АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1999, том 45, № 4, с. 454–460

УДК 534.38

СИСТЕМА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК

© 1999 г. А. И. Бойко, В. В. Тютекин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 18.12.98 г.

Рассмотрена задача активного гашения поля, основанная на методе разделения этого поля на пространственные гармоники. В качестве пространственных гармоник берутся волновые функции Ламе, возникающие при решении уравнения Гельмгольца в эллипсоидальной системе координат – наиболее общей системе координат, в которой уравнение Гельмгольца допускает разделение переменных. Исследована работа системы активного гашения поля, состоящая из дискретного набора монопольных приемников и излучателей, расположенных на софокусных трехосных эллипсоидах и приведена ее блок-схема с описанием принципов работы каждого блока и связей между ними.

Задача снижения уровней шумовых или отраженных звуковых полей обычно решается применением звукоизолирующих или звукопоглощающих материалов и конструкций. Однако такие материалы успешно работают только на сравнительно высоких частотах, поскольку на низких частотах (сотни герц – единицы килогерц) их толщина и масса становятся чрезмерно большими. Именно в этих диапазонах частот могут найти себе применение так называемые активные методы гашения акустических полей.

Хотя впервые о возможности создания таких систем было упомянуто около 60 лет тому назад, широкие научные исследования получили развитие только в последние 15–20 лет, причем с каждым годом число работ в этом направлении быстро возрастает.

Точное решение задачи об активном гашении звука в некоторой (ограниченной или неограниченной) области пространства было дано Г.Д. Малюжинцем [1] и позднее развито М.В. Федорюком [2]. Частично эти же идеи были высказаны М. Жесселем [3], а для одномерных систем Свинбэнксом [4]. Из последних работ в различных областях общей проблемы активного гашения можно указать, например, на [5–10]. В основе предложенной в [1] и развиваемой в настоящей статье теории активного гашения звука лежит следующая модель. Пусть имеется замкнутая звукопрозрачная поверхность S_1, на которой непрерывно распределены точечные приемники давления (монополи) и нормальной скорости звука (диполи). Показания этих приемников при совместной обработке позволяют вычислить два первичных акустических поля.

Первое из этих полей создается только излучателями и рассеивателями, расположенными внутри поверхности S_1. Это поле может быть вычислено в любой точке пространства вне поверхности S_1. Второе поле возбуждается излучателями и рассеивателями, находящимися вне поверхности S_1. Оно может быть вычислено в любой точке внутри поверхности S_1. Первое поле будем называть внутренним по отношению к поверхности S_1, а второе – внешним.

Предположим далее, что существует еще одна замкнутая звукопрозрачная поверхность S_2, охватывающая поверхность S_1, на которой непрерывно распределены излучатели монопольного и дипольного типов. Идея активного гашения в постановке Малюжинца, которой мы здесь придерживаемся, состоит в следующем: необходимо, во-первых, возбуждать эти излучатели таким образом, чтобы поле, ими созданное, было равно нулю внутри поверхности S_2, что исключит влияние полей излучателей на показания приемников, а во-вторых, вне поверхности S_2 излучатели должны создать такое же поле, что и источники, расположенные внутри поверхности S_1, но с противоположным знаком. Поэтому в результате работы такой системы суммарное акустическое поле останется неизменным внутри поверхности S_2, а вне поверхности S_2 поле будет таким, каким было бы при отсутствии источников и рассеивателей внутри поверхности S_1. Таким образом, излучающая S_2 и приемная S_1 поверхности обладают свойством однонаправленной поверхности Гюйгенса, то есть они способны излучать (принимать) поле только с одной стороны и ничего не излучать в другую

сторону и не принимать поле от источников, расположенных с другой стороны поверхности.

Если внутри поверхности S_1 отсутствуют активные источники звука, а расположены только пассивные рассеиватели, то задача активного гашения допускает и другое решение. А именно, излучающую поверхность S_2 можно расположить целиком внутри поверхности S_1 так, чтобы она охватывала все пассивные рассеиватели. При этом излучатели, расположенные на поверхности S_2, ничего не должны излучать вне поверхности S_2, а внутри создать поле, равное полю излучателей, расположенных вне поверхности S_1, но с противоположным знаком. Таким образом, внутри S_2 создастся зона акустической "тишины", а поле вне поверхности S_2 останется невозмущенным.

