

УДК 534.83

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1104.html>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С.С. Пылев

pylevstepan@gmail.com

SPIN-код: 4011-0260

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

В работе рассмотрены два основных вида шумоподавления: пассивное и активное гашение. Статья посвящена исследованию технологий систем активного гашения (САГ) с акцентом на разработку структурной схемы модуля для внешних акустических систем. Проведен сравнительный анализ реализации САГ в наушниках и внешних системах, где ключевым отличием является отсутствие естественной пассивной изоляции. Предложен алгоритм работы модуля на базе микрофонной записи звукового поля помещения с последующей генерацией антифазного сигнала, реализованный в MATLAB. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие выделение шумовой компоненты и эффективность ее подавления. На основе выполненного анализа разработан эскиз структурной схемы компактного модуля САГ для ближнего поля (до 1 м), включающий блоки обработки сигналов на операционных усилителях и защиту от акустических всплесков. Решение ориентировано на применение в условиях ограниченного пространства при работе с системами форматов 2.0/2.1.

Ключевые слова: активное шумоподавление, системы активного гашения, пассивное шумоподавление, внешние акустические системы, противофазный сигнал, MATLAB-моделирование, операционные усилители, структурная схема

Введение. В условиях современной звуковоспроизводящей аппаратуры одной из наиболее актуальных проблем остается обеспечение качественного воспроизведения аудиосигналов при наличии внешних шумовых помех. Особую значимость эта проблема приобретает при использовании внешних акустических систем в жилых и офисных помещениях, где невозможно обеспечить полную пассивную звукоизоляцию. Существует две основные технологии шумоподавления: пассивная и активная. Технология пассивного шумоподавления включает различные звукопоглощающие и изолирующие конструкции. В отличие от пассивных методов, системы активного шумоподавления используют принцип наложения противофазного сигнала. Их внедрение осложняется необходимостью точной настройки, высокой скорости обработки и стабильности работы. Технология активного шумоподавления, успешно реализованная в наушниках, требует существенной модификации для применения в стационарных акустических комплексах, что обусловлено

принципиальными различиями в условиях распространения звуковых волн и особенностями акустики помещений [1, 2].

Целью работы является комплексная разработка эскиза структурной схемы модуля активного шумоподавления для внешних акустических систем форматов 2.0 и 2.1, предназначенного для работы в условиях ограниченного пространства.

В рамках работы предполагается решение следующих ключевых задач:

- проведение сравнительного анализа существующих технологий шумоподавления с акцентом на их применимость для внешних акустических систем;
- разработка и математическое обоснование алгоритма обработки аудиосигналов, включающего:
 - микрофонный мониторинг акустической обстановки;
 - выделение шумовой компоненты;
 - генерацию противофазного сигнала;
- создание компьютерной модели системы в среде MATLAB;
- разработка эскиза структурной схемы устройства на базе операционных усилителей, включающей:
 - блоки обработки сигналов;
 - систему защиты от акустических всплесков;
 - схему питания.

Предлагаемое техническое решение ориентировано на применение в персональных рабочих зонах, где расстояние между акустической системой и слушателем не превышает 1 м, что позволяет существенно упростить задачу компенсации пространственных искажений.

Практическая значимость работы заключается в создании эскиза структурной схемы модульной системы, которая может быть интегрирована в существующие акустические комплексы без существенного изменения их конструкции, обеспечивая при этом значительное улучшение качества звуковоспроизведения в условиях внешних шумовых помех.

Технологии шумоподавления. Часто потребитель при прослушивании музыки, аудиокниг, лекций, просмотре фильмов сталкивается с тем, что окружающий его шум бывает настолько громким, что перебивает источники полезной информации, даже будь он во внешних или внутриканальных наушниках, либо при использовании внешних акустических систем. Для повышения комфорта при получении информации была разработана технология шумоподавления.

