

## Поглощение шума при его активном гашении в воздуховоде

А. А. Пудовкин<sup>1,\*</sup>, Д. И. Кешков<sup>2,†</sup>, М. Ю. Китанов<sup>2,‡</sup>, Г. Н. Кузнецов<sup>1</sup>,  
С. И. Кутаков<sup>1</sup>, А. Б. Майзель<sup>2</sup>, Д. А. Смагин<sup>3</sup>, А. А. Сухарцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

<sup>2</sup>Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»,  
Россия, 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 90

<sup>3</sup>ЦАО «Акустический институт им. академика Н. Н. Андреева», Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4  
(Статья поступила 07.11.2019; Подписана в печать 08.11.2019)

Подавление широкополосных шумов и вибраций является одной из актуальных акустических задач. Наиболее сложная задача — ослабление низкочастотных возмущений, особенно в широкой полосе. В связи с недостаточной эффективностью пассивных поглотителей на низких частотах для ослабления возмущений рекомендуется использовать активные методы и технические средства. В работе приводятся результаты активного гашения широкополосных возмущений в протяженном цилиндрическом воздуховоде. Усредненное в рабочей полосе частот ослабление мощности шумового возмущения составило 11–12 дБ. Максимальные спектральные плотности подавляются на 16–17 дБ.

PACS: 43.60.-с; 72.70.+m; 05.40.Са УДК: 534.83; 62-752.2

Ключевые слова: активное гашение, широкополосный шум, воздуховод.

### ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении гашения тонального возмущения показано [1], что при правильной настройке разнесенных вдоль оси волновода актюаторов происходит эффективное поглощение тонального возмущения. Это означает, что амплитуда возмущения падает от максимального значения значений в сечении нижнего по потоку актюатора. Схема расположения приборов в системе активного шумоподавления (САШ) в волноводе показана на рис. 1.

Нижний по потоку актюатор производит задержанный и инвертированный сигнал по отношению к верхнему по потоку актюатору и оба они работают как гасящий источник, фаза которого сдвинута на  $\pi/2$  относительно падающего возмущения, а амплитуду которого необходимо подобрать для полного гашения первичного возмущения. Ограничением является расстояние между актюаторами, которое не должно быть равно половине длины волны на частоте возмущения, а в лучшем случае должно быть в окрестности четверти длины волны.

### 1. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРИ ШУМОВОМ ВОЗМУЩЕНИИ

В варианте шумового широкополосного возмущения ситуация по сравнению с [1] усложняется, поскольку без весьма вычислительно затратного преобразования

Гилберта невозможно осуществить одинаковый сдвиг фаз в полосе частот.

Решить эту задачу в широкой полосе частот можно с помощью контроллера  $L(q)$  компенсации сигнала акустической обратной связи (АОС). Этот контроллер синтезируется так, чтобы при известных по результатам идентификации передаточных характеристиках АОС от двух вторичных источников до опорного микрофона минимизировать их суммарную передаточную характеристику. При этом естественно изменяется передаточная характеристики вторичного пути, что требует идентификации вторичного пути с учетом наличия контроллера  $L(q)$  компенсации сигнала АОС. После синтеза контроллера  $L(q)$  компенсации сигнала АОС, идентификации изменившихся передаточных характеристик вторичного пути и пути АОС, производится синтез контроллера  $Kf(q)$  гашения шумового сигнала [2].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проведены на САШ с цилиндрическим волноводом диаметром 150 мм. В качестве актюаторов использовались корпуса с четырьмя синхронно возбуждаемыми электродинамикам, установленными в одном сечении волновода. В САШ используются динамики типа В1354.8.2 с уменьшенной массой магнитодинамической компоненты динамика за счет использования магнитов с повышенной коэрцитивной силой магнита.

Общий вид САШ представлен на рис. 2. В качестве источника шумового возмущения использовались размещенные в корпусе электродинамики типа В2512.8 (на рис. 2 не показаны). Для наблюдения за возмущением в секциях с микрофонами в каждом из трех сечений размещены по 6 микрофонов типа ЕСМ-10.

