
АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ. ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.83

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКОЙ

© 2023 г. А. В. Львов^а, *, В. А. Карасева^а, О. А. Потапов^а, А. М. Соков^а

^аИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: lvov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Рассмотрен принцип работы адаптивных систем активного гашения акустического широкополосного излучения. Приведено описание алгоритма работы данных систем, функционирующих при изменении характеристик среды, акустических или электрических параметров их элементов. Предложена модификация данного алгоритма, позволяющая увеличить эффективность работы системы и уменьшить уровень остаточных шумов излучения при калибровке системы. Приведены результаты проверки модифицированного алгоритма на имитационной модели системы активного гашения.

Ключевые слова: система активного гашения звука, автоматическая калибровка, адаптивное шумоподавление

DOI: 10.31857/S0320791922100148, **EDN:** YIZAVM

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос гашения акустических и вибрационных полей возникает при решении множества задач, таких как: снижение уровня шума в цехах промышленных предприятий, звукоизоляция жилых и производственных помещений [1, 2], создание систем шумоподавления для головных телефонов [3]. Традиционным способом решения данного вопроса является применение пассивных методов гашения, т.е. использование звукоизолирующих покрытий, демпферов, перегородок. Данный способ, несмотря на простоту и сравнительную дешевизну реализации, имеет недостаток, заключающийся в низкой эффективности пассивных методов на низких частотах [4]. Другим способом решения подобных задач является активное гашение, т.е. использование управляемых излучателей (акустических или вибрационных), создающих поле, снижающее суммарный уровень излучения в заданной области пространства.

Возможность активного гашения акустического излучения, создаваемого источниками, расположенными внутри замкнутой области, была теоретически обоснована в работе [5]. В дальнейшем различными авторами были предложены методы практической реализации подобных си-

стем. Достаточно подробный обзор используемых методов приведен в [6–8].

В данной работе рассмотрен способ, основанный на формировании поверхности из управляемых излучателей, расположенной вблизи источника, уровень акустического излучения которого необходимо снизить. Управление полем в заданной области пространства производится формированием сигналов, подаваемых на управляемые излучатели и обеспечивающих минимизацию мощности суммарного поля в заданных точках или области пространства.

В основе методов, применяемых для формирования сигналов, подаваемых на управляемые излучатели, часто лежит преобразование сигналов, регистрируемых опорными датчиками [6]. Под опорными датчиками понимаются акустические приемники или вибродатчики, располагаемые вблизи источников, создающих акустическое излучение и воздействующих на среду или элементы конструкций машин и механизмов. Рассмотрим подробнее основные методы, используемые для формирования напряжений, подаваемых на управляемые излучатели, и определим их недостатки.

Основным методом, используемым для формирования сигналов, подаваемых на управляе-

мые излучатели, является применение итерационных адаптивных алгоритмов. В основе этих алгоритмов лежит определение импульсных характеристик формирующих фильтров, преобразующих сигнал, регистрируемый опорными датчиками. При этом при помощи адаптивного алгоритма производится минимизация суммарной мощности излучения в точках, в которых располагаются приемные элементы. Известны способы реализации систем активного гашения, функционирующих во временной или частотной областях, в том числе с использованием оконного преобразования Фурье [9, 12]. Различными авторами также были предложены способы повышения скорости адаптации с использованием банка переключаемых фильтров и переменного шага градиентного спуска [10] или методов нечеткой логики [11]. Известен способ реализации системы активного гашения звуковых полей на дискретных частотах, не требующий для своей реализации обработки сигналов в режиме реального времени [13].

Применение перечисленных методов возможно только при наличии оценок импульсных характеристик путей распространения акустических волн для каждой из пар “управляемый излучатель—приемный элемент”. Это требует проведения процедуры калибровки, заключающейся в подаче калибровочного сигнала (например, коротких импульсов, полосового шума, широкополосного модулированного сигнала) на каждый из управляемых излучателей и вычислении требуемых передаточных характеристик. Однако это увеличивает время подготовки оборудования при использовании системы активного гашения. Кроме того, в случае изменения характеристик среды (например, при изменении температуры, перемещении отражающих поверхностей в помещении) или электрических и акустических параметров излучающих и приемных элементов может быть необходим периодический перезапуск процедуры калибровки. Данная проблема может быть решена путем подачи калибровочного сигнала на излучатели непосредственно в процессе работы системы активного гашения [14]. Однако при этом неизбежно вырастет уровень суммарного шумоизлучения системы гашения.

В данной работе показана модификация способа реализации системы активного гашения, приведенного в [14], направленная на улучшение сходности адаптивного алгоритма и повышение эффективности системы гашения, выражающееся в меньшем уровне мощности остаточного акустического поля. Под остаточным акустическим полем понимается суммарное акустическое поле, создаваемое источником шума и управляемыми

излучателями при функционирующей системе активного гашения.