В рамках данной работы необходимо разработать структурную схему устройства для активного шумоподавления внешнего источника звука,

например акустической системы формата 2.0 (стереопара) или 2.1 (стереопара и сабвуфер). Для начала рассмотрим, что такое шумоподавление (шумопонижение), изучим его типы, представим реализации и в конце статьи предложим возможную структурную схему для устройства активного шумоподавления внешней акустической системы.

Шумоподавление (шумопонижение) — это процесс удаления шумов из полезного сигнала для улучшения его воспринимаемого качества или снижения ошибок при передаче и хранении цифровых данных. Системы шумоподавления (СШП) — это аппаратные или программные решения, предназначенные для повышения соотношения сигнал/шум.

Системы шумоподавления применяются как для обработки аудиосигналов, так и для видео- и фотоизображений. Их можно подразделить на два основных типа:

- фильтрация — система очищает сигнал от шумов при воспроизведении, записи или передаче. Большинство методов обработки изображений относится к этому типу;

- модификация сигнала — сигнал преобразуется перед передачей через зашумленный канал (или записью на носитель), а затем восстанавливается при воспроизведении (пример — фоновая коррекция в грамзаписи).

Существуют две основные технологии шумоподавления: пассивная и активная.

Пассивное шумоподавление. Данная технология основана на физическом блокировании внешних шумов за счет плотного прилегания наушников к ушной раковине. Фактически наушники выполняют функцию берушей. Для обеспечения максимальной изоляции чаще всего применяют силиконовые амбушюры, герметично закрывающие слуховой проход. Однако даже при оптимальном прилегании полностью устранить внешние шумы невозможно. Особые сложности возникают при подавлении низкочастотных шумов: вследствие значительного превышения длины звуковой волны над толщиной поглотителя приходится существенно увеличивать габариты и массу всей системы. В результате помимо воспроизводимого аудиоконтента пользователь может слышать фоновые звуки, такие как шум транспорта, голоса окружающих и другие помехи [1–3].

Активное шумоподавление (системы активного гашения — САГ). Эта технология была разработана в середине XX века и первоначально использовалась в авиации для снижения уровня шума в кабинах пилотов. Впоследствии ее адаптировали для аудиотехники, что привело к появлению полноразмерных наушников с САГ. Сегодня данная технология реализована даже в компактных и легких моделях наушников различных видов [4].

