

УДК 534.24

# ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА РЕШЕТКОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ СООСНЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ОБОЛОЧКАМИ С ТОРЦЕВЫМИ ЭКРАНАМИ. ЧАСТЬ V. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Т. МАЦЫПУРА

*Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев**Получено 21.11.2002*

Рассмотрены некоторые методы управления характеристиками излучающей системы, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами в виде усеченных конусов. Показано, что с помощью надлежащего выбора электрического напряжения для каждой из оболочек можно осуществить эффективное управление излучаемой акустической мощностью, обеспечив при этом отсутствие электрических и механических перегрузок.

Розглянуті деякі методи керування характеристиками випромінюючої системи, утвореної співвісними циліндричними п'єзокерамічними оболочками з торцевими екранами у вигляді зрізаних конусів. Показано, що за допомогою спеціального вибору електричних напруг для кожної з оболонок можна здійснити ефективне керування акустичною потужністю, забезпечивши при цьому відсутність електричних і механічних перевантажень.

Some techniques of control over performance of the radiating system, formed by coaxial cylindrical piezoceramic shells with the face screens in form of truncated cones, are considered. It is shown that a special choice of the electric voltage for each shell allows to fulfill an effective control over the acoustic power, providing simultaneously the absence of electrical and mechanical overload.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследованию осесимметричной задачи излучения звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами в виде усеченных конусов, посвящена серия предшествующих публикаций [1–4]. В данной статье, завершающей упомянутый цикл, рассматриваются некоторые специфические методы управления характеристиками излучающей системы при ее работе в непрерывном режиме. Необходимость их обсуждения обусловлена результатами, полученными в работах [2, 5]. В частности, оказалось, что при возбуждении системы из пяти идентичных оболочек одинаковыми гармоническими электрическими напряжениями с частотой  $f$  наблюдаются следующие характерные явления:

- 1) колебательные скорости и излучаемые мощности для отдельных оболочек существенно отличаются;
- 2) особенно велики эти различия в зоне частот, прилегающих к собственным частотам оболочек (как известно, именно этот частотный диапазон наиболее интересен для практики);

- 3) при определенных условиях отдельные оболочки могут переходить из режима излучения энергии в режим ее поглощения из внешней среды.

Очевидно, что эти явления – результат акустического взаимодействия оболочек – могут весьма отрицательно влиять на энергетическую эффективность антенных решеток такого типа. Кроме того, серьезную проблему представляют значительные различия колебательных скоростей оболочек, поскольку механические напряжения, возникающие в материале колеблющихся элементов решетки, пропорциональны величинам колебательных скоростей. Следовательно, всегда существует предельно допустимая колебательная скорость, превышение которой вызывает механическое разрушение оболочек. Из работы [2] следует, что амплитуды колебательных скоростей могут отличаться более чем в три–четыре раза. В результате одни оболочки могут работать на пределе своих прочностных возможностей, в то время как другие – в облегченном режиме.

В данной статье указаны некоторые пути управления характеристиками антенны, позволяющие контролировать излучаемую акустическую мощ-

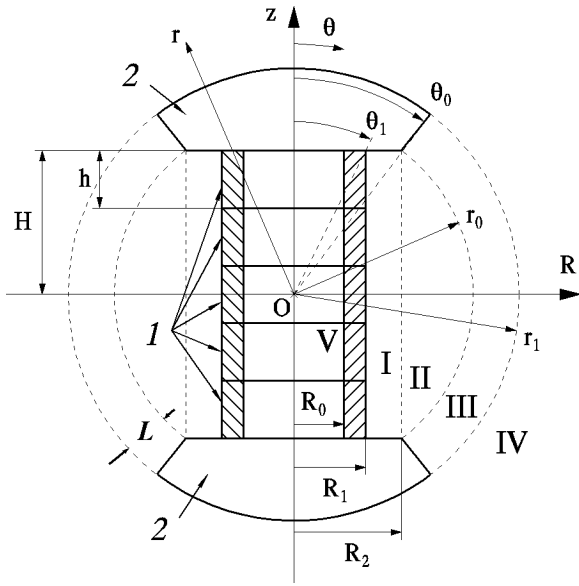


Рис. 1. Сечение решетки:

1 – пьезокерамические оболочки; 2 – торцевые экраны

ность с учетом механической и электрической прочности оболочек.

**АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Напомним вкратце основные геометрические и физические параметры рассматриваемого объекта. На рис. 1 представлена геометрия излучающей системы, состоящей из пяти оболочек ( $M=5, j=1, 2, \dots, M$ , где  $j$  – номер оболочки, если вести отсчет сверху вниз). Торцы решетки закрыты экранами специальной формы. Поверхности торцевых экранов будем полагать акустически мягкими. Излучающая система расположена в воде, для которой  $\rho c=1.5 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Здесь  $\rho$  и  $c$  – плотность и скорость звука соответственно. Геометрические и физические параметры излучающих элементов антенны примем такими же, как и в работе [1]: оболочки выполнены из пьезокерамики ЦТБС-3, причем  $R_1=0.075 \text{ м}$ ,  $H/R_1=1.67$ . Масса одной оболочки составляет  $m=1.5 \text{ кг}$ , добротность  $Q=25$ , а собственная частота в вакууме  $f_0 \approx 7440 \text{ Гц}$ .

Осевая симметрия постановки соответствующей задачи излучения относительно оси  $z$  очевидна. В дополнение к этому будем рассматривать задачу, симметричную относительно плоскости  $z=0$ . Это позволяет ограничиться изучением характеристик только для первых трех оболочек. Считаем, что внутри решетки (область V) находится вакуум, а  $R_1=R_2$  (отсутствует область I).

Один из возможных путей, позволяющий повысить энергетическую эффективность излучающей системы и, в то же время, не допустить, чтобы значения колебательных скоростей оболочек превысили допустимую величину, указан в работе [5]. Идея заключается в том, чтобы заставить все оболочки колебаться с одинаковой скоростью. При такой постановке задачи искомыми уже будут комплексные амплитуды гармонических электрических напряжений  $U_j, j=1, \dots, M$ , а колебательные скорости  $V_j, j=1, \dots, M$  полагаются равными некоторой заданной величине. Исходя из этого, в исходной системе уравнений (см. работу [1]) следует сделать соответствующие изменения.

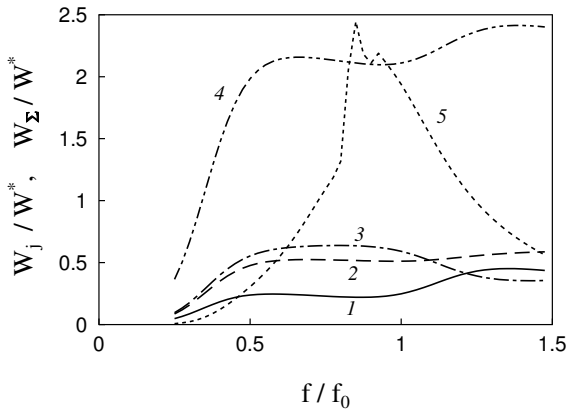
В приведенных ниже расчетах мощности излучения оболочек нормированы на величину  $W^*=(NU^*)^2/\rho cS$ , амплитуды скоростей оболочек – на  $V^*=NU^*/\rho cS$ , а амплитуды электрических напряжений – на  $U^*=10^3 \text{ В}$ , где  $N$  и  $S$  – коэффициент электромеханической связи и площадь цилиндрической поверхности оболочки соответственно [1].

Положим амплитуды колебательных скоростей всех оболочек, равными  $V_j=V^*$ . На рис. 2, а представлены частотные зависимости мощностей излучения оболочек, а на рис. 2, б, в – соответственно модули и фазы напряжений, подаваемых на оболочку, при относительной длине конической поверхности торцевого экрана  $L^*=L/R_1=0.81$ .