Далее будет показан принцип работы адаптивных систем работы активного гашения.

АЛГОРИТМ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА

Рассмотрим работу широко применяемого [6–8] адаптивного алгоритма активного гашения, функционирующего во временной области, по структурной схеме, приведенной на рис. 1.

На данной схеме условно показаны: источник компенсируемого шума (“src”), опорный датчик (“ref”), набор J управляемых излучателей (“em”) и K приемных элементов остаточного поля (“res”). Блоком **H** показан адаптивный многоканальный фильтр, формирующий сигналы, подаваемые на управляемые излучатели, “LMS” — блок обновления коэффициентов адаптивного многоканального фильтра **H**, блок $\hat{S}$ — многоканальный фильтр с импульсными характеристиками, являющимися оценкой импульсных характеристик **S** путей распространения акустических волн от каждого из управляемых излучателей к приемным элементам. Сплошными линиями показаны пути распространения сигналов (электрических или цифровых при реализации системы на вычислительном устройстве), пунктирными — акустических волн.

Источник компенсируемого шума, воздействуя на элементы механизма или среду, создает акустические волны, регистрируемые приемными элементами. При этом сигнал на каждом из приемных элементов может быть представлен в виде свертки импульсной характеристики пути “источник компенсируемого шума—приемный элемент” с опорным сигналом, что можно записать в матричном виде как:

$$\mathbf{p}_k(n) = \mathbf{P}_k^T \mathbf{x}(n), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \dots x(n-L_p+1)]^T$, $x(n)$ — сигнал, регистрируемый опорным датчиком, $\mathbf{P}_k$ — импульсная характеристика пути распространения “источник компенсируемого шума— k -й приемный элемент” длиной L_p , n — номер отсчета ($n \geq 0$).¹ Создаваемое управляемыми излучателя-

¹ Здесь и далее индексы у обозначений векторов, матриц и трехмерных массивов означают вектор, составленный из элементов с соответствующими индексами, например, $\mathbf{A}_{ij} = [A_{ij1} \ A_{ij2} \dots A_{ijK}]^T$, где **A** — трехмерный массив размерностью $I \times J \times K$.

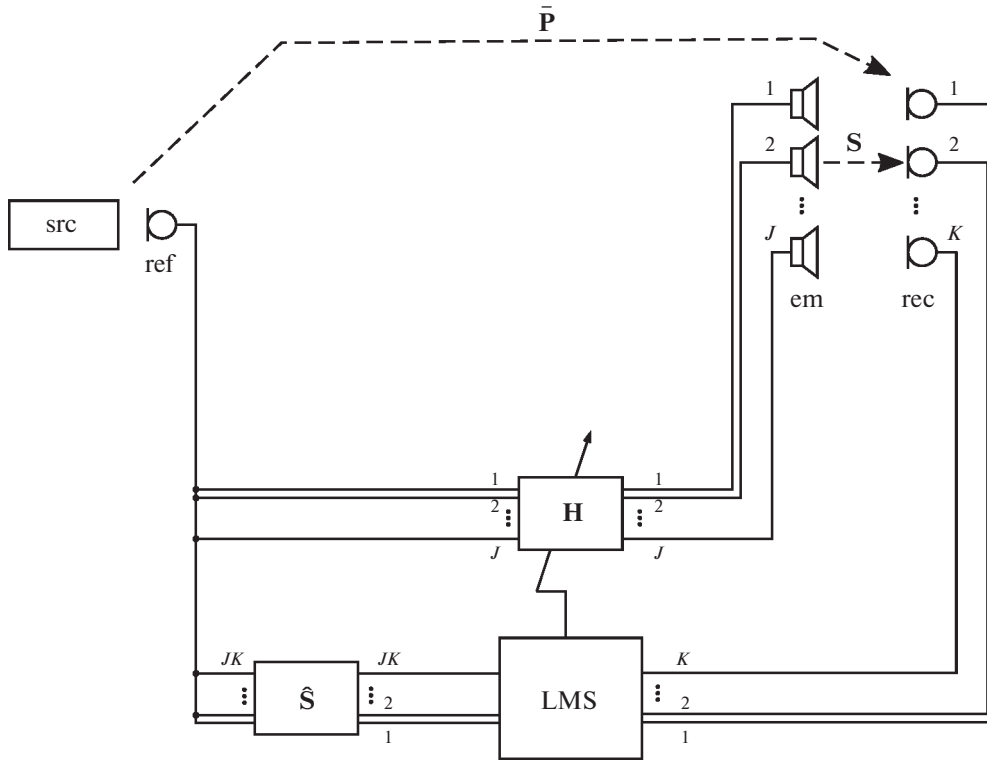


Рис. 1. Структурная схема базового алгоритма активного гашения.