Математически свойство однонаправленности излучающей и приемной поверхностей основывается на интегральной формуле Грина, которая связывает значение функции, являющейся решением уравнения Гельмгольца, в произвольной точке пространства со значениями этой функции и ее нормальной производной на некоторой замкнутой гладкой поверхности.

Таков общий принцип построения активных систем гашения звука, основанных на применении приемно-излучающих поверхностей Гюйгенса. Эти системы являются автономными, поскольку не зависят от свойств пассивных рассеивателей и сторонних источников звука, и устойчивы к самовозбуждению, так как отсутствует акустическая связь между приемной и излучающей поверхностями.

Описанное выше решение задачи активного гашения поля является универсальным и строгим. Оно определяет структуру приемной и излучающей систем, а также задает связь между ними. Однако при практической реализации такой системы возникают существенные трудности. Во-первых, при дискретном расположении приемников и излучателей малого размера на поверхностях S_1 и S_2 при достаточно высокой верхней частоте диапазона, на котором должна работать система, а также при условии обеспечения существенной степени гашения поля, число излучателей и приемников (равное, например, N) на каждой из поверхностей должно быть весьма велико. Число необходимых каналов связи между приемной и излучающей поверхностями будет и того больше и равно N^2, поскольку в предложенной модели каждый приемник должен быть связан с каждым излучателем. Вторая трудность заключается в том, что если условие отсутствия акустической обратной связи между приемниками и излучателями выполняется лишь приближенно, в силу конечного числа приемников и излучателей, то в принципе возможно самовозбуждение системы даже без внешнего поля.

С целью количественной оценки точности разделения полного акустического поля приемной поверхностью на внешнее и внутреннее поля, а также создания гасящего поля излучающей поверхностью, было введено понятие волновой плотности [11]. Волновая плотность связывает число приемников и излучателей на единицу площади поверхности в единицах λ, где λ – длина звуковой волны. Волновая плотность $\rho_N = \lambda\sqrt{\frac{N}{S}}$, где S – полная площадь поверхности. Численные эксперименты показали, что увеличение волновой плотности сверх некоторого минимального значения не дает большого выигрыша, так как погрешность убывает лишь логарифмически. Кроме того, было найдено наименьшее расстояние между приемной и излучающей поверхностями, когда погрешность этой аппроксимации не превышает заданного уровня.

Интерпретация излучающей и приемной частей дискретной системы активного гашения как сумм Римана интегралов, приближающих потенциалы простого и двойного слоев, распределенных непрерывно по соответствующим поверхностям, существенно упрощается, если уравнение Гельмгольца на этих поверхностях допускает разделение переменных. Это происходит, когда поверхности являются координатными. Тогда акустические поля на этих поверхностях удобно представить в виде суперпозиции соответствующих этим поверхностям гармоник. А задача выделения из полного поля каждой гармоники и последующего ее гашения по существу – одномерна.

Этот подход использования модовой системы гашения поля и вплотную примыкающую к ней систему гашения полей в регулярных волноводах, поскольку конечное число распространяющихся в волноводе нормальных волн можно трактовать как конечное число нормальных мод в свободном пространстве, подробно исследован в работах [12–18].

В настоящей статье содержится дальнейшее развитие метода активного гашения поля, основанного на использования нормальных гармоник поля, и дается структурная схема активной системы гашения, работающей на этом принципе.

Из всех ортогональных систем координат, в которых разделяются переменные в уравнении Гельмгольца, наибольший интерес представляют декартовы, цилиндрические, сферические и эллипсоидальные. В настоящей работе мы будем рассматривать эллипсоидальную систему координат.

Заметим, кроме того, что поверхность S_1, на которой расположены монопольные и дипольные приемники, может быть заменена [19] на две поверхности, на каждой из которых расположены только монопольные приемники. Точно так же излучающую поверхность S_2 можно заменить двумя излучающими поверхностями, на каждой из которых расположены только излучатели монопольного типа. С теоретической точки зрения

оба варианта совершенно равноправны, но с точки зрения практической реализации последний вариант более выгоден, поскольку монопольно-дипольный вариант обладает более низкой энергетической эффективностью, связанной с близко расположенными излучателями, которые работают со значительным сдвигом фаз.

