

Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

На правах рукописи

Семенцов Станислав Григорьевич

***МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И
СИНТЕЗА СРЕДСТВ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ***

Специальность 05.13.05 –
Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

2009

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом имени А.Г. Иосифьяна» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ», г. Москва).

Научный консультант: Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Шахнов Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
профессор Назаров Александр Викторович

Доктор технических наук
Юркевич Евгений Владимирович

Доктор технических наук,
профессор Ерофеев Владимир Иванович

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт интроскопии «Московское научно-производственное объединение «Спектр» (НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва)

Защита диссертации состоится 24 декабря 2009 г. на заседании диссертационного совета Д 002.226.03 при Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба высылать по адресу: 117997, ГСП-7, В-342, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

А.А. Кулинич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность:

Среди всего разнообразия дестабилизирующих факторов, воздействующих на человека, одним из самых распространенных и значимых являются акустические шумы, защита от которых стала актуальнейшей проблемой для всех развитых стран мира. Огромное внимание вопросам борьбы с шумом уделяется международными организациями. Так, техническим комитетом ISO т.к. 43 «Акустика» разработано более 50 стандартов, регламентирующих способы оценки источников шума и контроля за ними.

Пагубное физиологическое и психологическое воздействие шума хорошо изучено. Шумовые поля действуют угнетающе на человеческую психику, вызывают быструю утомляемость и раздражительность. Особенно неблагоприятно это воздействие в низкочастотной части спектра, где сосредоточена основная энергия излучения большинства источников звука и где обычные средства звукоизоляции малоэффективны. Разнообразные поглотители, демпферы, звукоизоляторы, называемые пассивными средствами защиты, обладают эффективным поглощением только при линейных размерах, сравнимых с длиной волны излучения, т.е. для гашения шума в диапазоне до 100 Гц на 10 дБ необходимо применение пассивного глушителя диаметром около 4 м. Это заставляет разрабатывать и использовать новые активные средства управления акустическими полями, использующие дополнительные источники энергии, способные адаптироваться к изменяющимся условиям среды в автоматическом режиме и реальном масштабе времени.

Широкому распространению активных методов управления, и в том числе методов активного гашения акустических полей, способствовали два обстоятельства: во-первых, необходимость снижения шума в низкочастотном диапазоне, где классические пассивные средства малоэффективны, во-вторых, успехи в области теории систем управления, вычислительной техники, цифровой обработки сигналов, микроэлектроники и миниатюризации электроакустических преобразователей, что позволило обеспечить высокие требования, предъявляемые к качеству гашения, быстродействию, устойчивости, массогабаритным характеристикам и другим технико-экономическим показателям систем активного гашения акустических шумов.

Долгое время основной областью применения средств акустической защиты являлись промышленные системы снижения шума в волноводах и индивидуальные системы промышленного и специального назначения, в том числе, например, системы защиты персонала палубной авиации и пилотов. В последние годы, в связи со значительным снижением стоимости, эти системы проникают и в бытовую сферу.

На основе проведенного анализа тенденций развития и опыта применения серийно выпускаемых и опытных образцов систем активного управления акустическими полями можно сделать вывод, что применение систем активного гашения (САГ) для защиты человека от воздействия интенсивных акустических полей весьма перспективно. Высокое качество таких элементов современных систем управления как электроакустические преобразователи, АЦП и ЦАП, сигнальные процессоры, позволяет получить ослабление внешнего шумового поля в среднем на 10-25 дБ для синусоидальных сигналов и 6-12 дБ для широкополосных сигналов в диапазоне частот 20-700 Гц.

Однако эти системы обладают рядом существенных недостатков, например, адаптивные системы индивидуальной защиты - невозможностью работы с источником полезного сигнала, что существенно ограничивает область применения подобных систем. Для

пространственных систем наиболее существенными проблемами являются отсутствие более или менее адекватных моделей объекта управления и, как следствие, невозможность оценки границ применимости тех или иных методов управления, чисто эмпирический или теоретический подход при построении подобных систем.