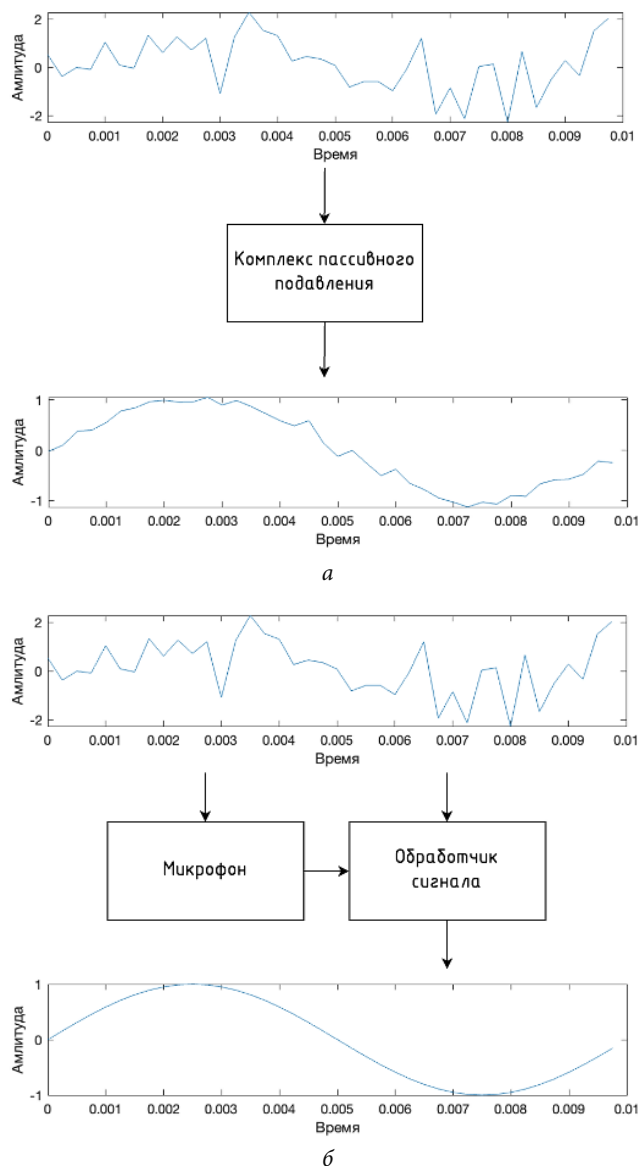


Рис. 1. Упрощенная схема работы пассивного (а) и активного (б) шумоподавления

Упрощенная схема работы пассивного (а) и активного (б) шумоподавления показана на рис. 1. Как видно на рисунке, лучше выполняет свою функцию — подавление постороннего шума — схема с активным шумоподавлением.

ем. Рассмотрим ее поподробнее. Активное шумоподавление — технология, основанная на компенсации нежелательных акустических шумов посредством генерации противофазного сигнала. С физической точки зрения звуковая волна представляет собой продольную волну (Р-волну), характеризующуюся чередованием фаз сжатия и разрежения. В системах активного шумоподавления специализированный излучатель воспроизводит волну, идентичную по амплитуде исходному шуму, но инвертированную по фазе (антифазный сигнал). При наложении этих волн возникает явление деструктивной интерференции, приводящее к взаимной компенсации акустических колебаний [5].

Теоретически принцип активного шумоподавления позволяет достичь полной тишины, однако практическая реализация данной технологии сопряжена с существенными техническими сложностями. Основная проблема заключается в точном формировании противофазного сигнала, особенно в среднем (СЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах. Наибольшая эффективность систем активного шумоподавления наблюдается при подавлении низкочастотных монотонных шумов, что обусловлено значительной длиной волны сигналов низкой частоты, компенсирующей возможные погрешности фазовой инверсии. В случае недостаточно точного совпадения фаз для СЧ- и ВЧ-составляющих возможно возникновение паразитного акустического эффекта в виде характерного шипения.

Основопологающие принципы активного шумоподавления были сформулированы американским изобретателем Полом Люгом, получившим в 1934 г. патент на метод подавления звуковых колебаний посредством интерференции волн с инвертированной фазой. Практическое применение технология нашла в 1950-х годах в авиационной отрасли, где системы, разработанные Лоуренсом Фогелем, использовались для снижения шумовой нагрузки в кабинах воздушных судов. Значимым этапом развития стало создание в 1957 г. Уиллардом Микером первых накладных наушников с активным шумоподавлением, обеспечивавших подавление шумов в диапазоне 50...500 Гц с эффективностью до 20 дБ [6, 7].

В настоящее время разработкой и производством аудиотехники с активным шумоподавлением занимаются ведущие производители, включая Bose, Sennheiser, JBL, Sony, Audio-Technica и Philips.

Несмотря на очевидные достоинства, системы активного шумоподавления обладают рядом существенных ограничений. К их преимуществам относятся:

- эффективное подавление внешних шумов;
- высокий уровень пассивной звукоизоляции;

– снижение необходимости в опасном повышении громкости (свыше 100 дБ) в условиях повышенного шума.

Недостатками активной системы шумоподавления служат:

- требовательность к дополнительным источникам питания;
- повышенный риск дорожно-транспортных происшествий при использовании в условиях интенсивного городского движения.

Современные разработки направлены на минимизацию указанных недостатков при сохранении эффективности шумоподавления [4].

Принципы активного шумоподавления в акустических системах: от наушников к внешним модулям. Активное шумоподавление используется в современных наушниках в связи с простотой реализации аппаратной части данной технологии на уровне устройства. Цель данной работы — построение эскиза структурной схемы модуля для активного шумоподавления внешней акустической системы.

