АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2012, том 58, № 4, с. 419–424

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ. ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.833

ГИБРИДНЫЙ АКТИВНО-ПАССИВНЫЙ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЬ

© 2012 г. В. Д. Белов, Ю. Г. Мигун, А. И. Орлов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: Belov@akin.ru

Поступила в редакцию 10.12.2011 г.

Рассмотрена структура активно-пассивного звукопоглотителя и обсуждены вопросы, связанные с аналитическими и экспериментальными исследованиями эффективности работы звукопоглотителя. Дано описание пассивной части гибридного звукопоглотителя и входящей в его состав активной системы. Описана структура построенного на основе низкочастотного акустического интерферометра стенда, предназначенного для измерения коэффициента звукопоглощения и входного импеданса гибридного звукопоглотителя при нормальном падении звуковой волны. Предложен алгоритм управления активной системой. Проведено аналитическое исследование эффективности работы активной системы с предложенным алгоритмом. Приведены результаты экспериментальных исследований гибридного активно-пассивного звукопоглотителя на измерительном стенде.

Ключевые слова: активно-пассивный звукопоглотитель, резонансный звукопоглотитель, система активного гашения звука, коэффициент звукопоглощения, акустический импеданс, низкочастотный акустический интерферометр.

ВВЕДЕНИЕ

В практике борьбы с повышенными уровнями шума в помещениях используют перфорированные звукопоглощающие панели, отнесенные от стены на некоторое расстояние [1]. Такие панели, обладая высоким коэффициентом звукопоглощения в области средних и высоких звуковых частот, весьма малоэффективны в области низких звуковых частот. Одним из путей повышения звукопоглощения в низкочастотной области без увеличения габаритов является создание гибридных активно-пассивных звукопоглотителей. В работе [2] был предложен гибридный пассивно-активный звукопоглотитель, у которого коэффициент звукопоглощения существенно увеличивался в области низких частот за счет активного управления входным импедансом звукопоглотителя. Подобные звукопоглотители могут быть использованы для снижения реверберации в аудиториях и концертных залах, в жилых и производственных помещениях промышленных и транспортных объектов, в авиации для снижения шума в кабине турбовинтового самолета на гармониках лопастных частот.

Следует заметить, что исследованию резонансных звукопоглотителей, которые являются частным случаем перфорированных звукопоглощающих панелей, посвящено большое количество работ, среди которых следует отметить работы [3–5]. Так, в работе [3] рассчитан и экспериментально исследован резонансный звукопоглотитель с дифракционным экраном, предназначенный для поглощения низких звуковых частот. В работах [4, 5] исследуются резонансные звукопоглотители при высоких уровнях звукового давления.

СОСТАВ ГИБРИДНОГО ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Нами был экспериментально исследован гибридный звукопоглотитель, состоящий из активной и пассивной части. На рис. 1 представлена схема измерительного стенда для экспериментальных исследований гибридного звукопоглотителя. Пассивная часть звукопоглотителя представляет собой гипсовую перфорированную панель П размером 168 × 168 × 12.5 мм с отверстиями диаметром 6 мм и шагом между отверстиями 15 мм. С внутренней стороны отверстия в панели затянуты перкалью для увеличения активной (действительной) части входного импеданса панели. Панель отстояла от преграды ПР на расстоянии 170 мм. Пассивная часть гибридного звукопоглотителя представляет собой резонансный звукопоглотитель. Известно, что коэффициент звукопоглощения резонансного звукопоглотителя при нормальном падении звуковой волны стремится к единице, когда действительная часть входного импеданса стремится к импедансу среды (воздуха), а мнимая (реактивная) часть входного импеданса поглотителя стремится к нулю. В области низких частот мнимая часть входного импеданса резонансного звукопо-

