

УДК 534.38

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОЙ ГАСЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

© 2000 г. Е. В. Коротаев, В. В. Тютюкин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 07.04.99 г.

В статье обсуждаются общие принципы построения активных гасящих акустических систем плоской формы. Приведена структурная схема такой системы, основанная на принципе разделения звуковых полей по пространственным гармоникам, на основе чего была создана экспериментальная звукоизолирующая система, гасящая две первые ($n = 0$ и $n = 1$) горизонтальные гармоники звукового поля. Описывается схема эксперимента, выполнявшегося в условиях гидроакустического бассейна. Исследовалась звукоизолирующая способность системы путем сравнения звуковых уровней за системой при ее включении и выключении. Приведены частотные характеристики эффективности системы при различных углах падения плоской звуковой волны в диапазоне частот 1–5 кГц.

Задача снижения уровней шумовых или отраженных звуковых полей обычно решается применением звукоизолирующих, звукопоглощающих и других видов материалов и конструкций. Однако если это удастся успешно делать на сравнительно высоких частотах, то на низких частотах (сотни герц–единицы килогерц) толщина применяемых материалов становится чрезмерно большой. Именно в этих диапазонах частот могут найти себе применение так называемые активные методы гашения акустических полей, о чем свидетельствуют многие новые работы, посвященные этой проблеме [1–7].

Простейшей активной системой, реализующей гашение звуковых полей в определенной области пространства, может служить система плоской формы. Так, в работе [1] было проведено математическое моделирование подобной системы со сравнительно простым способом обработки информации: каждый приемник плоской приемной решетки связан управляемой линией задержки только с противоположащим излучателем плоской же излучающей решетки (параллельной приемной). Недостатком такой системы является наличие усиления (а не ослабления) проходящей звуковой волны при углах падения более 60° – 65° .

Другим способом построения активных систем, в том числе плоской формы, может являться метод разложения первичных и вторичных звуковых полей по системе пространственных ортогональных гармоник [8, 9]. При этом предполагается, что имеются однонаправленные приемные и излучающие поверхности Гюйгенса, образующие какую-нибудь координатную поверхность в ортогональной системе координат (например, плос-

кость, цилиндр, сферу и т.д.). Общий случай построения активной гасящей системы с использованием пространственных ортогональных гармоник изложен в работе [2]. Проводя с помощью приемников, на которые подаются определенные весовые коэффициенты, анализ первичных полей, можно определить комплексную амплитуду каждой гармоники, а подавая аналогичные коэффициенты на излучателя, можно синтезировать и излучать каждую гармонику в отдельности с определенной амплитудой и фазой. При этом каждая “принимаемая” гармоника связана с той же излученной гармоникой своим средним блоком, обеспечивающим гашение этой гармоники. Акустическая обратная связь между приемной и излучающей поверхностями по-прежнему отсутствует из-за их однонаправленности, а взаимодействие между гармониками – из-за их взаимной ортогональности. Структура такой активной системы представляется весьма удобной для реализации, поскольку эта система разбивается на независимые друг от друга “одномерные” каналы. При этом, как показывают приближенные расчеты, необходимое количество гармоник примерно равно количеству приемников (излучателей).

Общие идеи построения активных систем, основанных на применении приемно-излучающих поверхностей Гюйгенса с разделением полей на ортогональные гармоники, были положены в основу создания активной системы плоской формы [10]. Последняя является простейшей в смысле простоты координатной системы, в которой можно использовать разложение акустических полей по пространственным гармоникам. Некоторые трудности представляет то обстоятельство, что такая система может быть только конечной и,

следовательно, не будет образовывать замкнутую поверхность. Размещение ее в экране является технически очень сложной задачей, и нами этот прием не использовался. Активная система, описанная в настоящей работе, создавалась применительно к водной среде, поскольку построение приемных и излучающих поверхностей Гюйгенса в этом случае наиболее адекватно теоретическим предпосылкам, так как в качестве отдельных приемных и излучающих элементов могут использоваться пьезоэлектрические преобразователи сферической формы, размеры которых малы по сравнению с длиной волны звука. Отметим, что в отличие от этого в аэроакустике можно применять только микрофоны (приемные элементы) и динамики (излучающие элементы), которые не в полной мере соответствуют теоретическим предпосылкам, хотя бы из-за появления направленности при увеличении частоты. Кроме того, длина волны в воде примерно в пять раз больше, чем в воздухе, и поэтому при одних и тех же частотах в первом случае можно применять меньшее количество приемных и излучающих элементов.