Чем же акустическая система отличается от наушников? В наушниках для активного шумоподавления применяется следующий алгоритм: микрофон, расположенный на внешней стороне корпуса наушников, считывает окружающий шум, далее с помощью аппаратной или программной части на динамики наушников добавляется шум в противофазе — таким образом осуществляется шумоподавление. Сам корпус наушников также служит элементом пассивного шумоподавления.

Для внешней акустической системы ситуация другая: в отличие от наушников, где корпус изолировал уши слушателя от шумов в дополнение к активному шумоподавлению, во внешней акустике имеется в лучшем случае закрытое помещение. Это помещение с помощью активного шумоподавления можно изолировать от внешних шумов, источники которых расположены за пределами комнаты, но от шумов, возникающих внутри комнаты, избавиться нельзя. Таким образом, следует разработать модуль активного шумоподавления для внешней акустической системы, с помощью которого можно будет изолировать комнату прослушивания от внешних шумов. Например, можно использовать следующий алгоритм работы этого модуля. Микрофон в реальном времени фиксирует звук из акустической системы и возможный внешний шум. Также имеется звуковая дорожка, подаваемая на акустическую систему. Вычитая из записи, сделанной микрофоном, запись, подаваемую на акустическую систему, получаем внешний шум, который в инверсии подается на те же динамики акустической системы. Данный алгоритм не учитывает затухание сигнала на расстоянии от акустической системы и может быть применен для ситуаций, когда акустическая система и слушатель находятся рядом (например, за компьютерным столом). Алгоритм работает, пока может

зафиксировать шум помимо сигнала из акустической системы, что логично, поскольку не имеет смысла выполнять шумоподавление для громкого сигнала, который и так способен заглушить внешний шум.

Ниже приведен листинг простого алгоритма работы модуля, написанный в среде MATLAB. Он демонстрирует процесс моделирования системы активного шумоподавления. Исходный аудиосигнал считывается из файла с сохранением данных в массив x и частоты дискретизации f_s . На основе этих параметров формируется временная шкала t_s , соответствующая длительности трека в секундах.

Моделирование работы системы осуществляется путем добавления искусственного гауссовского шума с отношением сигнал-шум 30 дБ к каждому каналу исходного сигнала, что имитирует сигнал, полученный микрофоном шумоподавляющего модуля. Далее вычисляется шумовая составляющая как разность между зашумленным и исходным сигналом с инверсией фазы. Процедура шумоподавления реализуется через сложение зашумленного сигнала с вычисленной шумовой компонентой [8, 9].

Визуализация результатов включает три графических окна. Первое окно (рис. 2) отображает исходный и зашумленный сигналы, второе (рис. 3) — выделенную шумовую и преобразованную в антишумовую составляющие, третье (рис. 4) — результат обработки в сравнении с исходным сигналом.