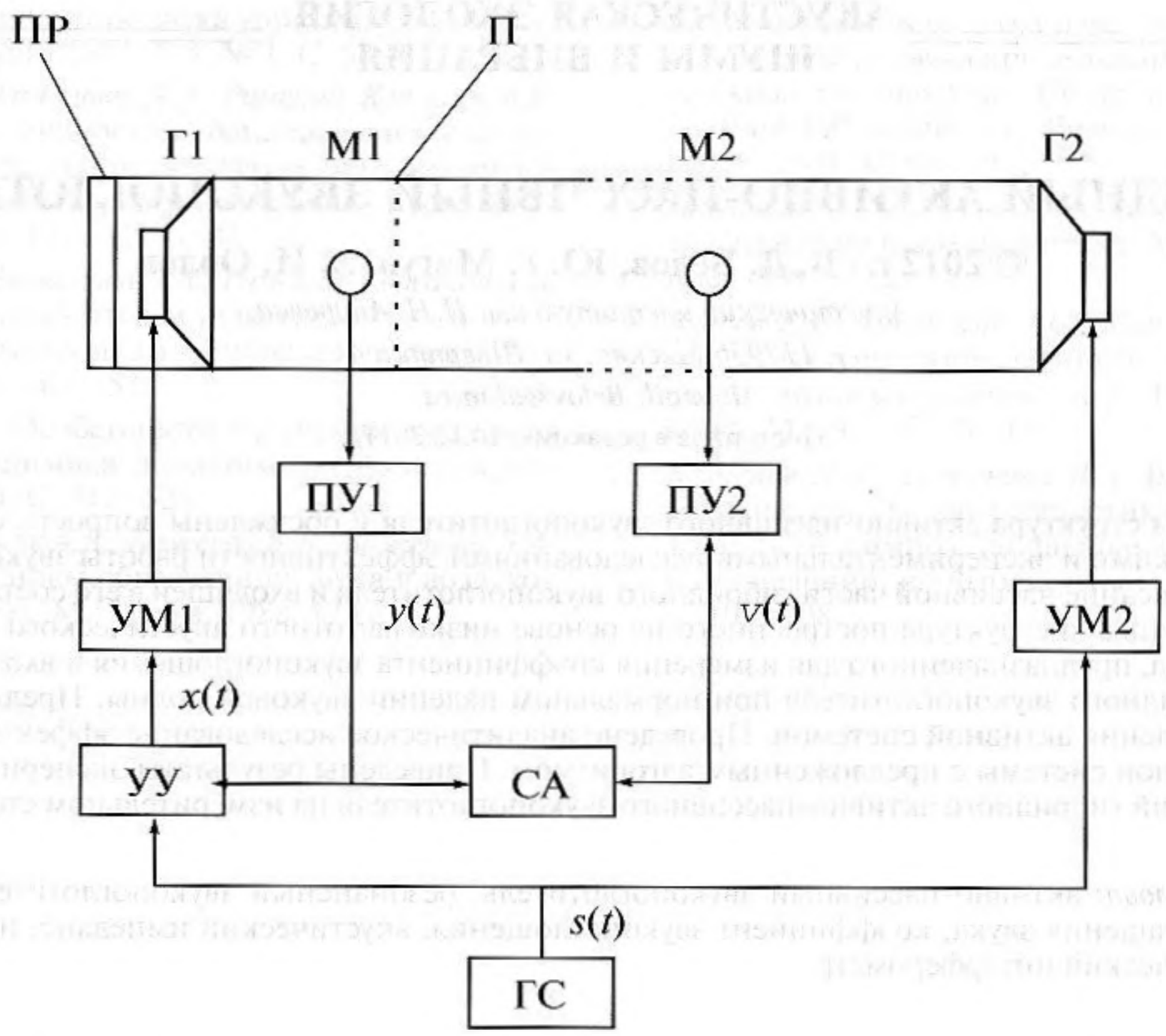

Рис. 1. Схема измерительного стенда: П – гипсовая перфорированная панель; ПР – преграда; Г1, Г2 – громкоговорители; М1, М2 – микрофоны; УМ1, УМ2 – усилители мощности; УУ – устройство управления; ГС – генератор гармонического сигнала; СА – двухканальный анализатор (SpectraLAB); ПУ1, ПУ2 – предварительные микрофонные усилители.