Настоящая работа посвящена разработке активных систем на основе плоскопараллельных приемных и излучающих решеток и исследованию их возможностей для гашения звука в заданной области пространства в широком диапазоне частот и углов падения внешней волны. В работе особое внимание уделено разработке таких структурных схем гашения звуковых полей, которые при высокой эффективности и устойчивости имели бы приемлемое для реализации число приемников и излучателей, число связей между ними, а также достаточно простые частотные свойства электронных цепей и требования к их настройке.

На основании результатов работы [10] была разработана, изготовлена и испытана в условиях гидроакустического бассейна действующая модель такой активной системы. В эксперименте использовались две подсистемы, реализующие гашение горизонтальных гармоник $n = 0$ и $n = 1$ при плоской вертикальной гармонике. Отметим, что можно создать гасящую систему для произвольного падения плоской волны на поверхность решетки; в этом случае необходимо разложить звуковые поля по двумерным гармоникам.

Структуры каждой из подсистем, гасящей пространственную гармонику номера, также построены на основании работы [10]. Эти структуры учитывают конечное число приемников и излучателей "трипольного" типа (монополь + диполь) и их дискретное расположение в плоскости приемной и излучающей решеток.

На рис. 1 приведена блочная схема системы, характеризующая алгоритм обработки сигналов. Здесь $p^m(y_j)$ и $p^d(y_j)$ означают звуковые давления,

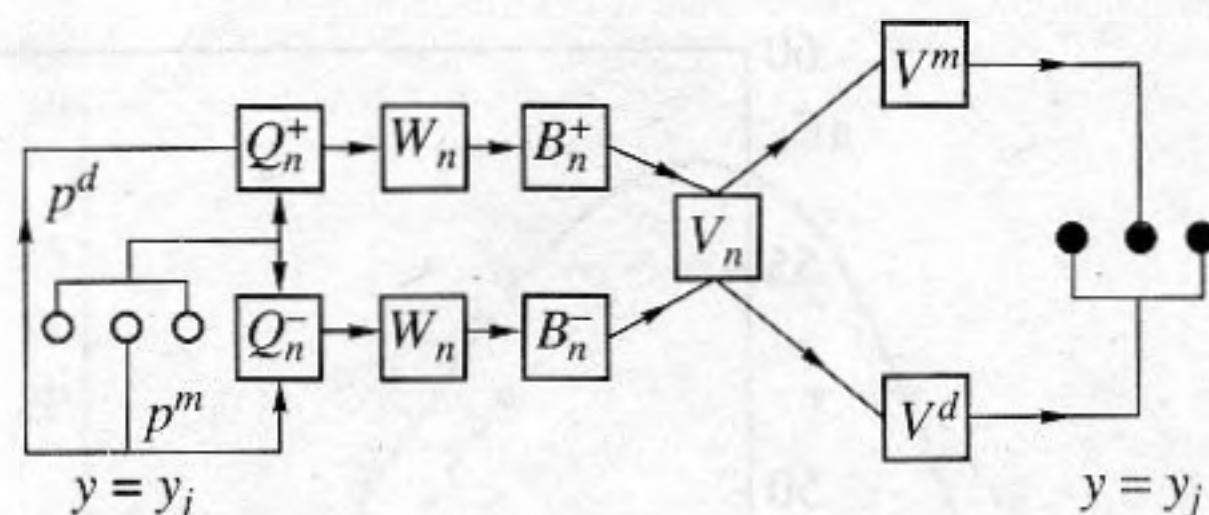


Рис. 1. Блочная схема плоской активной системы (обозначения в тексте).