Рассмотрим [20] решение уравнения Гельмгольца

$$(\Delta + k^2)p = 0 \qquad (1)$$

в эллипсоидальной системе координат, наиболее общей системе координат, в которой уравнение Гельмгольца допускает разделение переменных. Остальные десять ортогональных систем координат, в которых уравнение Гельмгольца можно решать методом разделения переменных, получаются из эллипсоидальной с помощью различных предельных переходов по параметрам.

Эллипсоидальные координаты z_1, z_2, z_3 связаны с декартовой системой координат x_1, x_2, x_3 следующим уравнением:

$$\frac{x_1^2}{z-a_1} + \frac{x_2^2}{z-a_2} + \frac{x_3^2}{z-a_3} = 1,$$

где числа $a_1 < a_2 < a_3$ фиксированы. Последнее уравнение есть уравнение 3-его порядка относительно переменной z и при условии, что точка x_1, x_2, x_3, не лежит на фокальной поверхности ($x_1x_2x_3 \neq 0$), имеет ровно три вещественных корня, таких что $a_1 < z_1 < a_2 < z_2 < a_3 < z_3$. Поверхности $z_1 = \text{const}$ являются двуполостными гиперболоидами, $z_2 = \text{const}$ – однополостные гиперболоиды, $z_3 = \text{const}$ – трехосные эллипсоиды. Все эти поверхности образуют конфокальное семейство. Таким образом, через каждую точку (z_1, z_2, z_3), для которой $x_1x_2x_3 \neq 0$, проходят три поверхности второго порядка, принадлежащие различным конфокальным семействам.

Имеют место формулы:

$$x_j^2 = \frac{g(a_j)}{f'(a_j)}, \quad h_j^2 = -\frac{1}{4}\frac{g'(z_j)}{f(z_j)},$$

где h_j – коэффициенты Ламе. Заметим, что наиболее важные для модовой схемы гашения поля системы координат следуют из эллипсоидальной соответствующими предельными переходами параметров a_i. Так, например, при $a_3 \longrightarrow a_2$ получим вытянутые сфероидальные координаты, переход $a_1 \longrightarrow a_2$, а затем $a_3 \longrightarrow a_2$ дает сферическую систему координат, $a_1 \longrightarrow a_2$, $a_3 \longrightarrow \infty$ дает полярную систему координат, $a_3 \longrightarrow \infty$, $a_2 \longrightarrow \infty$ – декартову систему координат.

Уравнение (1) имеет частные решения вида:

$$p(x_1, x_2, x_3) = W_1(z_1)W_2(z_2)W_3(z_3). \qquad (2)$$

Каждая из функций W_j удовлетворяет волновому уравнению Ламе:

$$\left[f^{\frac{1}{2}}(z_j)\frac{d}{dz_j}f^{\frac{1}{2}}(z_j)\frac{d}{dz_j} + \frac{1}{4}q(z_j)\right]W_j(z_j) = 0, \qquad (3)$$

где $q(z_j) = h - lz_j + k^2z_j^2$, $j = 1, 2, 3$,

соответственно на интервалах $a_1 < z_1 < a_2$, $a_2 < z_2 < a_3$, $a_3 < z_3 < \infty$. Константы h и l являются константами разделения переменных. Волновой функцией Ламе называется решение уравнения (3), имеющее вид:

$$W(z) = \sqrt{(z-a_1)^{i_1}}\sqrt{(z-a_2)^{i_2}}\sqrt{(z-a_3)^{i_3}}\Psi(z). \qquad (4)$$

Здесь i_j принимает значения 0 или 1, $\Psi(z) \neq 0$ – целая функция. Точка (h, l) есть точка спектра уравнения (3), если существует решение вида (4). Функции $W_1(z_1)$, $W_2(z_2)$ называются угловыми волновыми функциями Ламе, функция $W_3(z_3)$ – радиальной, функция $\Psi(z_1, z_2) = W_1(z_1)\,W_2(z_2)$ – поверхностной.

Поверхностные функции Ламе Ψ_1 и Ψ_2, отвечающие различным точкам спектра, ортогональны с весом

$$\rho(z_1, z_2) = (z_2 - z_1)/\sqrt{-f(z_1)f(z_2)}$$

по прямоугольнику $a_1 < z_1 < a_2$, $a_2 < z_2 < a_3$.