ми поле, регистрируемое приемными элементами, определяется аналогичным образом:

$$\mathbf{s}_k(n) = \sum_{j=1}^J \mathbf{S}_{jk}^T \mathbf{y}_j(n), \quad (2)$$

где $\mathbf{y}_j(n) = [y_j(n) \ y_j(n-1) \dots y_j(n-L_s+1)]^T$, y_j — поле, создаваемое j -м управляемым излучателем в точке его расположения, $\mathbf{S}_{jk}$ — импульсная характеристика пути распространения “ j -й управляемый излучатель— k -й приемный элемент” длиной L_s . Суммарное поле, регистрируемое приемными элементами, при этом будет выглядеть как $\mathbf{e}(n) = \mathbf{p}(n) + \mathbf{s}(n)$. Выразим сигналы, подаваемые на управляемые излучатели, через сигнал с опорного датчика $x(n)$ в виде:

$$\mathbf{y}_j(n) = \mathbf{H}_j^T \mathbf{x}(n), \quad (3)$$

где $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \dots x(n-L_H+1)]^T$, $x(n)$ — сигнал, регистрируемый опорным датчиком, $\mathbf{H}_j$ — импульсная характеристика j -го канала формирующего фильтра длиной L_H .

Целью работы системы активного гашения является снижение суммарной мощности акустического излучения, регистрируемого приемными элементами. Поэтому задача поиска импульсных характеристик многоканального формирующего

фильтра сводится к следующей задаче оптимизации:

$$\mathbf{H} = \arg \min_{\mathbf{H}} \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^M \mathbf{e}^T(n) \mathbf{e}(n) \right], \quad (4)$$

где M — количество отсчетов, по которым производится усреднение мощности.

Следует заметить, что в импульсных характеристиках $\mathbf{P}$, $\mathbf{S}$ и $\mathbf{H}$ учтены передаточные характеристики управляемых излучателей и приемных элементов, а также датчика опорного сигнала.

Применим для решения задачи оптимизации (4) метод градиентного спуска, описываемый рекурсивным выражением: $\mathbf{H}(n+1) = \mathbf{H}(n) - \mu \nabla \mathbf{e}$, где параметр $\mu > 0$, называемый шагом градиентного спуска, определяет скорость и стабильность сходимости итерационного процесса. Используем также не точное значение градиента $\nabla \mathbf{e}$, а его оценку, вычисленную по мгновенным значениям $\mathbf{e}$. При этом коэффициенты формирующего многоканального фильтра будут определяться рекурсивным выражением [10]:

$$\mathbf{H}_j(n+1) = \mathbf{H}_j(n) - \sum_{k=1}^K \mu_{jk} \mathbf{f}_{jk}(n) \mathbf{e}_k(n), \quad (5)$$

характеристикой $\hat{S}_{jk}(n)$, такой, что сигнал на выходе данной системы при подаче на ее вход калибровочного сигнала приближается к сигналу, регистрируемому k -м приемным элементом от j -го излучателя.

Введение в систему дополнительного источника шума (n_a) негативно влияет на работоспособность алгоритма активного гашения, а также повышает уровень остаточного излучения. Кроме того, наличие компенсируемого шума также негативно влияет на процесс оценки импульсных характеристик S . Одним из способов снижения данных негативных эффектов является управление мощностью калибровочного сигнала, как показано в [14]. Однако это может вызывать возможное увеличение суммарной мощности остаточного акустического шума, обусловленное временным увеличением уровня калибровочного сигнала.

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ШУМА

Авторами был предложен способ, позволяющий производить оценку импульсных характеристик S в процессе работы системы активного гашения с возможностью снижения уровня калибровочного сигнала. Модификация алгоритма активного гашения показана на рис. 3 штрихпунктирной линией.

Данный способ основан на введении дополнительных адаптивных многоканальных фильтров, обеспечивающих разделение смеси компонент, создаваемых на приемных элементах компенсируемым источником x и управляемыми излучателями с подаваемым на них калибровочным сигналом n_a . Коэффициенты каждого из адаптивных многоканальных фильтров при этом определяют следующими рекурсивными выражениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{1jk}(n+1) &= \mathbf{W}_{1jk}(n) + \mu_{1jk} \mathbf{x}(n) \mathbf{e}_{1jk}(n), \\ \mathbf{W}_{2k}(n+1) &= \mathbf{W}_{2k}(n) + \mu_{2k} \mathbf{x}(n) \mathbf{e}_{2k}(n), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{n}_{aj}(n) = [n_{aj}(n) \ n_{aj}(n-1) \ \dots \ n_{aj}(n-L_{W_1}+1)]^T$, $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L_{W_2}+1)]^T$, $n_{aj}(n)$ и $x(n)$ — отсчеты калибровочного и опорного сигналов соответственно, W_1 и W_2 — импульсные характеристики дополнительных фильтров длиной L_{W_1} и L_{W_2} соответственно.