глотителя определяется входным импедансом воздушной полости. Для уменьшения входного импеданса воздушной полости можно использовать активную систему управления импедансом.

Активная система, входящая в состав гибридного звукопоглотителя, содержит громкоговоритель Г1 (компенсирующий источник) с усилителем мощности УМ1, контрольный микрофон М1 с предварительным микрофонным усилителем ПУ1 и устройство управления УУ. Громкоговоритель Г1 располагался в полости между панелью и преградой, в непосредственной близости от преграды. Контрольный микрофон М1 также был расположен в полости звукопоглотителя в непосредственной близости от перфорированной панели. В процессе измерений активная система формирует такой сигнал $x(t)$ управления громкоговорителем Г1, при котором звуковое давление в районе контрольного микрофона М1 стремится к нулю и, соответственно, к нулю стремится входной импеданс воздушной полости за перфорированной панелью.

Гибридный звукопоглотитель был помещен в низкочастотный акустический интерферометр с целью определения коэффициента звукопоглощения и входного импеданса звукопоглотителя при нормальном падении звуковой волны. Интерферометр представлял собой волновод длиной 2600 мм, выполненный из оргстекла толщиной 10 мм с внутренним поперечным сечением 168 × 168 мм. На одном конце интерферометра устанавливался низкочастотный излучатель – громкоговоритель Г2, на другом – преграда ПР в виде стальной пластины толщиной 9 мм. Громкоговорители Г2 (первичный источник) и Г1 возбуждались гармоническим сигналом $s(t)$ генератора ГС. На громкоговоритель Г2 сигнал $s(t)$ подавался через усилитель мощности УМ2, а на громкоговоритель Г1 – через последовательное соединение устройства управления УУ и усилителя мощности УМ1. Внутри интерферометра располагалась микрофонная тележка, которая вместе с измерительным микрофоном М2 могла перемещаться вдоль волновода. Сигнал $v(t)$ микрофона М2 подавался на вход предварительного микрофонного усилителя ПУ2. Усиленные сигналы $y(t)$ и $v(t)$ соответственно контрольного и измерительного микрофонов подавались на двухканальный программный спектроанализатор СА (SpectraLAB) для просмотра и регистрации как самих сигналов, так и их спектров. Устройство управления УУ и генератор ГС были реализованы в персональном компьютере с

Рис. 2. Функциональная схема активной системы.

платами расширения для аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования соответствующих сигналов.

АКТИВНАЯ СИСТЕМА ГИБРИДНОГО ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯ

В операторной форме активная система, структура которой показана на рис. 1, описывается следующими линейными уравнениями:

$$y(t) = d(t) + z(t), \quad (1)$$

$$z(t) = Ax(t), \quad (2)$$

$$x(t) = Wy(t), \quad (3)$$

где $y(t)$ – сигнал, измеряемый контрольным микрофоном М1; $d(t)$ – составляющая сигнала $y(t)$, возбуждаемая первичным источником Г2; $z(t)$ – составляющая сигнала $y(t)$, возбуждаемая компенсирующим источником Г1; A – линейный оператор объекта управления, описывающий связь выхода контрольного приемника М1 с входом компенсирующего источника Г1; $x(t)$ – сигнал управления компенсирующим источником Г1; W – оператор устройства управления (алгоритм управления). Этим уравнениям соответствует приведенная на рис. 2 функциональная схема, наглядно отражающая связи между переменными в системе.