Имеются два вида радиальных функций Ламе. Функции $W_3^{(1)}(z_3)$ удовлетворяют условию типа $i_3 = 0$ либо $i_3 = 1$ в точке a_3 и используются при решении внутренних задач. Функции $W_3^{(3)}(z_3)$ удовлетворяют условию излучения Зоммерфельда на бесконечности и используются при решении внешних задач. Верхний индекс у этих функций выбран так же, как и для сфероидальных функций. Занумеруем точки спектра и присвоим индекс n функциям Ламе, отвечающим n-ой точке спектра.

Перейдем теперь к описанию работы системы активного гашения поля, работающей на основе выделения из полного поля нормальных гармоник в эллипсоидальной системе координат z_1, z_2, z_3. В эту систему входят две группы монопольных приемников, расположенных соответственно на двух поверхностях $z_3 = c_1$ и $z_3 = c_2$, где $c_2 > c_1$. Каждая группа содержит по N приемников, где N – число мод внешнего поля, подлежащих гашению. Если максимальное расстояние между соседними приемниками в каждой группе меньше $\lambda/2$, то такое количество приемников может обеспечить точное интегрирование соответствующей гармоники при правильном выборе квадратурной формулы (весовых коэффициентов ρ_{jn}). Аналогичным образом, на двух поверхностях $z_3 = c_3$ и $z_3 = c_4$, где $c_2 < c_3 < c_4$ расположено по N монопольных излучателей, расстояние между которыми в преде-

лах одной поверхности также меньше $\lambda/2$. Задача выделения из полного поля n-ой гармоники, где $n \le N$, имеющей вид произведения функций $\Psi_n(z_1, z_2)$ $W_{3n}(z_3)$, зависящих от различных координат и номера гармоники n, в этом случае решается достаточно просто. В силу ортогональности гармоник с различными номерами следует просто просуммировать показания всех приемников на каждой из поверхностей $z_3 = c_q$, при $q = 1, 2$ и имеющих координаты (z_{1j}, z_{2j}, c_q) с весом

$$\rho_{jn} = \rho(z_{1j}, z_{2j})\Psi_n(z_{1j}, z_{2j}) = \\ = \frac{(z_{2j} - z_{1j})}{\sqrt{-f(z_{1j})f(z_{2j})}}\Psi_n(z_{1j}, z_{2j}).$$

В результате такого суммирования получим пару комплексных числе $A_{1n}(c_1)$ и $A_{2n}(c_2)$, имеющих следующий вид:

$$A_{qn}(c_q) = \sum_{j=1}^{N} p_q(z_{1j}, z_{2j}, c_q)\rho(z_{1j}, z_{2j})\Psi_n(z_{1j}, z_{2j}), \\ q = 1, 2; \quad n = 1, \ldots, N. \tag{5}$$

Здесь величина $p_q(z_{1j}, z_{2j}, c_q)$ есть значение акустического давления полного поля, измеренное точечным монопольным приемником, помещенным в точку с координатами (z_{1j}, z_{2j}, c_q). $A_{qn}(c_q)$ – значение амплитуды n-ой гармоники полного поля p на поверхности $z_1 = c_q$. Дальнейшая обработка полученной пары чисел $A_{1n}(c_1)$ и $A_{2n}(c_2)$ состоит в том, что они должны быть интерпретированы как результат интерференции двух мод полей внешних и внутренних источников. Обозначим амплитуду n-ой гармоники внутреннего источника через U_{2n}, а амплитуд внешних – через U_{1n}. Так как поле внешних источников не имеет особенностей внутри поверхности $z_3 = c_2$, а поле внутренних источников такую особенность имеет, можно написать следующую систему двух уравнений:

$$A_{1n}(c_1) = U_{1n}W_{3n}^{(1)}(c_1) + U_{2n}W_{3n}^{(3)}(c_1), \\ A_{2n}(c_2) = U_{1n}W_{3n}^{(1)}(c_2) + U_{2n}W_{3n}^{(3)}(c_2), \tag{6}$$

решение которой

$$U_{1n} = \frac{A_{1n}(c_1)W_{3n}^{(3)}(c_2) - A_{2n}(c_2)W_{3n}^{(3)}(c_1)}{\Delta_n(c_1, c_2)}, \\ U_{2n} = \frac{A_{2n}(c_2)W_{3n}^{(1)}(c_1) - A_{1n}(c_1)W_{3n}^{(1)}(c_2)}{\Delta_n(c_1, c_2)}, \tag{7}$$

$$\Delta_n(c_1, c_2) = W_{3n}^{(1)}(c_1)W_{3n}^{(3)}(c_2) - W_{3n}^{(1)}(c_2)W_{3n}^{(3)}(c_1), \\ n = 1, 2, \ldots, N,$$

определяет соответствующие амплитуды и фазы этих гармоник на приемных поверхностях, обеспечивая при этом свойство однонаправленного приема.