Оценки компонент поля, создаваемых компенсируемым источником $\mathbf{e}_{1k}$ и управляемыми излучателями с подаваемым на них калибровочным сигналом $\mathbf{e}_{2k}$, определяются как:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{1k}(n) &= \mathbf{e}_k(n) - \sum_{j=1}^J \mathbf{W}_{1jk}^T(n) \mathbf{n}_{aj}(n), \\ \mathbf{e}_{2k}(n) &= \mathbf{e}_k(n) - \mathbf{W}_{2k}^T(n) x(n). \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка импульсных характеристик $\hat{S}$ и $\mathbf{H}$ производится в соответствии с выражениями, аналогичными (5), (6), т.е.

$$\begin{aligned} \hat{S}_{jk}(n+1) &= \hat{S}_{jk}(n) + \\ &+ \mu_{jk} \mathbf{n}_{aj}(n) [e_{2k}(n) - \hat{S}_{jk}^T(n) \mathbf{n}_{aj}(n)], \\ \mathbf{H}_j(n+1) &= \mathbf{H}_j(n) - \sum_{k=1}^K \mu_{jk} \mathbf{f}_{jk}(n) \mathbf{e}_{1k}(n). \end{aligned} \quad (9)$$

Далее будут показаны результаты работы алгоритма активного гашения с предложенной модификацией на имитационной модели.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Проверка предложенного способа реализации системы активного гашения была проведена на имитационной модели. Моделировался фрагмент системы активного гашения акустического излучения виброактивного оборудования (например, станка для механической обработки материалов). В системе использовались планарная решетка управляемых излучателей с расположенной над ней планарной решеткой приемных элементов. Шаг обеих антенных решеток и расстояние между ними составляли 0.2 метра. Виброактивное оборудование имитировалось точечным источником звука, располагаемым вблизи жесткой стенки. Взаимное расположение элементов фрагмента системы гашения показано на рис. 4.

В качестве источника компенсируемого и калибровочного сигнала использовались генераторы шума с полосой 500–1000 Гц. Импульсные характеристики путей распространения акустических волн задавались при помощи метода, предложенного в [15]. Мощность калибровочного сигнала составляла около –30 дБ относительно средней мощности источника шума в точках расположения приемных элементов. Контролировались уровни подавления акустического поля в плоскости, расположенной на одном уровне с приемными элементами, а также в точках, располагаемых на расстоянии до 10 м от системы. Под уровнем подавления в точке понималось отношение мощностей сигнала, регистрируемого приемным элементом, расположенным в данной точке, до и после включения системы активного гашения.

После включения системы активного гашения происходит монотонное снижение суммарной