Целью работы активной системы является минимизация средней мощности сигнала $y(t)$ контрольного микрофона М1, или, что то же самое, минимизация уровня звукового давления в точке установки микрофона М1. В качестве оператора W устройства управления, который обеспечивает достижение поставленной цели, в активной системе был использован следующий алгоритм:

$$x(t) = \sum_k A_k^{-1} Y_k(t) \exp(i\omega_k t), \quad (k = \pm l), \quad (4)$$

$$Y_k(t) = -\mu \int_0^t y(t) \exp(-i\omega_k t) dt, \quad (5)$$

где k, l – целые числа; ω_k – круговая частота сигнала генератора ГС, на которой проводятся измерения; $\exp(i\omega_k t)$, $\exp(-i\omega_k t)$ – базисные функции, формируемые в генераторе ГС; $A_k = A(i\omega_k) = a_k + b_k$ – комплексный коэффициент передачи объекта управления на частоте ω_k; $\mu < 1$ – положительный коэффициент, имеющий смысл круговой частоты среза интегратора (5), т.е. той частоты, на которой модуль его передаточной функции равен единице. Алгоритм (4), (5), являющийся модификацией предложенного в [6] алгоритма компенсации виброакустических полей, обеспечивает, как будет показано ниже, полное гашение колебаний в точке установки контрольного микрофона М1 на частоте ω_k. Соотношения (1)–(5) описывают активную систему во временно́й области. Однако анализ работы системы, т.е. исследование ее поведения в переходном и установившемся режимах, значительно проще проводить в частотной области. Поскольку в процессе измерений входной сигнал $d(t)$, возбуждаемый генератором ГС, и оператор A объекта управления не изменяются во времени, достаточно проанализировать работу активной системы только в установившемся режиме, что и будет сделано ниже.

Прежде всего, найдем передаточную функцию $W_{xy}(p) = x(p)/y(p)$ устройства управления. Преобразуя по Лапласу алгоритм (4), (5), описывающий устройство управления во временно́й области, получим уравнения, описывающие устройство управления в спектральной области:

$$x(p) = \sum_k A_k^{-1} X_k(p - i\omega_k), \quad (k = \pm l), \quad (6)$$

$$X_k(p) = -\frac{\mu}{p} y(p + i\omega_k), \quad (7)$$

где $p = i\omega$ – комплексная частота. Подставляя (7) в (6), получим искомую передаточную функцию устройства управления:

$$W_{xy}(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = -\sum_k \frac{\mu A_k^{-1}}{p - i\omega_k}, \quad (k = \pm l). \quad (8)$$

Учитывая, что $\omega_{-l} = -\omega_l$, $A_{-l} = A_l^*$ (* – символ комплексного сопряжения), представим (8) в виде:

$$W_{xy}(p) = -\left[\frac{\mu}{A(i\omega_l)(p - i\omega_l)} + \frac{\mu}{A^*(i\omega_l)(p + i\omega_l)}\right]. \quad (9)$$

Приводя в (9) слагаемые к общему знаменателю и представляя комплексные числа $A(i\omega_l)$ и $A_i^*(i\omega_l)$ в алгебраической форме, т.е. $A(i\omega_l) = a_l + ib_l$, $A_l^*(i\omega_l) = a_l - ib_l$, получим еще одну форму записи передаточной функции устройства управления:

$$W_{xy}(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \\ = -\frac{2\mu}{a_l^2 + b_l^2}\frac{a_l p + b_l\omega}{p^2 + \omega_l^2} = -\frac{2\mu}{a_l^2 + b_l^2}\frac{a_l i\omega + b_l\omega_l}{\omega_l^2 - \omega^2}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что устройство управления эквивалентно перестраиваемому колебательному звену без затухания, или, другими словами, перестраиваемому полосовому фильтру 2-го порядка с бесконечной добротностью. Изменяя частоту ω_l генератора ГС, можно перестраивать резонансную частоту фильтра, а изменяя частоту среза μ интегратора (5), – регулировать полосу пропускания фильтра.