Условием разрешимости системы (6) является условие $\Delta_n(c_1, c_2) \ne 0$, означающее, что волновое число k уравнения (1) не совпадает с собственным значением задачи Дирихле для слоя $c_1 < z_3 < c_2$.

Монопольные излучатели, расположенные на поверхностях $z_3 = c_3$ и $z_3 = c_4$ должны быть настроены таким образом, чтобы их совместное поле излучения внутри поверхности $z_3 = c_3$ в первых N гармониках было равно нулю (с целью исключить "засветку" приемников и, следовательно, самовозбуждение системы), а поле, излученное наружу, было бы равно полю N первых гармоник поля внутренних источников, но с обратным знаком. С этой целью на излучатели, расположенные на поверхностях $z_3 = c_3$ и $z_3 = c_4$ и имеющие координаты (z_{1m}, z_{2m}, c_q), где $q = 3, 4$; $m = 1, \ldots, N$, следует с соответствующей задержкой, равной времени прохождения сигнала между приемными и излучающими поверхностями, подать сигналы с амплитудами B_{1m} на поверхности $z_3 = c_3$ и B_{2m} на поверхности $z_3 = c_4$, которые являются решениями следующей системы:

$$\sum_{m=1}^{N} [B_{1m}W_{3n}^{(1)}(c_3) + B_{2m}W_{3n}^{(1)}(c_4)]\Psi_n(z_{1m}, z_{2m}) = -U_{2n}, \\ \sum_{m=1}^{N} [B_{1m}W_{3n}^{(3)}(c_3) + B_{2m}W_{3n}^{(3)}(c_4)] \times \\ \times \Psi_n(z_{1m}, z_{2m}) = 0, \quad n = 1, \ldots, N. \tag{8}$$

Система (8) является математической записью свойства однонаправленного излучения системы активного гашения. Здесь величина U_{2n} определяется формулами (7). Система (8) очевидным образом преобразуется к виду

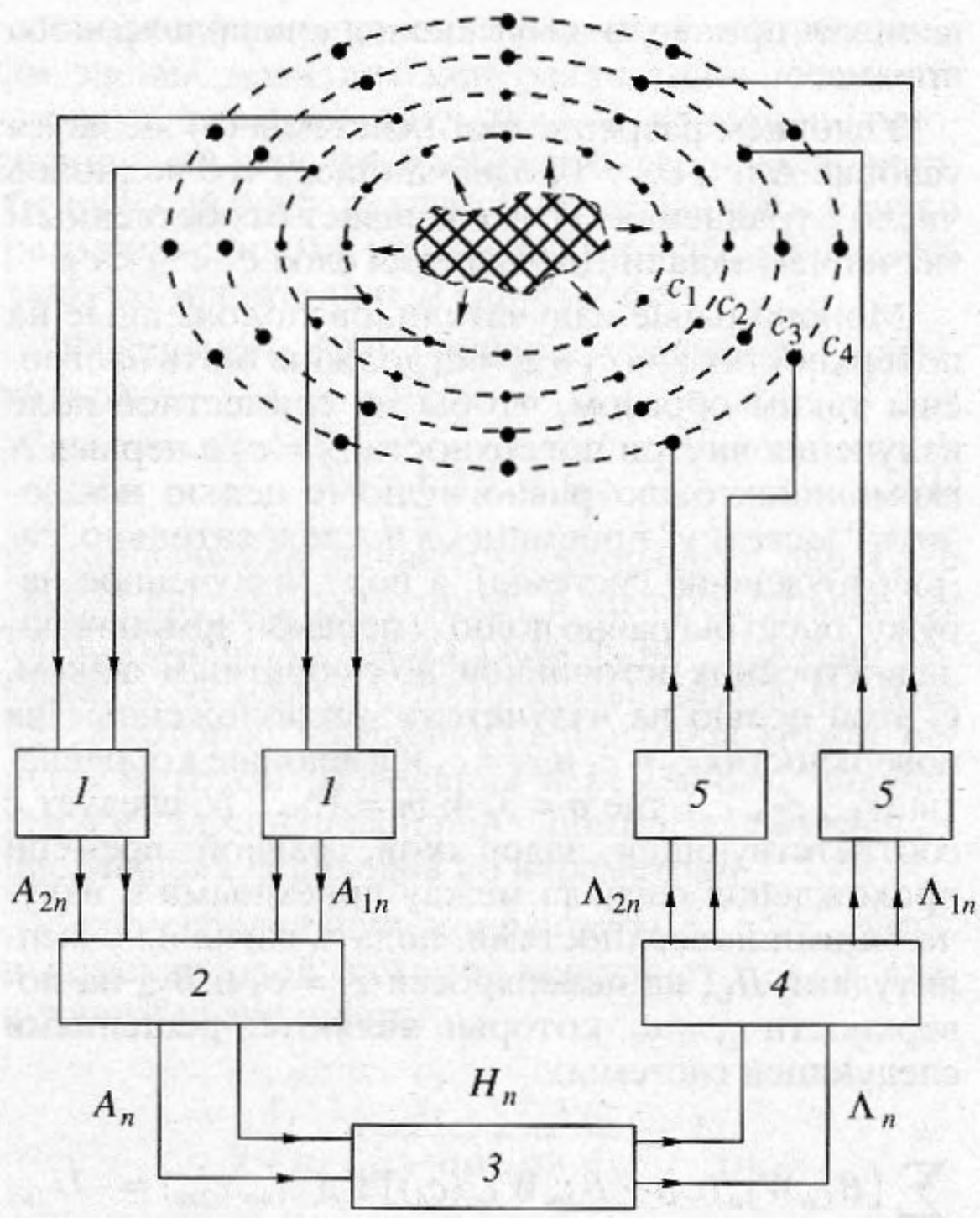
$$\sum_{m=1}^{N} B_{1m}\Psi_n(z_{1m}, z_{2m}) = U_n^{(3)}, \\ \sum_{m=1}^{N} B_{2m}\Psi_n(z_{1m}, z_{2m}) = U_n^{(4)}, \tag{9}$$