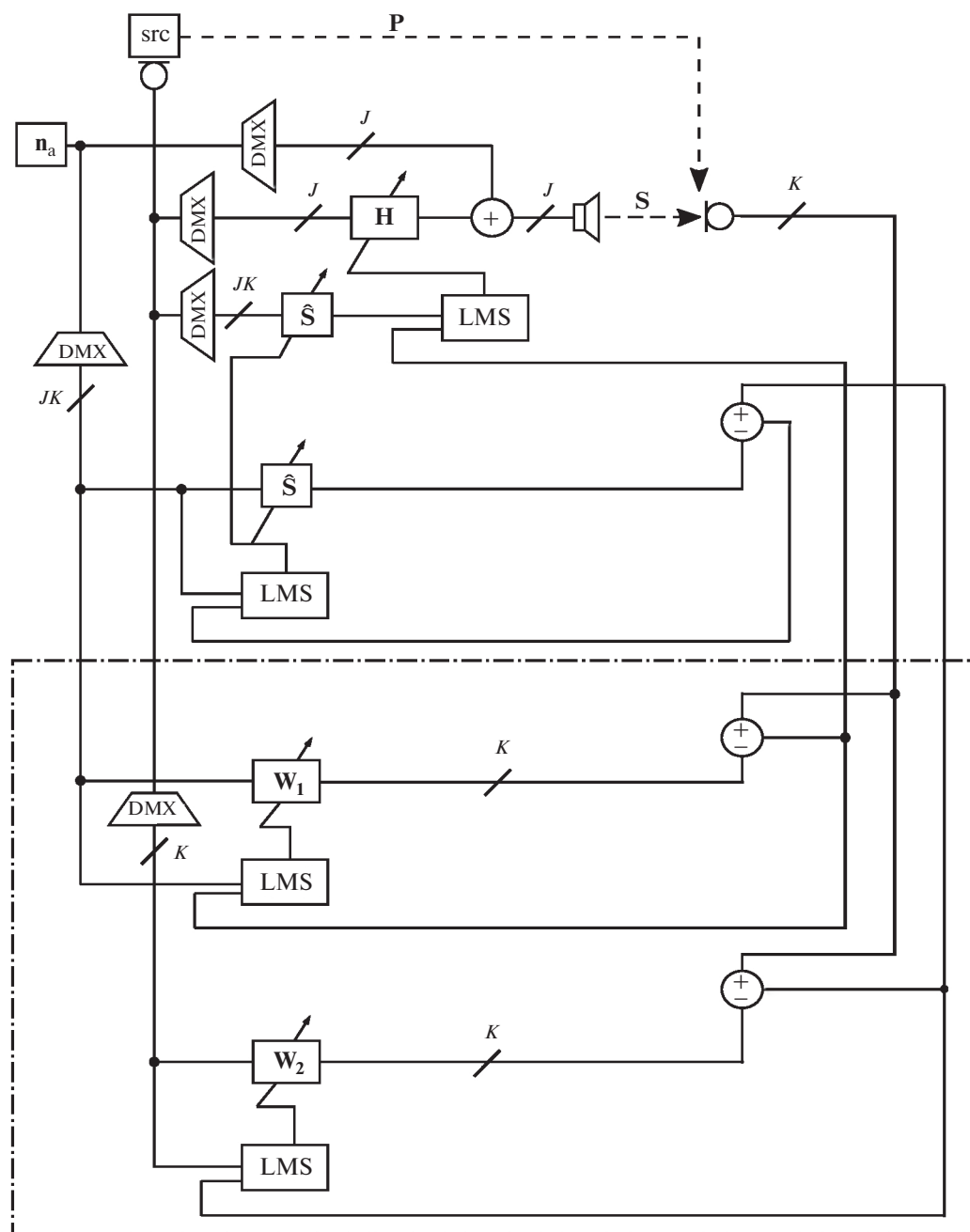


Рис. 3. Структурная схема модифицированной системы активного гашения с оценкой импульсных характеристик путей “управляемый излучатель—приемный элемент”.

мощности остаточного поля e в точках расположения приемных элементов по мере настройки адаптивного алгоритма (рис. 5).

Отсутствие низкочастотных составляющих остаточного поля e , наблюдаемое на рис. 5, обусловлено более ранним и более глубоким подавлением акустического поля на низких частотах по сравнению с полем на высоких частотах. Это подтверждается спектрограммой остаточного поля

на одном из приемных элементов, приведенной на рис. 6.

Распределение достигнутых уровней подавления приведено на рис. 7. На рис. 7а показано распределение уровней подавления в плоскости, расположенной на уровне приемных элементов, на рис. 7б — в плоскости, расположенной на расстоянии 5 м от жесткой стенки (рис. 4) параллельно плоскости XY , на рис. 7в — в плоскости XZ , на рис. 7г — на дуге окружности радиусом 10 м, рас-

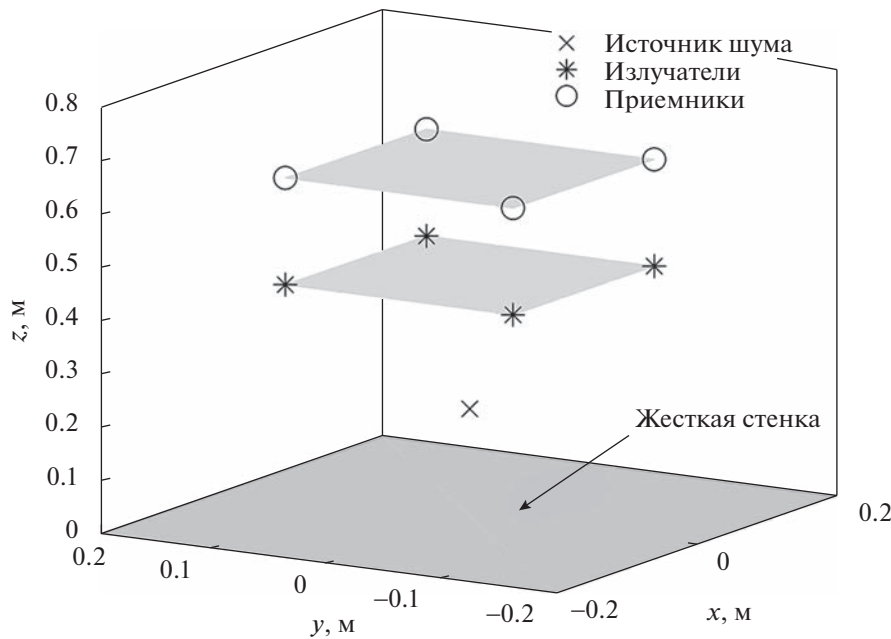


Рис. 4. Взаимное расположение элементов системы активного гашения.

положенной в плоскости XZ . Угол θ на рис. 7г — угол между направлением на точку дуги окружности и осью X .