\*E-mail: alx.pdvk@mail.ru

†E-mail: neptun@ckb-rubin.ru

‡E-mail: mik.kitanov@yandex.ru

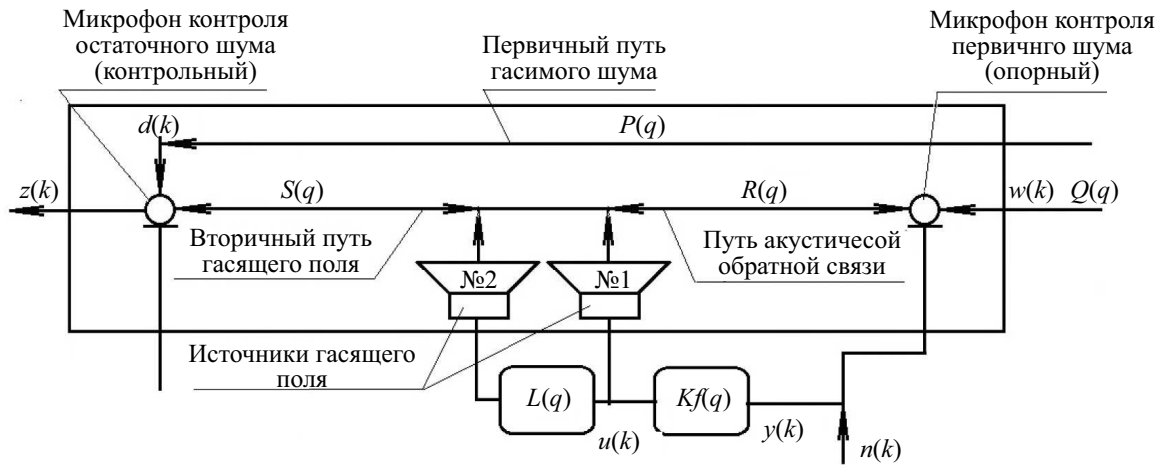


Рис. 1: Схема САШ звукового возмущения в волноводе с поглощающим участком

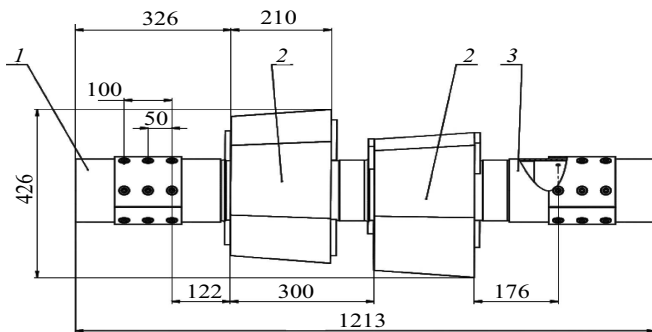


Рис. 2: Общий вид САШ: 1 и 3 — секции с микрофонами, 2 — актюаторы: исполнительные элементы

Для аппаратной реализации контроллера, обеспечивающего управление шумоподавлением, использовался прибор (устройство) разработки ЗАО «Инструментальные системы». Состав прибора:

1. Специализированный процессорный модуль цифровой обработки сигналов (ЦОС, DSP — англ. digital signal processing) ADP101E1 разработан на основе процессора TigerSHARC ADSP-TS101S (фирмы Analog Devices) и TMS320 (Texas Instruments).

2. ПЛИС ADM Spartan3: XC3S400, XC3S1500 фирмы Xilinx.

3. Субмодуль ССР (Communication Controller Processors).

4. Карта памяти CompactFlash.

5. Субмодуль АЦП/ЦАП ADM818x800.