Алгоритм работы модуля активного шумоподавления акустической системы

```
clear, clc, close all

%% Чтение звукового файла и расчет времени в секундах
[x, fs] = audioread("HotelCalifornia.wav");
step = length(x)/fs;

ts = linspace(0, step, length(x));

%% Моделирование сигнала, полученного с микрофона модуля
xNoise(:,1) = awgn(x(:,1), 30);
xNoise(:,2) = awgn(x(:,2), 30);

%% Расчет шума
noise = (xNoise - x);
antinoise = noise .* (-1);

%% Шумоподавление
xClear = xNoise + nois;
```

```
%% Вывод графиков
figure;
subplot(4,1,1)
plot(ts, x(:,1)), grid on
title('Сигнал, подаваемый на акустическую систему');
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');
subplot(4,1,2)
plot(ts, x(:,2)), grid on
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');

subplot(4,1,3)
plot(ts, xNoise(:,1)), grid on
title('Сигнал, зафиксированный микрофоном модуля шумоподавления');
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');
subplot(4,1,4)
plot(ts, xNoise(:,2)), grid on
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');

figure;
subplot(2,1,1)
plot(ts(1000:1300), noise(1000:1300,1)), grid on
title('Фрагмент шума');
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');
subplot(2,1,2)
plot(ts(1000:1300), antinoise(1000:1300,1)), grid on
title('Фрагмент шума в противофазе');
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');

figure;
subplot(4,1,1)
plot(ts, xClear(:,1)), grid on
title('Сигнал после модуля шумоподавления');
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');
subplot(4,1,2)
plot(ts, xClear(:,2)), grid on
xlabel('Время');
ylabel('Амплитуда');
subplot(4,1,3)
plot(ts, x(:,1)), grid on
title('Сигнал, подаваемый на акустическую систему');
```

```
xlabel('Время');  
ylabel('Амплитуда');  
subplot(4,1,4)  
plot(ts, x(:,2)), grid on  
xlabel('Время');  
ylabel('Амплитуда');
```

Представленные теоретические данные и результаты работы алгоритма позволяют составить структурную схему модуля активного шумоподавления внешней акустической системы.

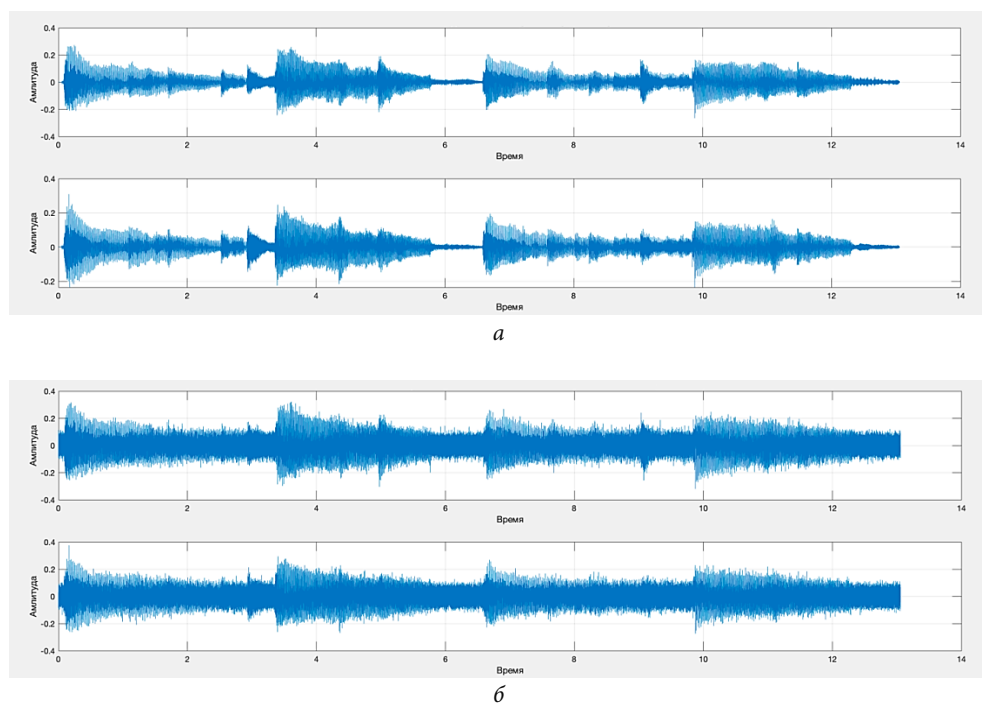
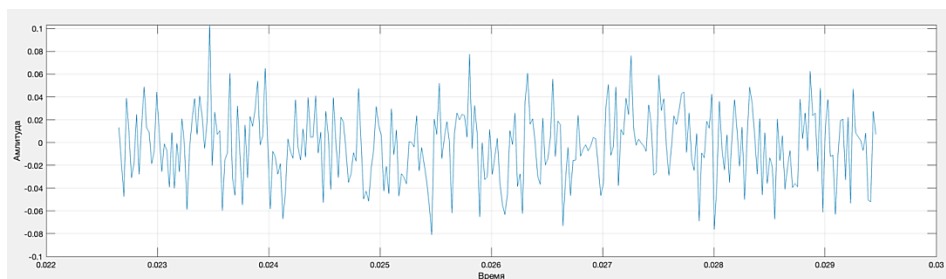
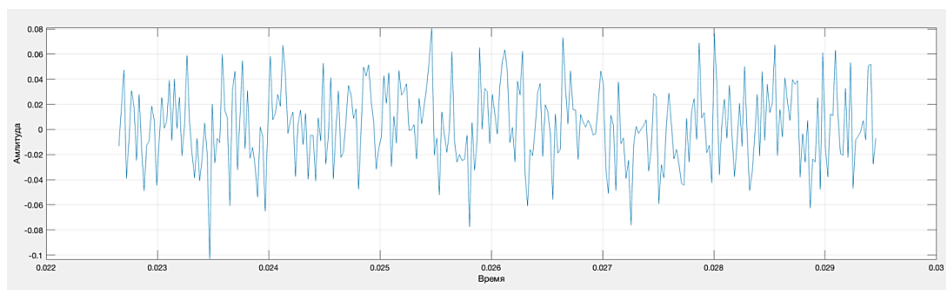