Преобразуя по Лапласу уравнения (1)–(3), получим описание активной системы в спектральной области:

$$y(p) = d(p) + z(p), \quad (11)$$

$$z(p) = A(p)x(p), \quad (12)$$

$$x(p) = W_{xy}(p)y(p), \quad (13)$$

где $A(p)$ – передаточная функция объекта управления. Из соотношений (11)–(13) найдем передаточную функцию $W_{yd}(p) = y(p)/d(p)$ активной системы, связывающую выход системы $y(p)$ с ее входом $d(p)$. Она имеет вид:

$$W_{yd}(p) = \frac{y(p)}{d(p)} = \frac{1}{1 - A(p)W_{xy}(p)}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) соотношение (10), описывающее передаточную функцию $W_{xy}(p)$ устройства управления, получим искомую передаточную функцию активной системы:

$$W_{yd}(p) = \frac{1}{1 + A(p)\dfrac{2\mu}{a_l^2 + b_l^2}\dfrac{a_l p + b_l\omega_l}{p^2 + \omega_l^2}}. \quad (15)$$

Модуль $|W_{yd}(p)|$ этой передаточной функции описывает частотную зависимость величины гашения в активной системе, т.е. ее амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Из (15) следует, что если система устойчива, а передаточная функция $A(p)$ объекта управления на частоте ω_l не равна нулю, то на этой частоте передаточная функция $W_{yd}(p)$ обращается в нуль. Действительно, при $p = i\omega = i\omega_l$ знаменатель передаточной функции (15) равен бесконечности, сама передаточная функция равна нулю, и, следовательно, сигнал $y(p) = W_{yd}(p)d(p)$ контрольного микрофона M1 также равен нулю.

Таким образом, в результате проведенного анализа показано, что активная систем с алгоритмом управления (4), (5) полностью гасит колебания с частотой ω_l в точке установки контрольного микрофона M1.

Исследуем поведение передаточной функции (15) активной системы во всей полосе частот. Для обеспечения высокого качества управления в установившемся режиме частота среза интегратора μ выбирается так, чтобы во всем диапазоне частот, на котором измеряются параметры гибридного звукопоглотителя, выполнялось следующее условие. Величина μ должна быть такой, чтобы в окрестности частоты ω_l ($l = 1, 2, ...$) в полосе от $\omega_l - \mu$ до $\omega_l + \mu$ модуль АЧХ и аргумент (ФЧХ – фазо-частотная характеристика) передаточной функции $A(p)$ объекта управления были достаточно "пологими". Более точно: на границах этой полосы значения АЧХ должны быть близки, а также близки и значения ФЧХ. Чем меньше величина μ, тем, при заданной $A(p)$, меньше эффект перерегулирования в системе, который приводит к нежелательным выбросам АЧХ активной системы.

Если значение μ удовлетворяет сформулированному выше условию, то объект управления можно рассматривать как безынерционное звено, передаточная функция $A(p)$ которого есть действительное число. Пусть $A(p) = a_l$. Тогда передаточная функция устройства управления (10) принимает вид:

$$W_{xy}(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = -\frac{2\mu p}{a_l(p^2 + \omega_l^2)}. \quad (16)$$

Подставляя (16) в соотношение (14), определяющее передаточную функцию активной системы, имеем:

$$W_{yd}(p) = \frac{p^2 + \omega_l^2}{p^2 + 2\mu p + \omega_l^2} = \frac{\omega_l^2 - \omega^2}{\omega_l^2 + 2i\mu\omega - \omega^2}. \quad (17)$$

Полученная передаточная функция соответствует режекторному (полосно-задерживающему) фильтру 2-го порядка с нулевым значением передачи на резонансной частоте $\omega = \omega_l$. При $\omega_l \gg \mu$ ширина полосы задержания на уровне 0.7 (–3 дБ) равна 2μ – двойной частоте среза интегратора (5). За пределами полосы задержания модуль $|W_{yd}(p)|$ передаточной функции (17), т.е. АЧХ системы, асимптотически монотонно стремится к единице, как слева, так и справа от частоты ω_l.