Частота дискретизации составляла 6972 Гц.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПУТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

Для подавления исходного сигнала при синтезе контроллера пути АОС предъявляются результаты идентификации парциальных передаточных характеристик

АОС от динамиков №1 и №2. Перед контроллером ставится задача минимизации суммарного сигнала АОС от пары динамиков. Результатом синтеза является контроллер и производится прогноз передаточной характеристики АОС от пары динамиков с контроллером подавления АОС. Однако предъявленные для синтеза контроллера модели путей распространения звука идентифицируются с погрешностями. Необходимо учесть эти погрешности перед синтезом контроллера гашения. Для этого из парциальных сигналов, по которым проводилась идентификация путей с использованием контроллера подавления пути АОС, формируется суммарный сигнал пары динамиков. По этому суммарному сигналу повторно проводится идентификация пути АОС пары динамиков.

Совершенно аналогично описанному выше проводится идентификация вторичного пути от пары динамиков.

После синтеза контроллера  $L(q)$  компенсации сигнала АОС, идентификации изменившихся передаточных характеристик вторичного пути и пути АОС, производится синтез контроллера  $Kf(q)$  гашения шумового сигнала [2].

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ГАШЕНИЯ

Результаты гашения поглощающей секцией из двух динамиков приведены на рис. 3.

Сопоставление теоретически сгенерированных сигналов и зарегистрированных в эксперименте сигналов, поданных на актюаторы — динамики гашения — приведены для обоих динамиков на рис. 4.

Результаты сопоставления сигналов опорного и контрольного микрофонов при отключенных и включенных динамиках гашения приведены на рис. 5.

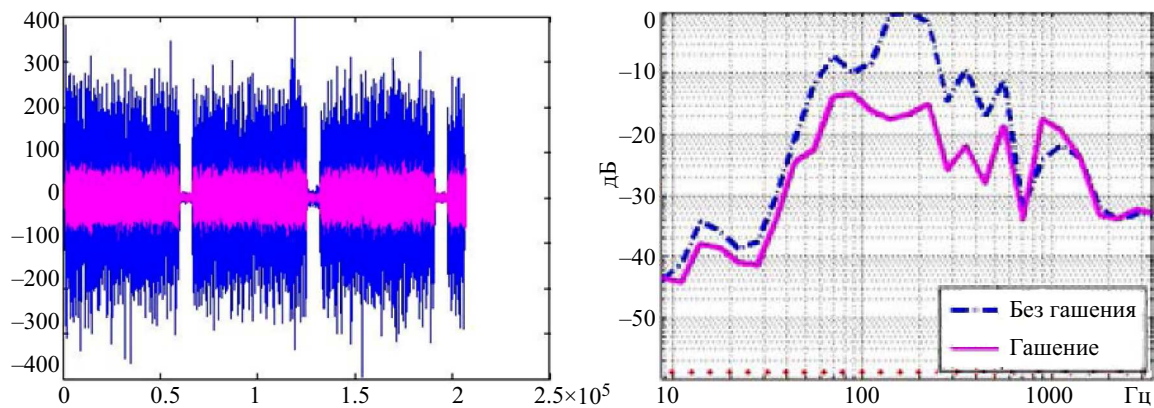


Рис. 3: Результаты гашения поглощающим участком из двух секций с динамиками. Слева — сигнал контрольного микрофона воздуховода без (синий) и при наличии (малиновый) активного гашения парой динамиков. Справа — 1/3 октавный спектр шума без гашения (синий штрих-пунктир) и при наличии (сплошная малиновая линия) активного гашения парой динамиков