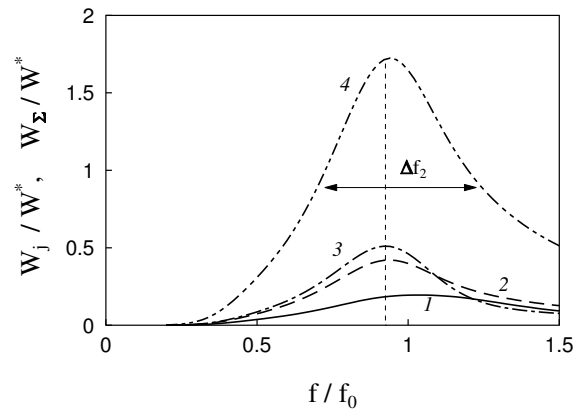
Напомним, что согласно результатам работы [2, рис. 2, б], изменения колебательной скорости оболочек в исследуемом диапазоне частот могут быть значительными и превышать величину  $V^*$  более, чем в три раза. Сравнение кривых 4 и 5 на рис. 2, а позволяет убедиться, что равенство колебательных скоростей на всех оболочках приводит к увеличению мощности, излучаемой как отдельными оболочками, так и всей решеткой, в широком диапазоне частот.

Следует, однако, подчеркнуть, что такое улучшение энергетических характеристик рассматриваемой системы достигается за счет повышения питающих оболочки электрических напряжений и придания им определенных зависимостей от частоты. Исходя из рис. 2, б, в, можно утверждать, что в диапазоне частот  $0.6 < f/f_0 < 1.4$  амплитуды напряжений  $U_j$  не превосходят величину  $2U^*$ . Вне этого диапазона наблюдается значительный рост амплитуд электрических напряжений, используемых для реализации условия постоянства колебательных скоростей оболочек.

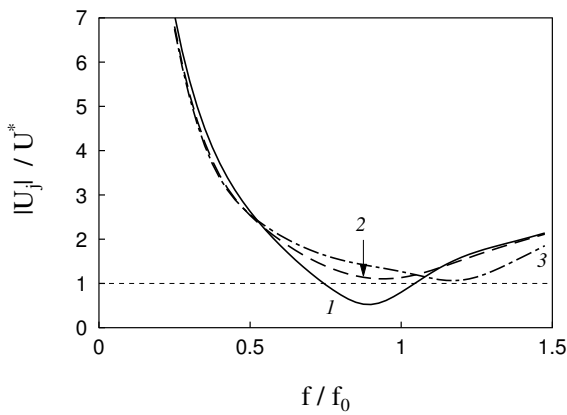
Возможен и другой путь поиска оптимальных условий работы излучающей системы с точки зрения механической и электрической прочности обо-