Важнейшей проблемой, стоящей перед разработчиками микропроцессорных систем активного управления акустическими полями, является разработка нового структурно-алгоритмического базиса как на уровне математических моделей элементов системы, так и на уровне математических и физических моделей объекта управления, максимальное использование результатов моделирования и современных средств цифровой сигнальной обработки, что позволит в итоге существенно расширить область применения подобных систем и повысить их качественные показатели.

В данной работе решена крупная народнохозяйственная проблема разработки научных основ создания средств активного управления акустическими полями с помощью моделирования передаточных функций, построенных на основе априорной информации об объектах управления. Применение теории в практических задачах позволило создать комплекс средств активного управления акустическими полями на базе новых методов, моделей и алгоритмов, которые до настоящего времени не могли быть реализованы с помощью существующих методик, технологий и средств проектирования.

Цели и задачи работы: повышение эффективности моделирования, разработки и проектирования систем активного управления акустическими полями, расширение области применения подобных систем. Для достижения поставленной цели ставятся задачи:

- анализ существующих и разработка новых методов синтеза и моделирования передаточных функций, аппроксимирующих функцию Грина для среды распространения, систем коллективной и индивидуальной защиты;
- оценка адекватности и границ применимости новых методов моделирования передаточных функций, а также методов их формализации;
- разработка моделей элементов и подсистем САГ, позволяющих оценить их влияние на параметры системы в целом;
- построение управляющих структур на основе новых методов и моделей и анализ их производительности на реальных сигналах;
- разработка структурно-функционального построения, аппаратного и программного обеспечения адаптивных САГ с учетом предполагаемой области применения.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использован математический аппарат теории автоматического управления, акустики и психоакустики, линейной алгебры, спектрального анализа, основ математической физики и теории цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Научная новизна работы состоит в следующем:

- на основе проведенного анализа активных средств управления акустическими полями предложены обобщенные критерии реализации активных систем, учитывающие используемую модель управления, особенности объекта управления и размерность системы;
- предложена метамодель реакции человека на воздействие низкочастотных акустических полей высокой интенсивности;
- разработана технология синтеза передаточных функций объекта управления для одномерного и трехмерного случая на основе априорной информации об объекте управления, проведена оценка границ адекватности предложенных моделей;
- проведен структурно-алгоритмический синтез систем индивидуальной и коллективной защиты с учетом особенностей объекта управления и используемых алгоритмов управления;
- синтезированы математические модели элементов системы и проведена оценка влияния их параметров на характеристики системы;
- разработаны варианты аппаратно-программной реализации активных систем управления акустическими полями, значительно расширяющие область применения подобных систем.

Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями систем в реальном масштабе времени на физических моделях и натурных объектах, а также внедрением результатов работы. Полученные в работе результаты подтверждают работоспособность предложенных методов активного управления акустическими полями, а также наглядно демонстрируют эффективность использования разработанных вариантов реализации систем в различных областях.

Положения выносимые на защиту:

- технология моделирования передаточных функций объекта управления для одномерного и трехмерного случаев с использованием аппарата модального и трассерного анализа;
- математические модели, структурные схемы и алгоритмы построения систем активного управления акустическими полями на основе средств цифровой обработки сигналов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований работоспособности таких систем;
- особенности аппаратно-программной реализации микропроцессорных САГ акустических воздействий на основе предложенных управляющих структур с учетом влияния нестационарности характеристик объекта управления;
- векторный критерий сопоставления вариантов конструкторско-технической реализации САГ с учетом предполагаемой области применения;
- обобщение результатов экспериментальных исследований САГ на моделях и натурных объектах.

Практическая ценность работы состоит в том, что модели и структурно-алгоритмические решения в построении широкополосных адаптивных систем активного гашения на основе алгоритмов цифровой фильтрации, рассмотренные в данной работе, позволяют реализовать эффективные одномерные и пространственные САГ, имеющие приемлемые массогабаритные и стоимостные характеристики.