где

$$U_n^{(3)} = -\frac{U_{2n}W_{3n}^{(3)}(c_4)}{\Delta_n(c_3, c_4)}, \quad U_n^{(4)} = -\frac{U_{2n}W_{3n}^{(3)}(c_3)}{\Delta_n(c_3, c_4)}; \\ n = 1, \ldots, N.$$

В силу ортогональности поверхностных гармоник с весом ρ просуммируем левые и правые части системы (9) с весом

$$\rho_{nm} = \frac{(z_{2m} - z_{1m})W_{1n}(z_{1m})W_{2n}(z_{2m})}{\sqrt{-f(z_{1m})f(z_{2m})}}.$$



Блок-схема системы активного гашения поля. *1* – Блоки анализаторов пространственных гармоник, *2* – блок однонаправленного приема, *3* – средний блок, *4* – блок однонаправленного излучения, *5* – блоки синтезаторов пространственных гармоник.

В результате такой процедуры получим для величин B_{1m} и B_{2m} следующие выражения:

$$B_{qm} = \sum_{n=1}^{N} \rho_{nm} U_n^{(q+2)}, \quad q = 1, 2. \qquad (10)$$

Формулы (9) имеют смысл при условии, что $\Delta_n(c_3, c_4) \neq 0$, то есть волновое число k уравнения (1) не является собственным числом задачи Дирихле для слоя $c_3 < z_3 < c_4$.

Из анализа формул (7) и (8) вытекает еще одно естественное ограничение на волновое число, определяющее частоту работы системы, а именно: оно не может принимать такие значения, при которых порознь или одновременно выполняются условия $W_{3n}^{(1)}(c_1) = W_{3n}^{(1)}(c_2) = 0$ и $W_{3n}^{(1)}(c_3) = W_{3n}^{(1)}(c_4) = 0$ для $n \leq N$.

Оставшаяся непогашенной часть поля внутренних источников, содержащая гармоники с номерами $n > N$, может быть сделана по модулю сколь угодно малой путем выбора достаточно большого числа N.

Для отладки всей системы гашения и контроля ее работы необходимо вне поверхности $z_3 = c_4$ разместить еще одну систему приемных поверхностей $z_3 = c_5$ и $z_3 = c_6 > c_5$ с расположенными на них точечными монопольными приемниками. При этом сторонние источники звука (если таковые имеются) должны быть расположены на расстояниях z_3, бóльших c_6, то есть ни один из сторонних источников не должен попасть внутрь поверхности $z_3 = c_6$. Работа контрольной приемной системы полностью аналогична работе системы приемников, расположенных на поверхностях $z_3 = c_1$ и $z_3 = c_2$.