принимаемые соответственно монополем и диполем, расположенными в точке $y = y_j$ ($j = 1 \dots N$). Другие обозначения таковы:

$$Q_n^+ = \sum_{j=1}^N (p^m(y_j) + a_n p^d(y_j)) \cos \frac{n\pi y_j}{D};$$

$$Q_n^- = \sum_{j=1}^N (p^m(y_j) + a_n p^d(y_j)) \sin \frac{n\pi y_j}{D};$$

$$a_n = (2i \sin(kl \cos \varphi_n))^{-1};$$

$$\cos \varphi_n = \left(1 - \left(\frac{n\pi}{kD}\right)^2\right)^{0.5}; \tag{1}$$

$$W_n = -\frac{ik \cos \varphi_n}{\omega} \exp(ikL \cos \varphi_n); \quad B_n^\pm = Q_n^\pm W_n;$$

$$V^{m,d}(y_j) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^M \left(B_n^+ \cos \frac{n\pi y_j}{D} + B_n^- \sin \frac{n\pi y_j}{D} \right) q_n,$$

где $2l$ – размер диполя, D – ширина решетки, L – расстояние между приемной и излучающей плоскостями, M – количество гармоник; q_n равно 1 для монопольного излучателя и $q_n = (ik \cos \varphi_n)^{-1}$ для дипольного. $V^m(y_j)$ и $V^d(y_j)$ – величины, пропорциональные напряжениям, подаваемым на монопольные и дипольные излучатели соответственно.

Как показали экспериментальные результаты, приемная и излучающая решетки, построенные по описанному алгоритму, обладают свойствами однонаправленности в широкой полосе частот на уровне не ниже -20 дБ. Приемная и излучающая поверхности были ориентированы так, что минимумы их характеристик направленности для каждой гармоники были направлены навстречу друг другу, поэтому акустическая связь решеток была не менее -40 дБ, что давало гарантию отсутствия самовозбуждения системы. Конструктивно каждая из решеток состоит из 6 линейных вертикальных антенн, каждая из которых содержит 6 "трипольных" элементов. Элементы в каждой плоскости расположены в узлах шестиугольной решетки. Преобразователи сферичес-