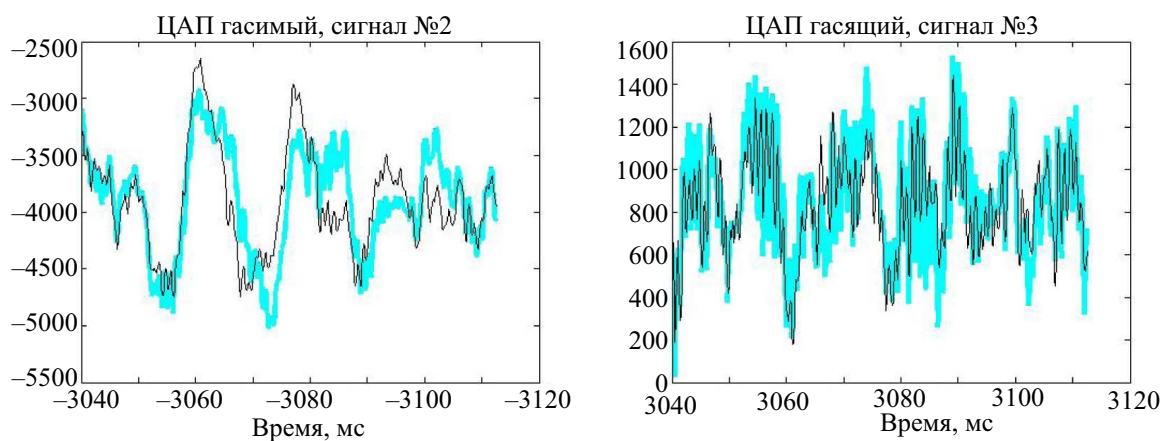


Рис. 4: Сопоставление теоретически сгенерированных сигналов и зарегистрированных в эксперименте сигналов, поданных на актуаторы в поглощающем участке из двух динамиков. Слева — Теоретически рассчитанный (голубая линия) и реально подаваемый (черная линия) на ЦАП сигналы гашения с динамиков № 2 (слева) и № 1 (справа)

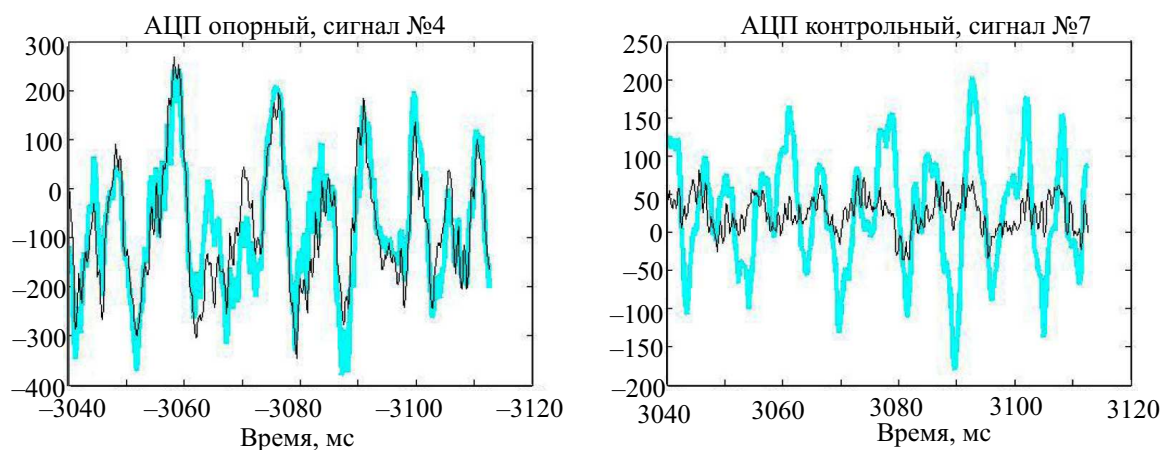


Рис. 5: Сопоставление сигналов с опорного и контрольного микрофонов при отключенных и включенных динамиках активного гашения. Справа — сигнал опорного (справа) и контрольного (слева) микрофона при отключенных (голубая линия) и при включенных (черная линии) динамиках гашения

Таблица I. Расстояния между кривыми на рис. 3 в 1/3 октавном спектре

Гц	31.2	39.4	49.6	62.5	78.7	99.2	125
дБ	-3.7	-4.0	-10.6	-6.6	-3.4	-7.7	-17.2
Гц	157.5	198.4	250	315	397	500	630
дБ	-16.8	-13.3	-11.3	-12.6	-10.9	-7.6	-2.0
Гц	794	1000	1260	1587	2000	2520	3061
дБ	6.8	2.4	0	-1.2	0.3	0.7	0.3

Как видно из рис. 5 сигналы на опорном микрофоне при отключенных и включенных динамиках гашения практически не изменились, тогда как на контрольном микрофоне при включенных динамиках гашения сигнал заметно меньше, чем при выключенных, т.е. происходит интенсивное поглощение исходного шумового возмущения.