Формулы (5)–(10) дают решение задачи активного гашения эллипсоидальной гармоники номера n и при $n = 1, \ldots, N$. Предложенный метод гашения поля по ортогональным гармоникам требует всего N независимых каналов (для каждой гармоники свой) и дает возможность существенно снизить количество связей между приемниками и излучателями (в N раз) по сравнению с общей схемой, когда приемники и излучатели расположены на произвольных замкнутых поверхностях.

Приведем структурную схему работы системы активного гашения поля на примере гармоники номера n, где $1 \leq n \leq N$.

Акустические сигналы (см. рисунок) с помощью приемных поверхностей преобразуются в электрические сигналы, пропорциональные акустическому давлению полного поля в местах расположения точечных монопольных приемников, усиливаются и подаются на входы анализаторов пространственных гармоник *1*. Эти анализаторы осуществляют (аналоговым или цифровым способом) операцию скалярного умножения показаний N приемников на каждой поверхности и N-мерных векторов весовых коэффициентов поверхностных функций Ламе ρ_{jn}. Акустический аналог данной процедуры описывается формулой (5). Полученная пара сигналов поступает в блок однонаправленного приема *2*, в котором, согласно формулам (6) и (7), формируются сигналы, пропорциональные амплитуде гармоники номера n поля внутренних источников. Процедура формирования таких сигналов описывается выражением

$$A_n = -\left[A_{1n} - \frac{W_{3n}^{(1)}(c_1)}{W_{3n}^{(1)}(c_2)} A_{2n}\right] = U_{2n} \frac{\Delta_n(c_1, c_2)}{W_{3n}^{(1)}(c_2)}. \qquad (11)$$

$$n = 1, \ldots, N$$

Здесь коэффициент при A_{2n} увеличивает амплитуду пространственной гармоники внешнего поля на ту же величину, на которую произошло ее убывание при распространении от поверхности $z_3 = c_2$ до поверхности $z_3 = c_1$.

Сигналы A_n из выражения (11), пропорциональные величине U_{2n}-амплитуде суммарного по-

ля внутренних источников звука, подаются на средний блок *3*, осуществляющий электрическую связь между приемными и излучающими поверхностями. Эта связь описывается формулой,

$$\Lambda_n = A_n H_n,$$

где H_n-переходная характеристика среднего блока, имеющая вид

$$H_n = \frac{W_{3n}^{(1)}(c_2)W_{3n}^{(3)}(c_3)}{\Delta_n(c_1, c_2)\Delta_n(c_3, c_4)}.$$

Электрические сигналы с выходов среднего блока поступают в блок однонаправленного излучения *4*, где преобразуются в сигналы Λ_{1n} и Λ_{2n}, пропорциональные величинам $U_n^{(3)}$ и $U_n^{(4)}$ формул (8), (9) и подаются на входы синтезаторов пространственных гармоник гасящего поля (*5*).

Сигналы Λ_{1n} и λ_{2n} описываются выражениями вида

$$\Lambda_{1n} = \frac{U_n^{(3)}}{U_n^{(4)}}\Lambda_n, \quad \Lambda_{2n} = \Lambda_n.$$

Заметим, что отношение $U_n^{(3)}/U_n^{(4)}$, равное $W_{3n}^{(3)}(c_4)/W_{3n}^{(3)}(c_3)$, соответствует внесению поправки в амплитуду акустического сигнала, распространяющегося от источников, расположенных на поверхности $z_3 = c_3$, до поверхности $z_3 = c_4$. Выходные сигналы B_{1m} и B_{2m} с блоков синтезаторов пространственных гармоник, равные

$$B_{1m} = \sum_{n=1}^{N} \Lambda_{1n}\rho_{nm}, \quad B_{2m} = \sum_{n=1}^{N} \Lambda_{2n}\rho_{nm},$$