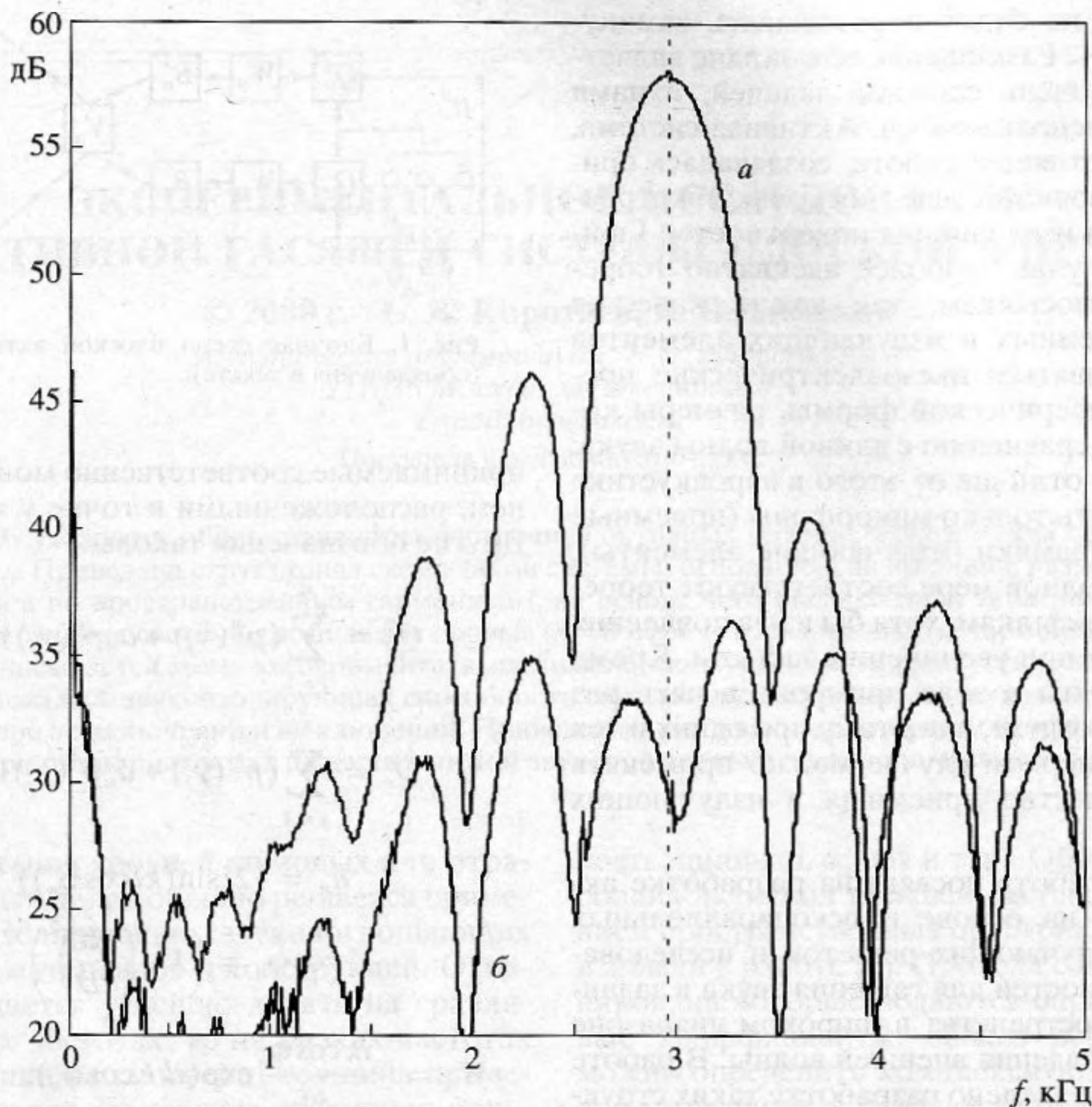


Рис. 2. Спектральная плотность импульсов, прошедших через систему. *a* — система отключена; *б* — система включена.

кой формы диаметром 3 см были выполнены из титаната бария. Центральные элементы “триполей” использовались в качестве монопольных, а два крайних элемента — в качестве дипольных элементов. Расстояния между монопольными элементами удовлетворяют условию “частой” решетки $d < \lambda/2$. Параметры имеют следующие значения: $d = 16$ см, $\lambda_b = 37.5$ см — длина волны на верхней частоте рабочего диапазона 2–4 кГц. Линейные размеры системы $2D = 80$ см, расстояние между плоскостями решеток $L = 30$ см. Измерения выполнялись импульсным методом для того, чтобы отделить во времени сигнал, прошедший через систему, от сигналов, отраженных (хотя и ослабленных) от стенок бассейна. Сферический источник первичного (падающего) поля располагался перед приемной решеткой на расстоянии $r > (2D)^2/\lambda_b$, что давало возможность считать падающую на нее волну плоской.

Настройка всей системы для гашения падающих плоских волн производилась по показаниям контрольного гидрофона, размещенного за излучающей решеткой (в теневой области). Это осу-

ществлялось изменением коэффициентов усиления (не зависящих от частоты) и регулировкой фазово-частотных характеристик линий задержки W_0 и W_1 . Таким образом удавалось создать достаточно глубокую тень (сильную звукоизоляцию) за излучающей решеткой.

На рис. 2 в качестве примера приведены спектрограммы импульсов, прошедших через отключенную (*a*) и работающую (*б*) систему, для частоты заполнения 3 кГц. За меру эффективности системы на “центральной” частоте бралась разность соответствующих уровней именно на этой частоте. Значения эффективности на “боковых” частотах рассматривались как контрольные или иллюстративные.

Экспериментальные данные, характеризующие эффективность гашения нулевой и первой гармоник в зависимости от частоты, представлены на рис. 3 (через экспериментальные точки проведены усредняющие кривые). При этом контрольный гидрофон располагался по центру плоскости системы, а первичная волна падала на систему нормально ($n = 0$) и наклонно под углом $\varphi \approx 38^\circ$

($n = 1$). Исходя из рис. 5 можно сделать следующие выводы. Максимальная эффективность по звукоизоляции достигается на частотах 3–3.5 кГц и составляет величины 24–28 дБ для обеих гармоник. Частотная зависимость типична для такого рода систем (спадание эффективности к краям рабочего диапазона частот) [11]. При этом полоса составляет 1.5–5 кГц, отрицательные значения эффективности отсутствуют и система устойчива к самовозбуждению.