Применение активных методов обеспечивает ослабление широкополосных сигналов интегрально на 11.4 дБ, максимально на частоте 125 Гц 17.2 дБ. Видно, что максимальные спектральные составляющие подавляются разработанным алгоритмом и техническими средствами с наибольшей эффективностью.

Представление 1/3 октавного спектра из рис. 6 в табличном виде приведено в табл. 1.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена высокоточная идентификация передаточных характеристик первичного и вторичного путей,

а также путей акустической обратной связи в зоне установки двух разнесенных вдоль оси волновода актюаторов, что позволило путем синтеза по предъявленным характеристикам контроллеров подавления АОС и гашения шумового возмущения создать активное поглощение на участке волновода между актюаторами.

Продемонстрированы результаты физического эксперимента с поглощением широкополосного возмущения при его активном гашении в волноводе. Электрический сигнал на источник шумового возбуждения подавался с равномерной в полосе 30 – 2500 Гц спектральной плотностью, в волноводе вследствие резонансных явлений наиболее интенсивный сигнал формировался в полосе 40 – 750 Гц. В эксперименте активным методом гашения получено усредненное в рабочей полосе частот ослабление мощности шумового возмущения на 11.4 дБ. Максимальное ослабление в 1/3 октавной полосе с центральной частотой 125 Гц — наиболее мощного сигнала, составило 17.2 дБ.

[1] Elliott S.J. Signal processing for active control. London: Academic Press, 1999.

[2] Zhou K., Doyle J., Glover K. Robust and optimal control. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

## Absorption of noise on its active cancelation in air duct

A. A. Pudovkin<sup>1,a</sup>, D. I. Keshkov<sup>2,b</sup>, M. Yu. Kitanov<sup>2,c</sup>, G. N. Kuznetsov<sup>1</sup>, **S. I. Kutakov<sup>1</sup>**, A. B. Maizel<sup>2</sup>,  
D. A. Smagin<sup>3</sup>, A. A. Sukhartsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Central design bureau for marine engineering «Rubin», Saint-Petersburg 191119, Russia

<sup>3</sup>N.N. Andreyev Acoustics Institute, Moscow 117036, Russia

E-mail: <sup>a</sup>alx.pdvk@mail.ru, <sup>b</sup>neptun@ckb-rubin.ru, <sup>c</sup>mik.kitanov@yandex.ru

Wideband noise and vibration cancellation is one of the actual acoustical task. Low-frequency excitation cancellation is an intricate problem especially in wide frequency band. Due to the insufficient efficiency of passive absorbers at low frequencies, active methods and technical means are recommended for attenuation of disturbances. The active cancellation problem decision is illustrated in presentation with regard to the air duct in which wide frequency band excitation is propagated. The noise disturbance power attenuation averaged in the operating frequency band was 11–12 dB. The maximum spectral densities are suppressed at 16–17 dB.

PACS: 43.60.-c; 72.70.+m; 05.40.Ca

Keywords: active cancellation, wideband noise, air duct.

Received 7 November 2019.

**Сведения об авторах**

1. Пудовкин Алексей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: alx.pdvk@mail.ru.
  2. Кешков Дмитрий Ильич — канд. тех. наук, зам. главного конструктора, e-mail: neptun@ckb-rubin.ru.
  3. Китанов Михаил Юрьевич — канд. тех. наук, спец.т 1-й категории, e-mail: mik.kitanov@yandex.ru.
  4. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
  5. Кутаков Сергей Иванович — науч. сотрудник.
  6. Майзель Александр Борисович — доктор тех. наук, нач. отдела, e-mail: neptun@ckb-rubin.ru.
  7. Смагин Дмитрий Анатольевич — нач. отдела, e-mail: zsystems@yandex.ru.
  8. Сухарцов Александр Александрович — вед. инженер, тел.: (499) 256-17-90, e-mail: ale4937@mail.ru.
-