Предложенная технология моделирования передаточных функций позволяет синтезировать модели объекта управления с достаточной точностью без проведения

экспериментальных исследований на основе априорной информации об объекте управления, в том числе, для объектов на этапе их проектирования.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных средств активной защиты от акустических воздействий показали, что данные средства можно использовать для решения широкого круга задач по акустической защите в самых различных областях, в том числе: защита палубного персонала современных авианосцев; машинистов железнодорожного транспорта; пилотов гражданской и военной авиации; технического персонала; пассажиров наземного и воздушного транспорта; снижение шума в волноводах и туннелях, а также в жилых помещениях и на промышленных объектах.

Например, результаты оценки эффективности индивидуальной системы активного гашения шума в реальном времени при реализации блока управления на базе платы ЦОС EZ-Kit с цифровым сигнальным процессором (ЦСП) ADSP-21061 при воздействии гармонических сигналов показали, что в среднем наблюдается ослабление внешнего шума с уровнем 86 дБ на 15-35 дБ в полосе до 700 Гц. Для полигармонических сигналов ослабление в полосе частот 20-500 Гц в среднем составляет 6-13 дБ. При гашении шума в волноводе с использованием неадаптивного цифрового блока управления и плоского магнитострикционного преобразователя эффективность гашения гармонических сигналов с уровнем 80 дБ составляет 60, 53 и 20 дБ для частот 330, 500 и 1 кГц соответственно. При использовании пространственной системы в замкнутом объеме эффективность гашения на частотах 50-150 Гц составляет 6-12 дБ.

Реализация результатов

Полученные в работе математические модели, алгоритмы и программы управления САГ, методика оценки параметров системы в зависимости от характеристик объекта управления, структурно-алгоритмический базис и конкретные схемотехнические решения построения широкополосных индивидуальных и коллективных систем активного гашения, использованы в проекте «Аппаратно-программные средства и интерактивные методы управления волновыми полями и создание на их основе дистанционных обучающих систем» осуществляемом в рамках межвузовской научно-технической программы "Научно-производственные и обучающие технологии на основе инженерно-физических комплексов" Министерства образования России.

Итоги работы также могут быть использованы в научно-производственных объединениях, специализирующихся в области борьбы с воздействиями волновых полей различной природы, например, в ГНЦ "ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова" (г. С.-Петербург), ГНЦ РФ "Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева" и ряде других.

Научные положения, выводы, рекомендации, полученные в диссертации, практические результаты работы и методики экспериментальных исследований САГ на натурных объектах использованы во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) при решении задачи снижения шума в обитаемых отделениях новых образцов техники специального назначения.

Предложенные в работе методики моделирования объектов управления, математические модели и алгоритмы управления использованы в учебном процессе факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы:

Результаты работы были представлены на XI международном конгрессе ‘Sound and Vibration’ (Россия, Санкт-Петербург, 5-8 июля 2004), международном семинаре «Современные конструкции активного шумопоглощения на железнодорожном транспорте» (Россия, г. Щербинка, 20-21 марта 2007).

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, докладывались на международных конгрессах, конференциях и семинарах.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 250 страниц, включая 112 рисунков, список литературы и приложения. Библиография содержит 110 наименований, из них 84 из иностранных источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко проанализировано современное состояние и тенденции развития систем активного управления акустическими полями. Рассмотрены результаты наиболее важных работ по активным системам. Обоснована актуальность темы диссертации, показаны цели настоящей работы. Оценены научная и практическая значимость работы. Отмечена необходимость в разработке новых средств акустической защиты, обладающих большей эффективностью и более широкими функциональными возможностями.

В первой главе кратко проанализированы используемые в настоящее время методы и средства защиты от акустических шумов. Проведен анализ уровня и спектра шумов современной техники, оценена степень восприимчивости к подобным шумам и их физиологическое патогенное воздействие на человека. На основе проведенного анализа разработана метамодель реакции человека на интенсивные низкочастотные воздействия.

По уровню акустических шумов на первом месте, безусловно, стоит движительная техника различного назначения и промышленные установки. Наиболее неблагоприятная шумовая обстановка складывается в обитаемых отделениях образцов техники, имеющих гусеничное шасси, в кабинах летного состава авиационной и космической техники, в помещениях прилегающих к скоростным трассам. Отмечено, что, несмотря на принимаемые меры по снижению уровня шума, шумоизоляции салонов и применение защитных барьеров, в силу физических ограничений, подавление низкочастотных составляющих крайне неэффективно.