Итак, получено аналитическое выражение, которое при выполнении сформулированного выше условия с достаточной для практики точностью позволяет оценить в частотной области поведение активной системы, входящей с состав гибридного активно-пассивного звукопоглотителя. Очевидно, что соотношение (17) позволяет найти импульсную характеристику активной системы, поскольку последняя однозначно связана с передаточной функцией системы. Из анализа импульсной характеристики (здесь не приводится) следует, что

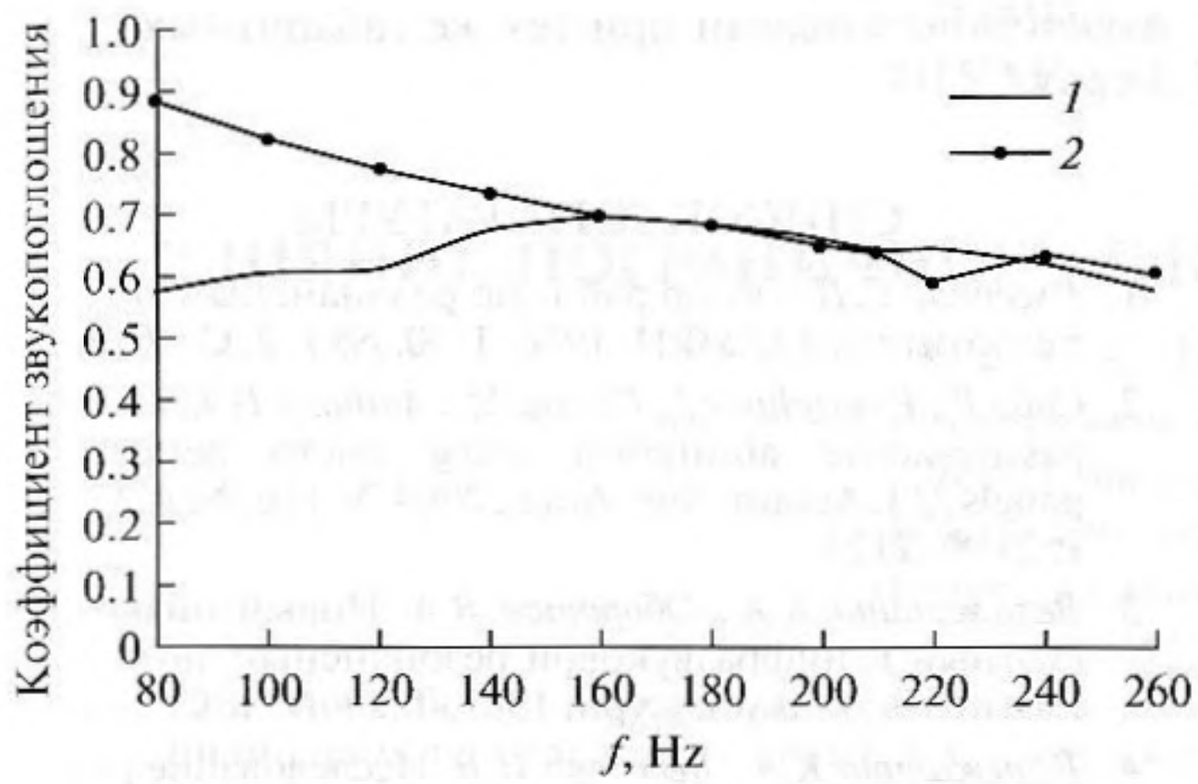

Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения гибридного звукопоглотителя при нормальном падении звуковой волны: *1* – при выключенной активной системе управления; *2* – при включенной активной системе.

