что приводит к возрастанию, либо к снижению величины излучаемой мощности, а также возможной перегрузке задающих электрических устройств и трактов. Характер взаимодействия при этом зависит от вида электродирования, расстояния между элементами и частоты возбуждения.

Установлено, что для числа элементов $N > 2$, дифракционное взаимодействие снижает (в силу связанности колебаний используемых многомодовых систем) опасность разгрузки преобразователей решетки и потребления центральным излучателем решетки энергии из создаваемого решеткой акустического поля.

Литература

1. Коржик О.В., Лесечко М.І. Випромінювання звукових хвиль системою циліндричних перетворювачів, що підключені до довгої лінії // Електроніка та зв'язок. – 2010. – № 1. – С. 54–62.

2. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.*
3. *Подводная акустическая аппаратура и устройства. Т.1. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей / Лейко. А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. – К.:ГК ППУ, 2000. – 320 с.*
4. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Маципура В.Т. Основы акустики. – К.: Наукова думка, 2007 – 640 с.*
5. *Басовский В.Г. Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец // Акустичний вісник. – 1998. – 1, №2. – С. 3-20.*
6. *Коржик А.В. Исследование закономерностей акустического взаимодействия элементов антенных решеток, образованных электроупругими цилиндрическими преобразователями// Системи обробки інформації.- Х.: ХУ ПС, 2010 .-Вип. 5(86).-С. 59-66.*
7. *Коржик А.В. Применение метода «сквозной задачи» к определению особенностей формирования электрических сигналов на нагрузках электродов электроупругих цилиндрических преобразователей// Збірник наукових праць харківського університету Повітряних сил.- Х.: ХУ ПС, 2010 .-Вип. 5(25).- С. 72-77.*

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*