Исследована психофизиологическая характеристика человека как объекта защиты. Применимость тех или иных средств защиты от шума определяется не только внешними факторами, но и физиологическими особенностями восприятия человеком акустических сигналов, внутриличностными психофизиологическими особенностями. При уровнях звукового давления свыше 90 дБ субъективное восприятие громкости не зависит от частоты и интенсивные низкочастотные колебания за счет эффектов нелинейности слуха воспринимаются так же хорошо, как и среднечастотные вплоть до инфразвукового диапазона. Инфранизкочастотные акустические колебания высокой интенсивности, даже не слышимые

сознательно как звук, тем не менее, воспринимаются подсознательно. Сигналы с частотами 3-16 Гц не дают отчетливого звукового ощущения, но уверенно обнаруживаются и вызывают самые различные психофизиологические реакции, причем интенсивность этих реакций значительно выше, чем на средних и высоких частотах при равном звуковом давлении. Проведена оценка симптоматики реакции на интенсивные низкочастотные воздействия с учетом длительности воздействий, энергетических и спектральных характеристик акустических полей.

Показано, что характерной особенностью слуха является значительное изменение порогов слышимости при наличии интенсивных низкочастотных маскирующих сигналов. Таким образом, на фоне интенсивных низкочастотных сигналов полезные сигналы с меньшей амплитудой не воспринимаются вплоть до отстоящих выше по частоте на несколько октав.

Показана малая эффективность пассивных средств на низких частотах, что обуславливает необходимость применения активных средств. Показано место систем индивидуальной и коллективной защиты среди широкого спектра систем активного управления акустическими полями. Кратко рассмотрены требования, предъявляемые к активным системам коллективной и индивидуальной защиты, а также достижимая в обоих случаях эффективность гашения. Показаны подходы к реализации и высокая эффективность одномерных систем активного управления акустическим полями. Кратко проанализированы образцы серийно выпускаемых систем активного гашения, ориентированные на различные области применения. Предложены обобщенные критерии реализации систем активного управления акустическими полями по нескольким критериям (рис. 1).

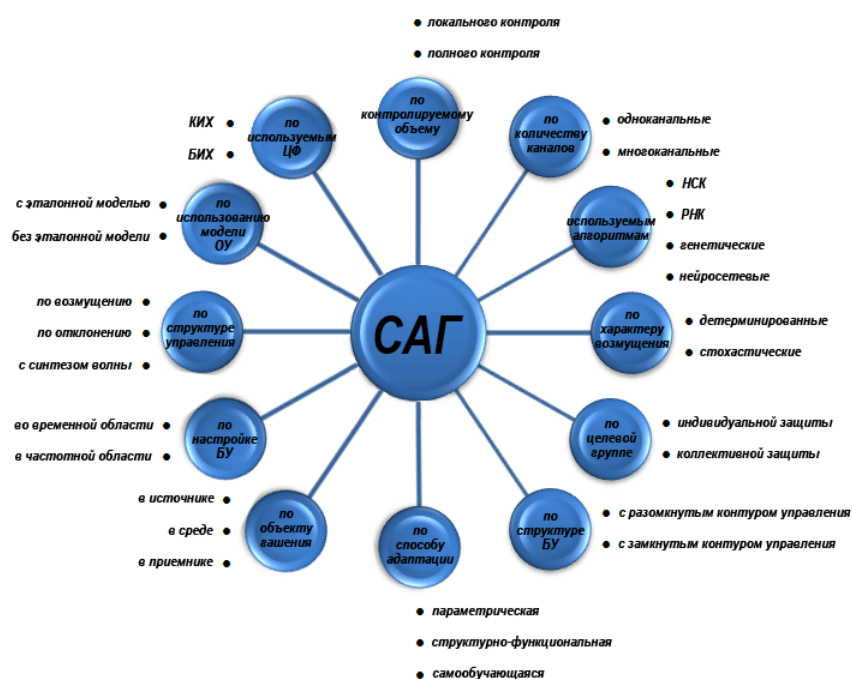


Рис. 1. Обобщенные критерии реализации систем активного гашения шума

Показано, что на сегодняшний день большинство существующих вариантов структурной реализации адаптивных систем реализуются без модели объекта управления (рис. 2).