где $m = 1, \ldots, N$,

представляют собой две группы из N сигналов, причем каждый из сигналов в группах пропорционален величине B_{qm}, представленной формулой (10), соответствует амплитуде акустического давления в точке расположения отвечающего этому сигналу m-го монопольного излучателя, закрепленного на q-ой излучающей поверхности. Огибающая суммарного акустического поля всех излучателей, расположенных на обеих поверхностях, представляет собой при $z_3 > c_4$ расходящуюся пространственную гармонику номера n с амплитудой, равной $-U_{2n}$, и поэтому при интерференции с гармоникой того же номера поля внутренних источников происходит их взаимное гашение. Система активного гашения поля содержит N независимых каналов, работающих параллельно по описанной выше схеме. С целью экономии места на блок-схеме системы активного гашения не приведена группа контрольных приемников, расположенных на поверхностях $z_3 = c_5$ и $z_3 = c_6$ и охватывающих систему излучателей, поскольку, как уже указывалось выше, их работа полностью аналогична работе приемников, расположенных на поверхностях $z_3 = c_1$ и $z_3 = c_2$. Наличие контрольной системы приемников позволяет в случае сбоя работы всей системы через устройство адаптивного управления с помощью соответствующих алгоритмов управления итеративно воздействовать на перестраиваемые характеристики среднего блока *3* таким образом, чтобы минимизировать мощность выходных сигналов с блоков однонаправленного приема, соответствующих контрольным поверхностям $z_3 = c_5$ и $z_3 = c_6$. Уменьшение этих сигналов будет означать уменьшение амплитуды n-ой пространственной гармоники результирующего поля, измеряемого контрольными поверхностями.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малюжинец Г.Д.* Об одной теореме для аналитических функций и ее обобщениях для волновых потенциалов. 3-й Всесоюзный симпозиум по дифракции волн. М.: Наука, 1964.
2. *Федорюк М.В.* О работах Г.Д. Малюжинца по теории волновых потенциалов // Труды Акустического института, 1971. Вып. 15. С. 169–179.
3. *Jessel M.* Sur les absorbeurs actifs // 6 ICA. 1968. 4. F-5-6 (Tokyo).
4. *Swinbanks M.* The active control of sound propagation in the long ducts // J. Sound and Vibrat. 1973. № 27. P. 411–436.
5. *Uosukainen S.* Modified JMC Method in Active Control of Sound // ACUSTICA – acta acustica. 1997. V. 83. P. 105–112.
6. *Тютекин В.В.* Модель плоской активной звукопоглощающей системы // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 238–243.
7. *Laichle G.C., MacGillivray J.R., Swanson C.D.* Active control of axial-flow fan noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 1. P. 341–349.
8. *Kokowski P., Makarewicz R.* Interrupted trafic noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 1. P. 360–371.
9. *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.
10. *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.
11. *Федорюк М.В.* Дискретная аппроксимация поля цилиндрической и сферической излучающей поверхностей // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 6. С. 1146–1153.
12. *Бойко А.И., Иванов В.П.* О гашении поля излучающего цилиндра // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19. № 3. С. 494–500.

13. *Завадская М.П., Попов А.В., Эгельский Б.Л.* Об аппроксимации волновых потенциалов в задачах активного гашения звуковых полей по методу Малюжинца // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 5. С. 732–738.

14. *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.

15. *Мазаников А.А., Тютекин В.В., Уколов А.Т.* Активная система гашения акустических полей в многомодовом волноводе // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 3. С. 485–487.

16. *Бойко А.И., Иванов В.П.* О гашении поля излучения и дифракции кругового цилиндра // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 3. С. 9–16.

17. *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.

18. *Урусовский И.А.* Об активном гашении звука монополями, распределенными по одной поверхности // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 4. С. 585–594.

19. *Федорюк М.В.* Активное гашение звука непрерывными решетками из монополей // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 1. С. 113–118.

20. *Федорюк М.В.* Дифракция звуковых волн на трехосном эллипсоиде // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 1. С. 160–164.

Active Sound Control System Based on the Selection of Spatial Harmonics

A. I. Boiko and V. V. Tyutekin

Active sound control on the basis of the selection of spatial harmonics of the sound field is considered theoretically. The spatial harmonics are represented by the Lamé functions that appear as a result of the solution of the Helmholtz equation in an ellipsoidal coordinate system. The latter is the most general coordinate system in which the Helmholtz equation allows the separation of variables. The operation of an active sound control system consisting of a discrete set of monopole receivers and radiators arranged on the surfaces of confocal triaxial ellipsoids is studied. The block diagram of the system is presented, and the operation of its units as well as the relations between them are described.