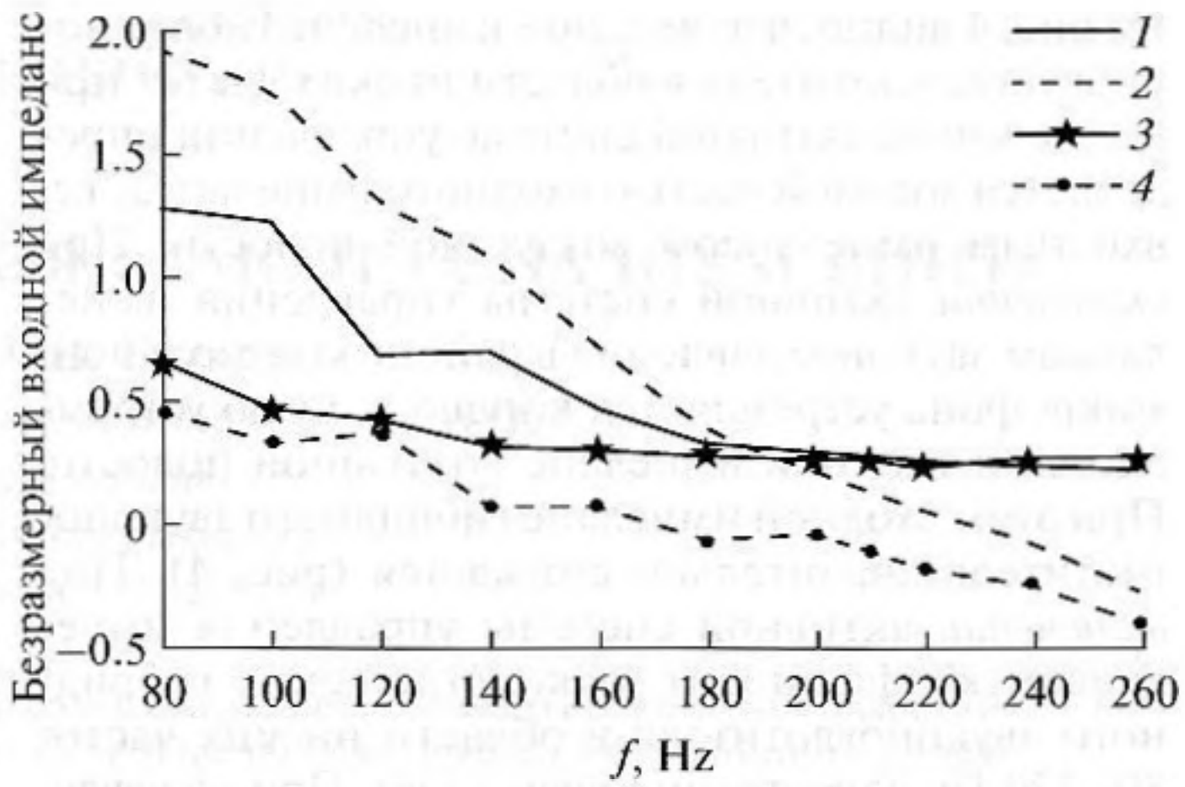

Рис. 4. Безразмерный входной импеданс гибридного звукопоглотителя: *1* и *2* – действительная и мнимая части безразмерного входного импеданса при выключенной активной системе управления; *3* и *4* – действительная и мнимая части безразмерного входного импеданса при включенной активной системе управления.

длительность переходного процесса в активной системе можно оценить величиной $\tau = 1/f_c$, где $f_c = \mu/2\pi$ – частота среза интегратора (5).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Гибридный активно-пассивный звукопоглотитель помещался в акустический интерферометр (см. рис. 1). Последовательно на ряде частот в интерферометре с помощью первичного источника колебаний – громкоговорителя Г2, питаемого усиленным сигналом генератора ГС, возбуждалась плоская звуковая волна, нормально падающая на гибридный звукопоглотитель. Измерения характеристик гибридного звукопоглотителя проводились при двух режимах: активная система управления импедансом выключена, активная система управления импедансом включена.

При включенной активной системе частота f_c интегратора (5) устанавливалась равной 1 Гц, при этом длительность переходного процесса в системе составляла 1 с. Величина снижения уровня звукового давления в точке установки контрольного микрофона М1 во всех экспериментах при включенной активной системе была не менее 50 дБ. В процессе измерений в результате перемещений измерительного микрофона М2 измерялись и регистрировались: максимум звукового давления P_{MAX}, минимум звукового давления P_{MIN} и координата сечения X_{MIN}, где звуковое давление достигало минимума. Начало координат соответствовало лицевой панели гибридного звукопоглотителя (внешней границе перфорированной панели П).