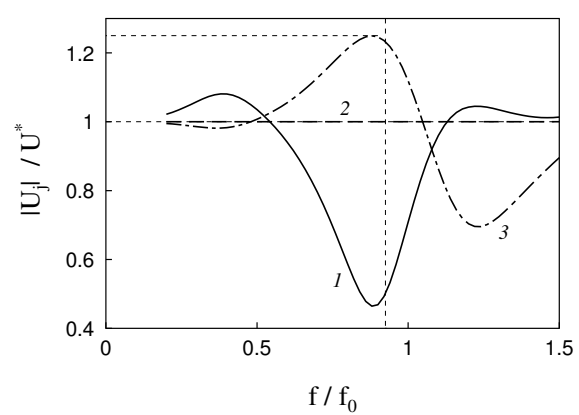
a



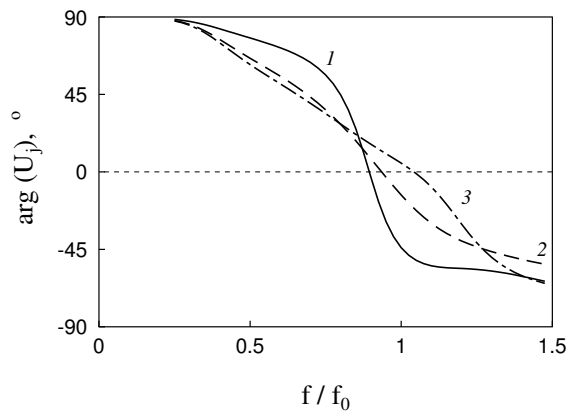
a



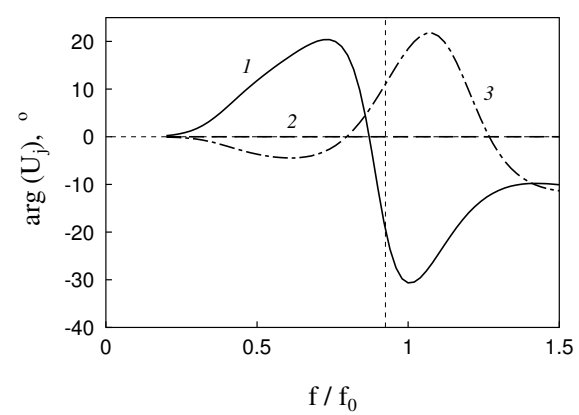
б



б



в



в

Рис. 2. Электроакустические параметры решетки с  $L^*=0.81$  при равенстве колебательных скоростей оболочек:

- а – излучаемая акустическая мощность,
- б – амплитуды подаваемых электрических напряжений,
- в – фазы подаваемых электрических напряжений;
- 1, 2, 3 – соответствуют номерам оболочек,
- 4 – полная излучаемая решеткой мощность при  $V_j = V^*$ ,
- 5 – полная излучаемая решеткой мощность при  $U_j = U^*$

Рис. 3. Электроакустические параметры решетки с  $L^*=0.81$  при заданном электрическом напряжении на второй оболочке  $U_2 = U^*$  и равенстве скоростей всех оболочек  $V_1 = V_2 = \dots = V_5$ :

- а – излучаемая акустическая мощность,
- б – амплитуды подаваемых электрических напряжений,
- в – фазы подаваемых электрических напряжений;
- 1, 2, 3 – соответствуют номерам оболочек,
- 4 – полная излучаемая решеткой мощность

лочек. Идея состоит в том, чтобы задавать электрическое напряжение на одной из оболочек, дополнительно обеспечивая условие равенства колебательных скоростей всех оболочек (естественно, теперь скорости оболочек могут зависеть от частоты). В этом случае напряжения, подаваемые на другие оболочки, и все колебательные скорости переходят в разряд искоемых величин.

Нами были проведены расчеты, при которых напряжение фиксировалось на первой, второй и третьей оболочках соответственно. При этом требовалось выполнение условия  $V_1 = V_2 = V_3$ . На рис. 3 приведены результаты для случая фиксированного напряжения на второй оболочке  $U_2 = U^*$ . Как видно, частотные зависимости мощности имеют плавный характер с выраженными максимумами. Подобные же зависимости наблюдаются при фиксации напряжения на других оболочках. Интересно отметить, что при задании электрического напряжения на первой оболочке максимум излучаемой мощности соответствует частоте  $f/f_0 \approx 0.88$ , при задании напряжения на второй оболочке (см. рис. 3, а) –  $f/f_0 \approx 0.92$ , а на третьей –  $f/f_0 \approx 1.18$ . Аналогичная картина характерна для частотных зависимостей колебательных скоростей оболочек.