Видно, что после включения системы гашения наблюдается высокий уровень подавления акустического поля (до 25 дБ) в точках расположения приемных элементов. В точках, максимально удаленных от приемных элементов, заметно снижение уровня подавления (до 10–15 дБ). При удалении от приемных и излучающих элементов наблюдается формирование области, в которой достигается подавление до 6 дБ. Вблизи конусообразной области происходит повышение суммарного уровня поля относительно уровня поля, формируемого источником компенсируемого шума. Размеры и форма области пространства, где наблюдается снижение уровня акустического поля, зависят от расположения приемных и излучающих элементов системы и, при необходимости, могут быть заданы соответствующим изменением геометрии системы. Некоторая неравномерность в распределении уровней обусловлена использованием адаптивных алгоритмов на основе стохастического градиентного спуска.

Была проведена также проверка снижения эффективности работы системы гашения при отключении подсистемы, обеспечивающей разделение смеси компенсируемого шума и калибровочного сигнала на компоненты e_{1k} и e_{2k} (см. (8)). Данная проверка показала, что при том же уровне калибровочного сигнала (–30 дБ относительно

средней мощности источника шума) система работает неустойчиво, оценка импульсных характеристик производится недостаточно точно и необходимого снижения уровня акустического излучения в точках расположения приемных элементов не происходит. Как показали численные эксперименты, для получения уровня подавления, аналогичного достигаемым предло-

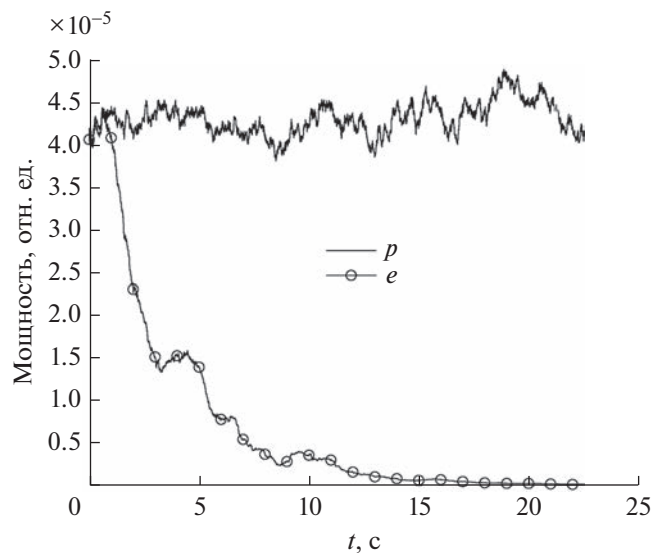


Рис. 5. Зависимость от времени мощности остаточного поля e на одном из приемных элементов и мощности поля p , создаваемого источником шума.

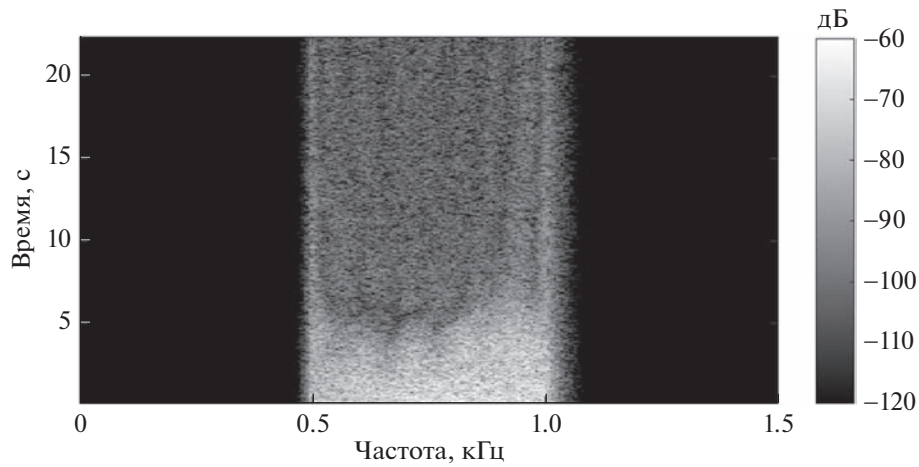


Рис. 6. Спектрограмма остаточного поля на одном из приемных элементов.