Далее, на рис. 4 приведены экспериментальные данные по эффективности системы при одновременной “работе” гармоник с $n = 0$ и $n = 1$ в зависимости от угла падения первичного поля для некоторых частот из их рабочего диапазона. Сплошные кривые соединяют экспериментальные точки, соответствующие одной частоте. Каждая из таких кривых имеет два максимума эффективности, что обусловлено тем фактом, что условия полного гашения выполняются для $n = 0$ при нормальном падении, а для $n = 1$ – при углах падения, определяемых формулой (1). Для промежуточных углов падения эти условия выполняются только приближенно, так как комплексные коэффициенты W_n в данной системе не изменяются в зависимости от угла падения.

Для реальной активной системы средняя эффективность в угловом интервале возрастает при увеличении числа гармоник (т.е. при увеличении волновых размеров приемной и излучающей решеток). Действительно, общее число гармоник N может быть определено из условия

$$\cos^2 \varphi_N = 1 - (N/kD)^2 \geq 0.$$

Следовательно, $N \leq \frac{2D}{\lambda}$, и поскольку максимальная эффективность достигается при углах $\varphi = \pm \varphi_n$ ($0 \leq n \leq N$), то число таких “пиков” эффективности при увеличении N увеличивается. При этом эффективность системы при промежуточных углах также увеличивается.

В заключение отметим, что “управляющая” часть системы, описанной выше, была реализована исключительно аналоговыми методами. На основании многочисленных работ, посвященных активным методам, можно полагать, что применение компьютерных методов управления (в частности, настройки системы) может привести к повышению ее эффективности.

Приведенные данные об эффективности экспериментальной модели плоской гасящей системы позволяют сделать следующие выводы:

1) теоретические основы создания гасящих активных систем, основанных на методе ортогональных пространственных гармоник, подтверждены экспериментальными данными по исследованию эффективности модели плоской активной системы;