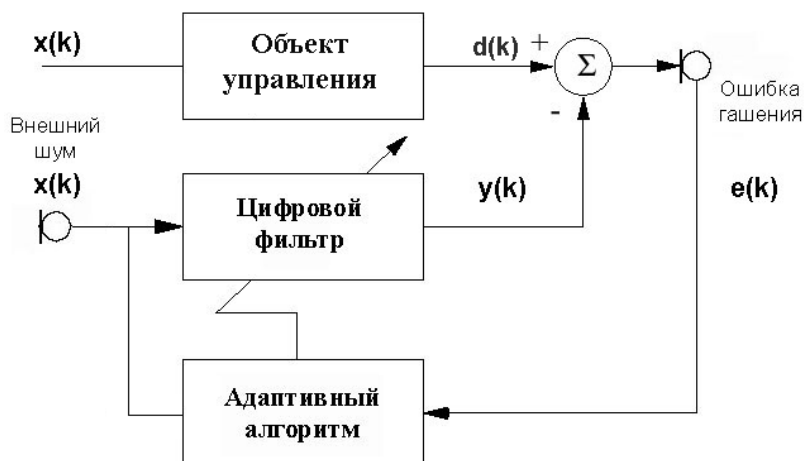


Рис. 2. Типовая структура блока управления адаптивных САГ

Это заставляет для адекватного описания объекта управления в случае пространственных систем использовать адаптивные фильтры высоких порядков, что обуславливает низкую скорость адаптации и сложность реализации подобных систем.

Используемые алгоритмы управления адаптивных систем индивидуальной защиты также обладают существенным недостатком – невозможностью работы с источником полезного сигнала. Показано, что решение этих задач позволит на новом теоретическом и практическом уровне подойти к решению проблемы защиты от акустических шумов. Разработанная в главе обобщенная классификация активных средств управления акустическими полями является основой для разработки управляющих структур и конкретных подсистем микропроцессорных адаптивных систем активной индивидуальной и коллективной акустической защиты.

Вторая глава посвящена исследованию математических моделей построения систем активного управления акустическими полями. Рассмотрены различные модели построения адаптивных систем активного гашения. Отмечены базовые ограничения теоретического решения – необходимость дискретизации поверхностей и знание функции Грина для среды распространения. Отмечено, что функция Грина описывает реальные объекты управления лишь качественно, т. к. на акустическое поле действует множество различных факторов, оценить которые в каждом конкретном случае очень трудно или вообще невозможно. Поэтому полученные на этапе моделирования результаты могут использоваться только как начальные значения перестраиваемого адаптивного фильтра блока управления.

Функция Грина может быть аппроксимирована с помощью адаптивного фильтра в процессе идентификации системы. Модификации адаптивных алгоритмов с использованием модели объекта управления (рис 3), например, алгоритм наименьших средних квадратов с формированием опорного сигнала (FX-LMS алгоритм), используют включенную в параллель к объекту управления модель его передаточной функции (модель вторичного канала).



Рис. 3. Структура блока управления адаптивной САГ с моделью передаточной функции объекта управления

В данном случае блок управления включает в себя модель передаточной функции, реализованную в виде цифрового фильтра, и адаптивный фильтр, учитывающий изменения передаточной функции и входного сигнала. При таком подходе адаптивный фильтр может быть реализован на базе цифровых фильтров значительно меньшей размерности, что позволяет повысить скорость сходимости и требования к аппаратной реализации системы.

Передаточная функция в частотной области в произвольном помещении в существующих решениях определяется экспериментально в процессе идентификации объекта управления при случайном входном воздействии методом оффлайн моделирования.