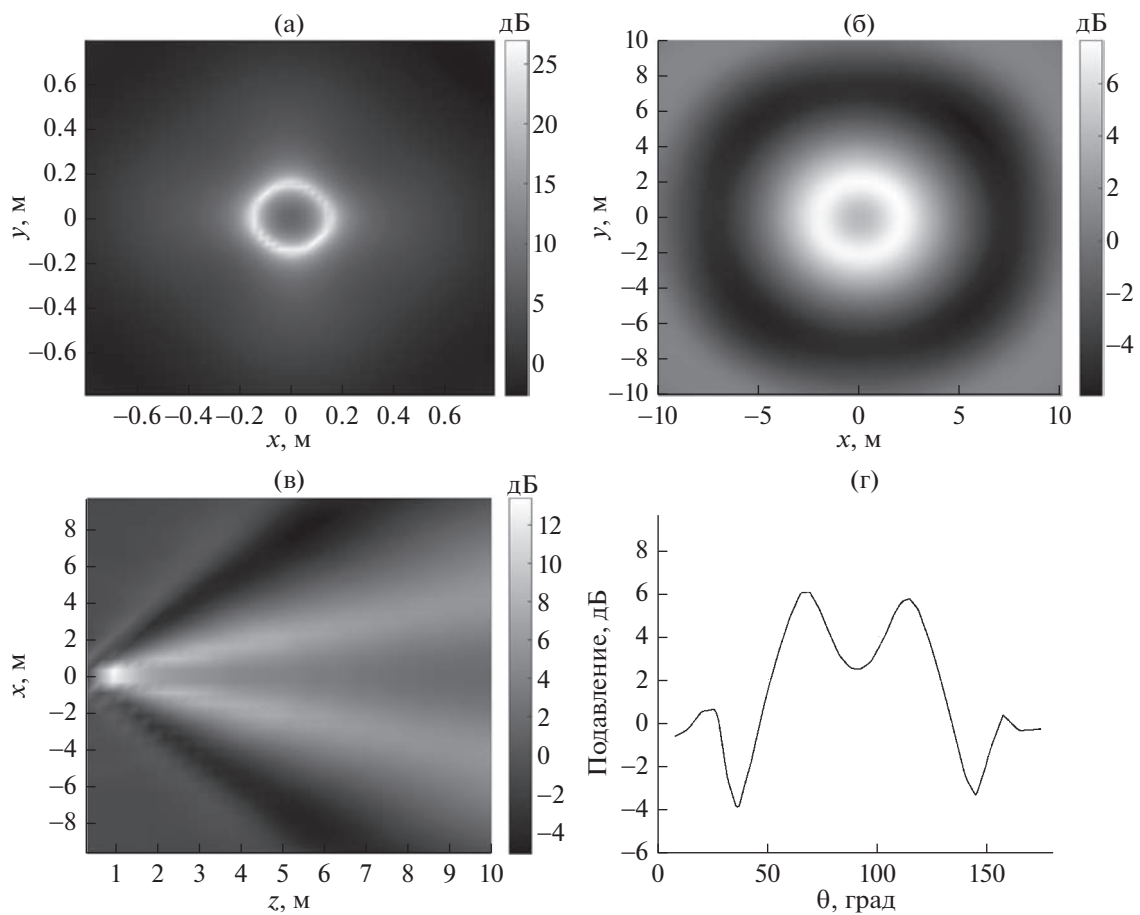


Рис. 7. Распределение уровней подавления акустического поля (а) — в плоскости, расположенной на уровне приемных элементов; (б) — в плоскости, расположенной на расстоянии 5 м от жесткой стенки параллельно плоскости XY; (в) — в плоскости XZ; (г) — на дуге окружности радиусом 10 м, расположенной в плоскости XZ.

женным алгоритмом, необходимо повышение уровня калибровочного сигнала на 14–20 дБ, что негативно сказывается на уровне мощности оста-

точного шума. Зависимости уровней подавления и остаточного поля на одном из приемных элементов от отношения мощности калибровочного

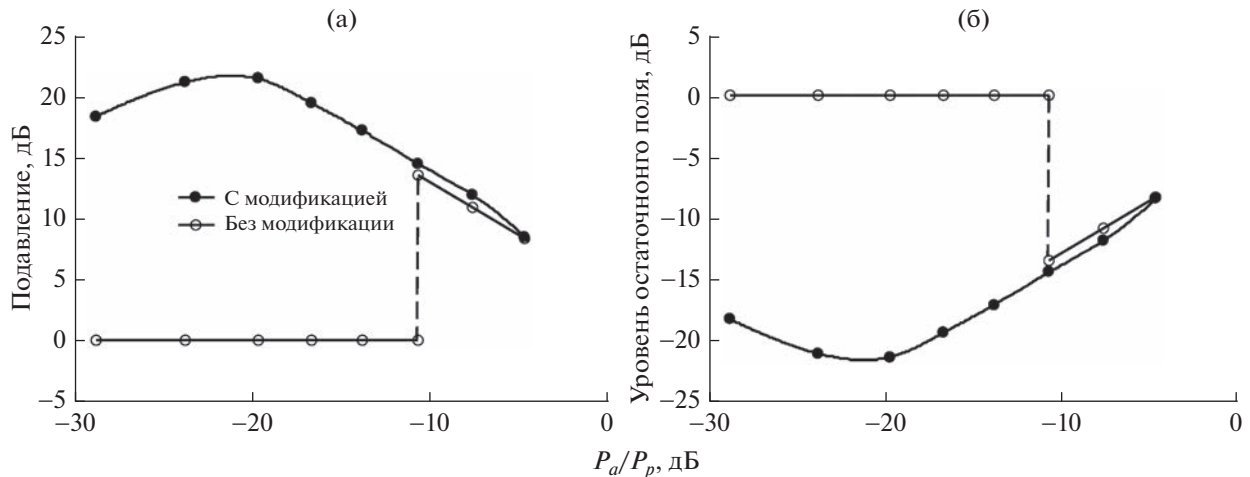


Рис. 8. Уровни (а) — подавления и (б) — остаточного поля при различных мощностях калибровочного сигнала для системы активного гашения с предложенной модификацией и без нее.