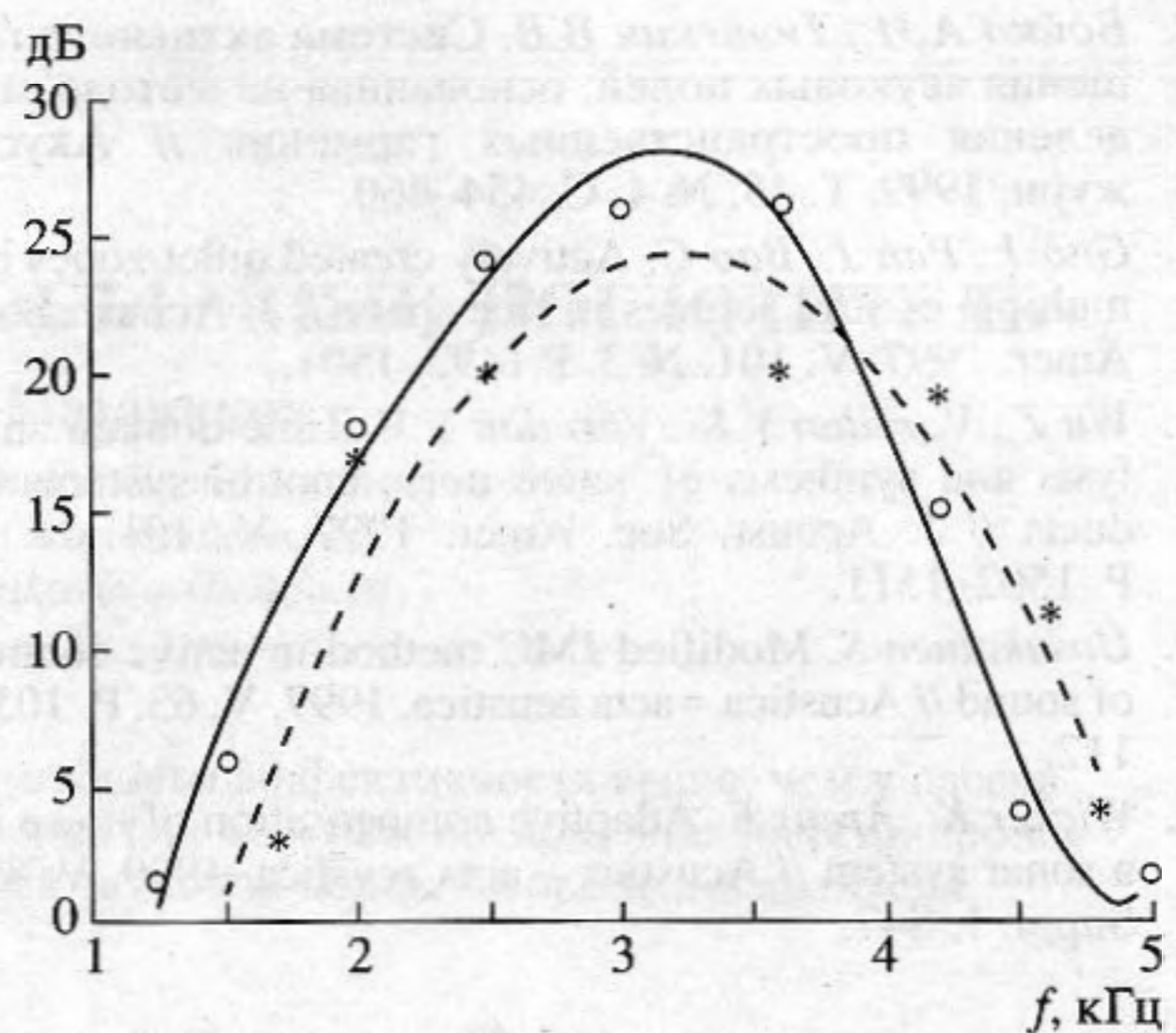


Рис. 3. Частотная зависимость эффективности плоской активной системы. o – гармоника с $n = 0$, * – гармоника с $n = 1$.