Рис. 2. Сигналы, подаваемые на акустическую систему и зафиксированные с помощью микрофона:

а — сигнал, подаваемый на акустическую систему; *б* — сигнал, зафиксированный микрофоном модуля шумоподавления

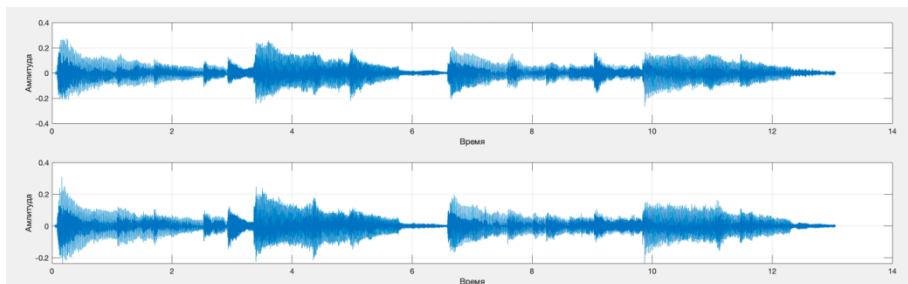


а

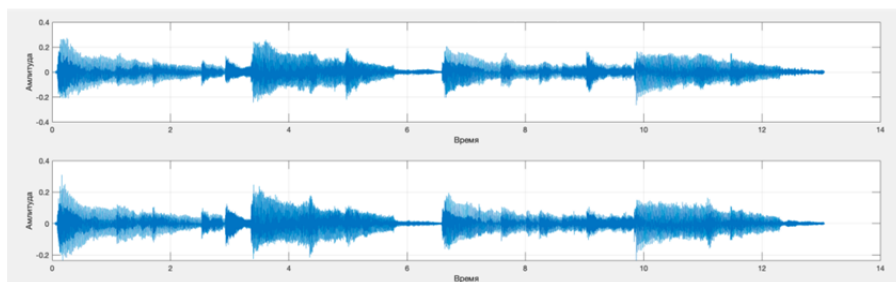


б

Рис. 3. Вычисленный шум (а) и шум в противофазе (б)



а



б

Рис. 4. Результат работы модуля шумоподавления:

а — сигнал после модуля шумоподавления; б — сигнал, подаваемый на акустическую систему

Разработка эскиза структурной схемы модуля активного шумоподавления внешней акустической системы. По результатам исследования технологии активного шумоподавления и написанного в среде MATLAB алгоритма можно выделить основные структурные блоки в конструкции модуля активного шумоподавления внешней акустической системы. В рамках данной работы рассмотрим применение такого блока для близкого прослушивания музыки, когда слушатель сидит на расстоянии до 1 м от акустической системы. Были выделены следующие основные блоки:

- блок питания;
- вход для микрофона;
- выход сигнала с усилителя (до выхода на акустическую систему);
- блок генерации шума в противофазе;
- блок защиты от всплесков;
- выход на акустическую систему [10–12].