сигнала P_a к мощности поля, создаваемого компенсируемым источником P_p в точке расположения данного приемного элемента, показаны на рис. 8.

Видно, что при уровнях P_a/P_p ниже -10 дБ система гашения без предложенной модификации неработоспособна. В то же время для работы предложенной системы гашения достаточным является значение P_a/P_p порядка -24 дБ. Монотонное снижение уровней подавления при увеличении P_a/P_p обусловлено повышением мощности суммарного шумоизлучения системы при увеличении уровня калибровочного сигнала.

Максимальный уровень подавления, достигаемый при использовании системы активного гашения с предложенной модификацией, достигает 22 дБ. В то же время уровень, достигаемый при использовании системы без разделения смеси компенсируемого шума и калибровочного сигнала на компоненты, составляет порядка 13 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача активного гашения широкополосного акустического излучения. Предложена модификация метода активного гашения с автоматической непрерывной калибровкой системы, функционирующего при возможных изменениях акустических или электрических параметров элементов, входящих в систему. Данная модификация обеспечивает возможность уменьшения мощности суммарного шумоизлучения путем снижения уровня сигнала, используемого для калибровки, на 14–20 дБ по сравнению с известными методами, в частности, методом, показанным в [14]. Проведенное имитационное

моделирование системы активного гашения широкополосного акустического излучения показало работоспособность и достаточную эффективность предложенного метода.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФ РАН по теме 0030-2021-0017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В. Опыт исследования и снижения низкочастотного шума энергетических установок // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Иванова Н.И. СПб.: Институт акустических конструкций, 2021. С. 30–39.
2. Васильев А.В. Перспективы использования активной компенсации для снижения низкочастотного шума и вибрации в условиях производства // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 10. С. 47–51.
3. Kuo S.M., Mitra S., Gan W.S. Active noise control system for headphone applications // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2006. V. 14. № 2. С. 331–335.
4. Denenberg J.N. Anti-noise // IEEE Potentials. 1992. V. 11. № 2. P. 36–40.
5. Малюжинец Г.Д. Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью // Тр. Акустического института. 1971. № 15. С. 124–139.
6. Elliott S.J. Signal Processing for Active Control. London, UK, Academic Press, 2001. P. 511.
7. Kuo S.M., Morgan D.R. Active noise control: a tutorial review // Proceedings of the IEEE. 1999. V. 87. № 6. P. 943–975.
8. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Черепенников В.В. Адаптивные системы активного гашения шума и вибраций // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 242–258.

9. *Tang X.L., Lee C.M.* Time–frequency-domain filtered-x LMS algorithm for active noise control // *J. Sound Vib.* 2012. V. 331. № 23. P. 5002–5011.
10. *Vázquez Á.A., Pichardo E., Avalos J.G., Sánchez G., Martínez H.M., Sánchez J.C., Pérez H.M.* Multichannel Active Noise Control Based on Filtered-x Affine Projection-Like and LMS Algorithms with Switching Filter Selection // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. № 21. P. 4669.
11. *Ahn Dong-Jun, Keun Sik Kim, Hyun Do Nam, Eun Woo Shin.* Multi-channel active noise control system designs using fuzzy logic stabilized algorithms // *Advanced Engineering Forum*. 2012. V. 13. № 8. P. 3647–3653.
12. *Kuo S.M., Yenduri R.K., Gupta A.* Frequency-domain delayless active sound quality control algorithm // *J. Sound Vib.* 2008. V. 318. № 4–5. P. 715–724.
13. *Фикс И.Ш., Коротин П.И., Потапов О.А., Фикс Г.Е.* Экспериментальные исследования компенсации звукового поля на дискретных частотах // *Акуст журн.* 2016. Т. 62. № 2. С. 208–215.
14. *Yuxue P., Pengfei S.* Online secondary path modeling method with auxiliary noise power scheduling strategy for multi-channel adaptive active noise control system // *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019. V. 38. № 2. P. 740–752.
15. *Allen J.B., Berkley D.A.* Image method for efficiently simulating small-room acoustics // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 65. № 4. P. 943–950.
16. *Джиган В.И.* Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 527 с.
17. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.