На основании этих величин рассчитывались [7]: коэффициент звукопоглощения α гибридного звукопоглотителя по формуле:

$$\alpha = \frac{4n}{n^2 + 2n + 1},$$

где $n = \dfrac{P_{MAX}}{P_{MIN}}$; входной импеданс гибридного звукопоглотителя:

$$Z_{BX} = R_{BX} + iY_{BX},$$

где

$$R_{BX} = \frac{2n}{(n^2+1) - (n^2-1)\cos 2\delta},$$

$$Y_{BX} = \frac{(n^2-1)\sin 2\delta}{(n^2+1) - (n^2-1)\cos 2\delta},$$

– активная и реактивная части импеданса, $\delta = \dfrac{\pi(X_{MIN} - \lambda/4)}{\lambda/2}$, λ – длина звуковой волны;

а также безразмерные активная и реактивная части импеданса:

$$R_{BX}^{H} = R_{BX}/S\rho c, \quad Y_{BX}^{H} = Y_{BX}/S\rho c,$$

где S – площадь поперечного сечения интерферометра, ρ, c – плотность и скорость звука в воздухе соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента, представленные на рис. 3 и 4, показывают, что коэффициент звукопоглощения гибридного звукопоглотителя при *выключенной* активной системе управления импедансом ведет себя в зависимости от частоты как обычный резонансный звукопоглотитель, т.е. достигает максимума на резонансной частоте и с уменьшением частоты (от 140 до 80 Гц) величина коэффициента поглощения уменьшается (рис. 3).

Из рис. 4 видно, что входной импеданс гибридного звукопоглотителя в области низких частот при *выключенной* активной системе управления определяется мнимой частью входного импеданса, т.е. входным импедансом воздушной полости. При *включении* активной системы управления импедансом звуковое давление в районе контрольного микрофона устремляется к нулю, к нулю устремляется и входной импеданс воздушной полости. При этом входной импеданс гибридного звукопоглотителя значительно снижается (рис. 4). При *включении* активной системы управления импедансом коэффициент звукопоглощения гибридного звукопоглотителя в области низких частот 80–120 Гц существенно возрастает. При *включенной* активной системе длительность переходного процесса составляла 1 с, величина снижения уровня звукового давления в точке установки контрольного микрофона M1 была не менее 50 дБ, что подтверждает приведенные выше результаты аналитических исследований эффективности работы активной системы. Таким образом, гибридные активно-пассивные звукопоглотители поглощают звук в области низких частот более эффективно по сравнению с пассивными звукопоглотителями при тех же габаритных размерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевкин С.Н.* Обзор работ по резонансным звукопоглотителям // УФН. 1946. Т. 30. № 1, 2. С. 40–62.
2. *Cobo P., Pfretzchner J., Cuesta M., Anthony D.K.* Hybrid passive-active absorption using micro perforated panels // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 116. № 4. Pt. 1. P. 2118–2125.
3. *Велижанина К.А., Оборотов В.А.* Новый низкочастотный и инфразвуковой резонансный звукопоглотитель // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 5–10.
4. *Велижанина К.А., Лебедева И.В.* Исследование резонансных звукопоглотителей при высоких уровнях звука // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 5. С. 130–132.
5. *Руденко О.В., Хирных К.Л.* Модель резонатора Гельмгольца для поглощения интенсивного звука // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 3. С. 527–534.
6. *Любашевский Г.С., Орлов А.И., Тартаковский Б.Д.* Адаптивная компенсация дискретных компонент шума и вибрации // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 3. С. 489–495.
7. *Боголепов И.И.* Промышленная звукоизоляция. Л.: Судостроение, 1986. 368 с.