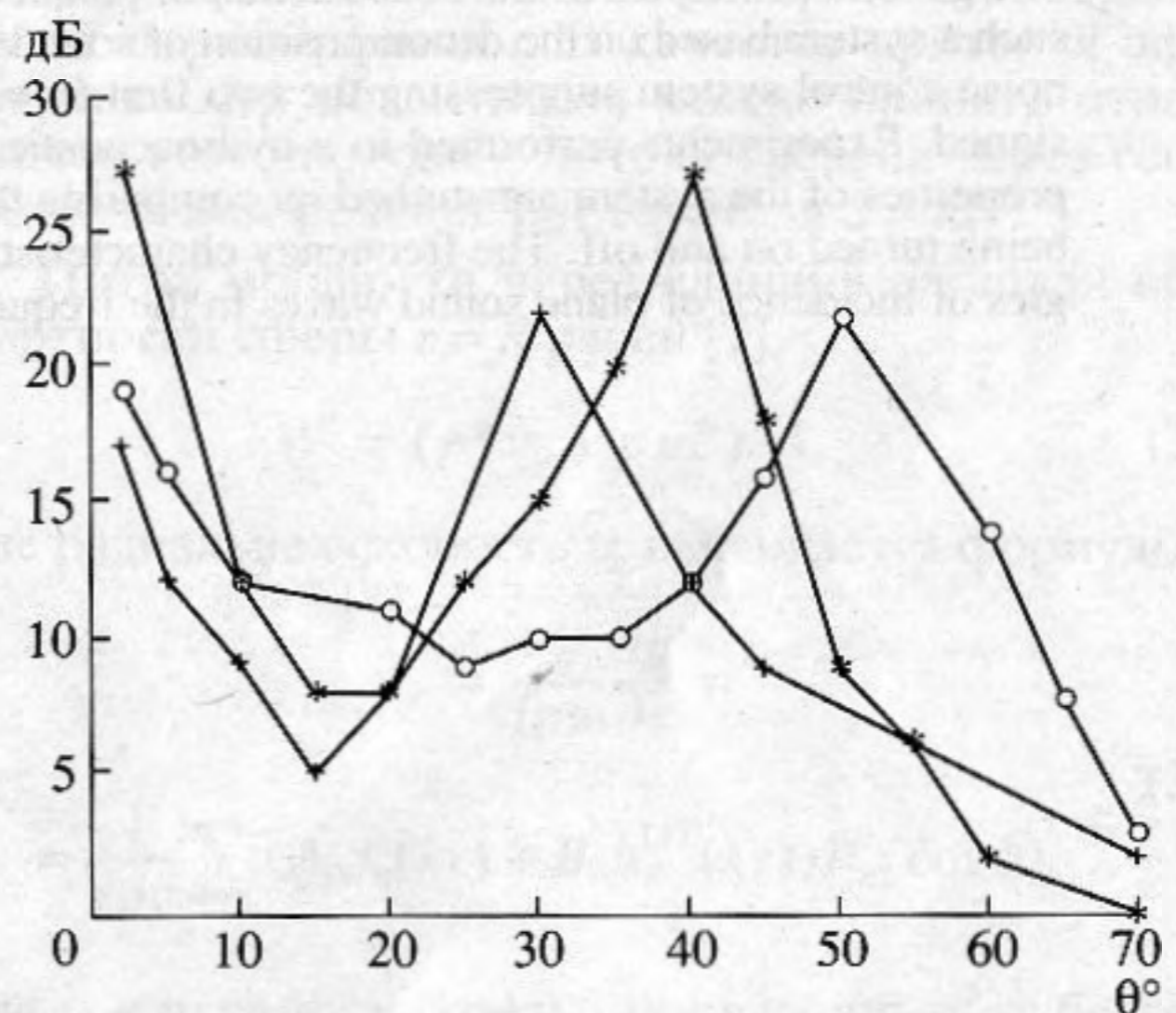


Рис. 4. Угловая зависимость эффективности плоской активной системы (θ_0 – угол падения плоской волны). Частота (кГц): 2.3 (+), 3(*), 4 (o).

2) разработанная структура плоской активной системы может быть (с определенными модификациями) распространена на другие формы ортогональных пространственных гармоник.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-16231).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тютюкин В.В. Модель плоской активной звукопоглощающей системы // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 238–243.

2. Бойко А.И., Тютекин В.В. Система активного гашения звуковых полей, основанная на методе выделения пространственных гармоник // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 454–460.
3. Guo J., Pan J., Bao C. Actively created quiet zones by multiple control sources in free space // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 3. P.1492–1501.
4. Wu Z., Varadan V.K., Varadan V.V. Time-domain analysis and synthesis of active noise control systems in ducts // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 3. P. 1502–1511.
5. Uosukainen S. Modified JMC method in active control of sound // Acustica – acta acustica. 1997. V. 63. P. 105–112.
6. Wicker K., Arens E. Adaptive compensation of noise in a sonar system // Acustica – acta acustica. 1999. V. 85. Suppl. 1. S47.
7. Fuller C.R., Cambou P.E. A distributed active vibration absorber for sound radiation and vibration control // Acustica – acta acustica. 1999. V. 85. Suppl. 1. S102.
8. Завадская М.П., Попов А.В., Эгельский Б.Л. Об одном приближенном решении задачи активного гашения звуковых полей по методу Малюжинца // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 6. С. 882–887.
9. Мазаников А.А., Тютекин В.В., Федорюк М.В. Активное гашение звуковых полей методом пространственных гармоник // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 5. С. 759–763.
10. Коротаев Е.В., Мазаников А.А. Об активном гашении звука ограниченной плоской решеткой // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 4. С. 539–543.
11. Мазаников А.А., Тютекин В.В. Об эффективности и устойчивости автономных систем гашения звука // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 5. С. 788–791.

Experimental Study of a Planar Active Noise Control System

E. V. Korotaev and V. V. Tyutekin

The general principles of the construction of planar active noise control systems are discussed. A flow chart of such a system based on the decomposition of sound fields into spatial harmonics is presented. An experimental noise control system suppressing the two first ($n = 0$ and $n = 1$) horizontal harmonics of a sound field is designed. Experiments performed in a hydroacoustic basin with this system are described. The soundproofing properties of the system are studied by comparing the sound levels measured behind the system with the latter being turned on and off. The frequency characteristics of the system efficiency are presented for different angles of incidence of plane sound waves in the frequency range 1–5 kHz.