Исследование указанных выше вариантов расчетов показало, что ситуация с заданием питающего напряжения на второй оболочке  $U_2 = U^*$  (см. рис. 3) является наиболее выгодной по двум причинам. Первая из них – ширина полосы пропускания излучающей системы  $\Delta f$ . Определим ее как диапазон частот, при которых уровень излучаемой мощности составляет более половины максимальной мощности. Тогда имеют место оценки  $\Delta f_2/\Delta f_1 \approx 2.9$  и  $\Delta f_2/\Delta f_3 \approx 1.1$  (здесь индекс при величине  $\Delta f$  определяется вариантом фиксации напряжения на соответствующей оболочке). Таким образом, полоса пропускания  $\Delta f_2$  (см. рис. 3) оказывается наибольшей. Вторая причина заключается в том, что, согласно рис. 3, б, вблизи максимума излучаемой мощности напряжения на оболочках превосходят величину  $U^*$  не более, чем в 1.25 раза. Указанное превышение также будет наименьшим среди рассмотренных ситуаций. Так, для варианта  $U_1 = U^*$  получаем превышение величины  $U^*$ , достигающее  $2.7U$  раза, а для ситуации  $U_3 = U^*$  – около 1.5 раз. Кроме того, для варианта  $U_2 = U^*$  наименьшим оказывается и диапазон изменения фаз подаваемых на оболочки электрических напряжений (рис. 3, в).

В заключение отметим, что применение такого способа управления в области низкочастотного резонанса для решетки, у которой внутри оболочек находится вода [2, рис. 7, б], также приводит к улу-

чшению характеристик излучающей системы.

## ВЫВОДЫ

Показано, что с помощью надлежащего выбора электрического напряжения для каждой пьезоэлектрической оболочки в излучающей решетке можно осуществить эффективное управление излучаемой акустической мощностью, обеспечив при этом отсутствие электрических и механических перегрузок оболочек. Описаны два варианта поиска управляющих электрических напряжений:

- 1) при задании фиксированной величины скорости колебаний всех оболочек во всем диапазоне частот;
- 2) при фиксации величины электрического напряжения на одной из оболочек и обеспечении равенства скоростей колебаний всех оболочек на каждой из частот.

Сравнение результатов, представленных на рис. 2 и 3, показывает, что каждый из рассмотренных вариантов имеет свои достоинства и недостатки. Так, если ориентироваться на полосу частот  $\Delta f_2$  (см. рис. 3, а), то более равномерной оказывается мощностная характеристика, соответствующая первому варианту (см. рис. 2, а). Это достигается за счет относительного повышения амплитуд напряжений, подаваемых на оболочки (ср. рис. 2, б и 3, б). При этом в указанном диапазоне частот фазы напряжений при первом варианте управления претерпевают большие изменения, чем во втором, но ход этих зависимостей в первом случае является более плавным (ср. рис. 2, в и 3, в).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает сердечную благодарность профессору И. В. Вовку за постоянное внимание к этой работе и полезные дискуссии, способствовавшие более глубокому осмыслению полученных результатов.

1. Вовк И. В., Мацьшура В. Т. Излучение звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть I. Теория // Акуст. вісн.– 2001.– 4, N 2.– С. 11–17.
2. Вовк И. В., Мацьшура В. Т. Излучение звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть II. Анализ численных результатов: ближнее поле и излучаемая мощность // Акуст. вісн.– 2001.– 4, N 4.– С. 11–17.
3. Мацьшура В. Т. Излучение звука решеткой, обра-

зованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть III. Анализ численных результатов: направленные свойства // Акуст. вісн.– 2002.– 5, N 1.– С. 37–41.

4. *Вовк И. В., Мацьпура В. Т.* Излучение звука решеткой, образованной соосными цилин-

дрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть IV. Импульсный режим работы // Акуст. вісн.– 2002.– 5, N 2.– С. 13–26.

5. *Вовк И. В., Гринченко В. Т.* Излучение звука конечным набором соосных пьезокерамических обло- чечек // Акуст. ж.– 1991.– 37, N 2.– С. 259–269.