В оффлайн режиме необходимо экспериментальное определение реакции объекта управления $y(n)$ на случайное входное воздействие $x(n)$ при заданном расположении пары источник/приемник. Далее для сигналов $x(n)$ и $y(n)$ может быть проведена процедура идентификации передаточной функции (рис. 4). При проведении идентификации обычно используется адаптивный алгоритм наименьших средних квадратов (НСК).

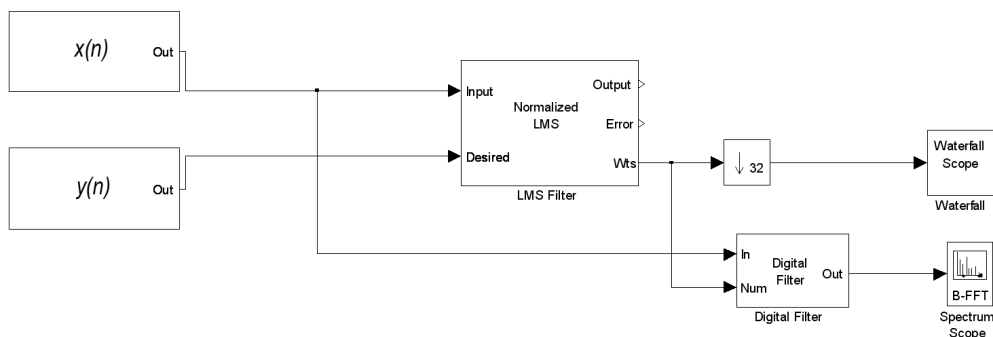


Рис. 4. Модель для идентификации передаточной функции методом оффлайн моделирования

В данной модели в процессе настройки адаптивного алгоритма формируется модель передаточной функции, реализованная в виде цифрового фильтра (блок Digital Filter)

Современные методы моделирования акустических полей, как аналитические, так и численные, позволяют синтезировать передаточные функции исходя из априорной информации о объекте управления (объем, интегральный коэффициент отражения и т. д.). Использование математического аппарата этих методов позволяет не только синтезировать передаточные

функции для реально существующих объектов, но и для объектов на этапе их проектирования, что открывает пути для создания систем автоматизированного проектирования систем активного гашения для широкого класса объектов.

Рассмотрены особенности моделирования акустических полей для случая пространственных систем, систем индивидуальной защиты и систем снижения шума в волноводах. Показано, что наиболее сложными для моделирования являются пространственные акустические поля в замкнутых объемах. В трехмерном случае для частот выше первой аксиальной моды, т. е. в модальной зоне, картина распределения звукового давления носит сложный характер и определяется помимо акустических параметров помещения также рядом других факторов: температура, влажность, расположение предметов и т. д., что обуславливает применимость лишь адаптивных систем.

Проведен анализ существующих методов моделирования передаточных функций в замкнутых объемах (рис. 5).