На рис. 5 изображен эскиз структурной схемы с применением вышеописанных блоков.

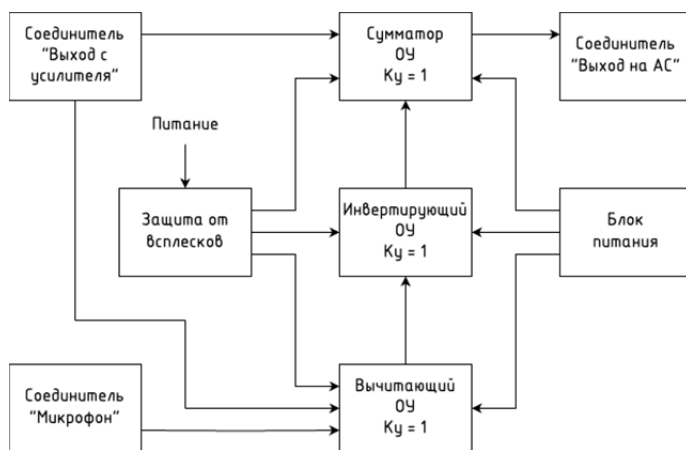


Рис. 5. Эскиз структурной схемы модуля активного шумоподавления внешней акустической системы

Как видно на эскизе, схема работы устройства следующая: на вход соединителя «Выход с усилителя» подается сигнал, который разделяется на две эквивалентные части, одна из частей поступает на блок генерации шума в противофазе. Этот блок состоит из вычитающего операционного усилителя (ОУ), на который также поступает сигнал, записанный с микрофона. На выходе вычитающего ОУ получается шумовой сигнал, который далее инвертируется

по фазе и поступает на сумматор на ОУ. В финале сумматор на ОУ складывает основной сигнал с противофазой шума, благодаря чему шум взаимно уничтожается и происходит шумоподавление. Блок питания необходим для работы ОУ. Блок защиты от всплесков, который можно реализовать на микроконтроллере, управляющем транзисторами или реле, необходим для защиты от шумов внутри комнаты — например, при громком разговоре или при падении предметов, вызывающих акустические всплески. В структурной схеме у всех ОУ коэффициент усиления равен единице, поскольку модуль рассчитан на использование вблизи акустической системы. Реализация вычитающего, инвертирующего и суммирующего устройств на ОУ позволяет уменьшить габариты модуля, так как можно использовать одну интегральную микросхему, в которой содержатся три изолированных друг от друга ОУ [13, 14].

Заключение. Проведенное исследование продемонстрировало принципиальную возможность реализации технологии активного шумоподавления для внешних акустических систем. Разработанный алгоритм, основанный на микрофонной записи звукового поля с последующим выделением шумовой компоненты и генерацией антифазного сигнала, подтвердил свою эффективность в ходе математического моделирования в среде MATLAB. Результаты показали значительное снижение уровня внешних шумовых помех при сохранении качества полезного сигнала.

Предложенная структурная схема модуля на базе ОУ отличается компактностью и может быть интегрирована в существующие акустические системы форматов 2.0/2.1. Особенностью решения является его ориентация на применение в условиях ограниченного пространства (ближнее поле до 1 м), что позволяет минимизировать влияние акустических искажений помещения. Включение в схему блока защиты от акустических всплесков обеспечивает устойчивость системы к резким изменениям звукового фона.

Литература

- [1] Власов А.И. Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей. *Приборы и системы управления*, 1997, № 12, с. 59–70.
- [2] Власов А.И., Володин Е.А., Семенцов С.Г., Шахнов В.А. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*, 2002, № 4, с. 3–23.
- [3] Шкритек П. *Справочное руководство по звуковой схемотехнике*. Москва, Мир, 1991, 446 с.

- [4] *Нетронутая тишина: несколько слов о наушниках с активным шумоподавлением. Хабр.* URL: <https://habr.com/ru/companies/pult/articles/402397/> (дата обращения 16.04.2025).
- [5] Балагуров А.В., Юрин А.П. Моделирование аналоговой системы активного шумоподавления. *Защита от повышенного шума и вибрации: Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч.: сб. докл.* Санкт-Петербург, б. и., 2013, с. 285–289.
- [6] Власов А.И. Нейросетевая реализация микропроцессорных систем активной акусто- и виброзащиты. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2000, № 1, с. 40–44.
- [7] Власов А.И. Принципы активного подавления действия вибрационных полей на электронную аппаратуру. *Приборы и системы управления*, 1996, № 11, с. 30–32.
- [8] Власов А.И., Семенцов С.Г., Поляков Ю.А. Микропроцессорные системы активной индивидуальной акустической защиты. *Микросистемная техника*, 2000, № 2, с. 15–20.
- [9] Власов А.И. Особенности построения систем автоматизированного синтеза и моделирования средств защиты от влияния волновых полей. *Информационные технологии*, 1997, № 9, с. 31–38.
- [10] Власов А.И. Аппаратная реализация нейрорадаптивных систем активного управления волновыми полями в промышленном стандарте РС-104. *Информационные технологии*, 1998, № 12, с. 13–17.
- [11] Арабов Д.И., Лукин Г.Д., Цивинская Т.А. Микрофонный усилитель на фантомном питании. *Технологии инженерных и информационных систем*, 2018, № 2, с. 48–57.
- [12] Дружичкий И.С., Бекасов Д.Е. Анализ методов слепого разделения сигнала для решения задачи разделения аудиоисточников. *Технологии инженерных и информационных систем*, 2016, № 3, с. 52–58.
- [13] Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. Москва, БИНОМ, 2023, 704 с.
- [14] Джонс М.Х. *Электроника — практический курс*. Москва, Техносфера, 2021, 512 с.

Поступила в редакцию 08.02.2026

Пылев Степан Сергеевич — магистрант кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пылев С.С. Исследование технологии шумоподавления внешней акустической системы. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 04(105). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1104.html>

STUDY OF ACTIVE NOISE CONTROL TECHNOLOGY FOR EXTERNAL LOUDSPEAKER SYSTEMS

S.S. Pylev

pylevstepan@gmail.com

SPIN-code: 4011-0260

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

In this paper, two main types of noise reduction are considered: passive and active attenuation. The article is devoted to the research of active extinguishing systems (AES) technologies with an emphasis on the development of a block diagram of a module for external acoustic systems. A comparative analysis of the implementation of AES in headphones and external systems is carried out, where the key difference is the absence of natural passive isolation. An algorithm for the operation of the module based on microphone recording of the sound field of a room with subsequent generation of an antiphase signal, implemented in MATLAB, is proposed. The simulation results are presented, demonstrating the isolation of the noise component and the effectiveness of its suppression. Based on the analysis, a sketch of the structural scheme of a compact near-field AES module (up to 1 m) has been developed, including signal processing units on operational amplifiers and protection against acoustic bursts. The solution is designed for use in conditions of limited space when working with 2.0/2.1 format systems.

Keywords: active noise reduction, active extinguishing systems, passive noise reduction, external acoustic systems, anti-phase signal, MATLAB modelling, operational amplifiers, structural scheme

Received 08.02.2026

Pylev S.S. — Master's student, Department of Design and Technology of Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Pylev S.S. Study of active noise control technology for external loud-speaker systems. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 04(105). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1104.html>