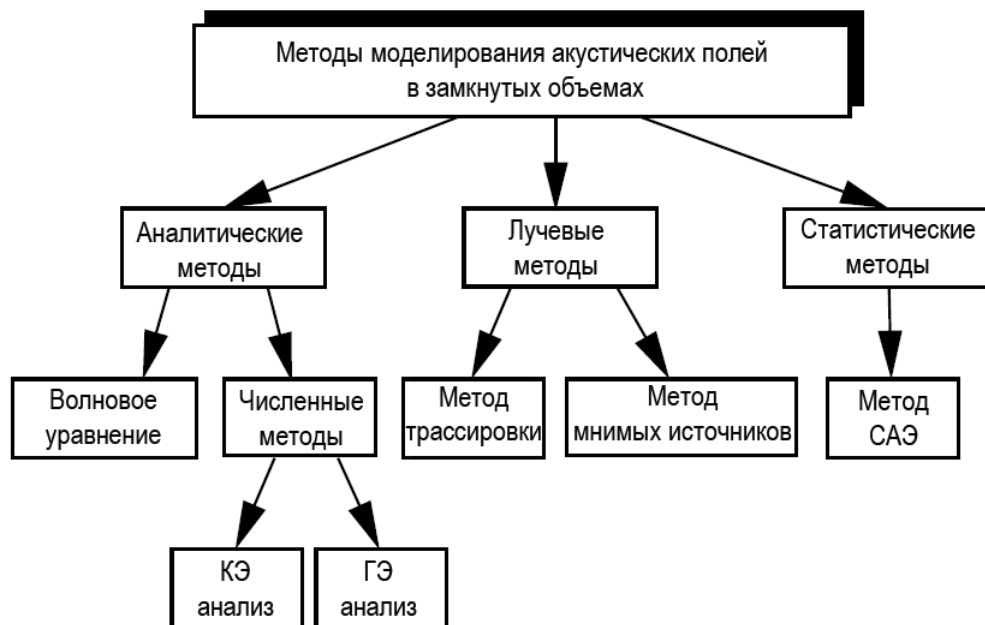


Рис. 5. Методы моделирования акустических полей в замкнутых объемах

В частности рассмотрены аналитическое решение волнового уравнения для заданных граничных условий, метод конечных элементов, трассерный анализ, модальный и реверберационный анализ. Кратко проанализированы границы применимости и адекватность получаемых моделей для описания объекта управления.

Аналитическое решение сводится к решению уравнения Гельмгольца, выраженного в декартовой системе координат,

$$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} + k^2 \hat{p} = 0.$$

Таким же образом мы можем записать общее выражение для звукового давления мод по каждой оси в виде:

$$\Psi_N(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{8}} (e^{-jk_x x} + e^{jk_x x}) (e^{-jk_y y} + e^{jk_y y}) (e^{-jk_z z} + e^{jk_z z}).$$

Эта модель в принципе позволяет провести декомпозицию акустического поля на отдельные моды для объемов произвольной формы, однако простое аналитическое решение существует только для прямоугольных, цилиндрических и сферических объемов.

Для перехода от модальной модели к передаточной функции среды необходимо найти функцию Грина для заданных граничных условий. Для граничных условий

$$\frac{\partial G(r, r_0)}{\partial n} = 0$$

функция Грина определяется как

$$G(r, r_0) = -\frac{1}{V} \sum_m \frac{\Psi_m(r) \Psi_m(r_0)}{k^2 - k_m^2}.$$

При введении в модель потерь, собственные значения становятся комплексными, с мнимой частью равной $1/(2\tau_m c)$, где τ_m - постоянная времени m -ой моды. В этом случае

$$G(r, r_0) = -\frac{1}{V} \sum_m \frac{\Psi_m(r) \Psi(r_0)}{k^2 - k_m^2 - jk_m / (\tau_m c)} = -\frac{1}{V} \sum_m \frac{\Psi_m(r) \Psi(r_0)}{k^2 - k_m^2 - jk / (\tau_m c)}.$$

Первая аппроксимация описывает комплексные собственные значения, учитывающие потери на границе, вторая – среду с потерями.

Получаемая реальная частотная характеристика может быть преобразована в импульсный отклик. Это предполагает, что реальная часть частотного отклика должна быть четной функцией частоты, мнимая часть должна быть нечетной функцией частоты, и реальная и мнимая части связаны между собой Гильбертовым преобразованием. За счет введения потерь отклик любой моды ограничен по амплитуде, даже если она возбуждается на собственной частоте моды. Также можно показать, что ширина полосы по уровню -3 дБ m -й моды равна $1/(2\tau_m c)$, где τ_m - постоянная времени m -ой моды.

Недостатком аналитического метода является возможность нахождения решения только для тривиальных случаев и граничных условий, соответствующих бесконечно жесткой или мягкой стенке. Для моделирования реальных объемов могут быть использованы численные методы, например методы конечных и граничных элементов, а также эмпирические методы, например метод суммирования мод.

Отмечено, что метод конечных элементов из-за громоздкости получаемой модели и сложности задания начальных и граничных условий целесообразно применять лишь для моделирования акустического поля в источнике.

Метод суммирования мод обеспечивает нахождение звукового давления, выраженного через модальное распределение для произвольной точки объема

$$|p| = \frac{\rho c^2}{\omega V} \sum_N \frac{\varepsilon_{x,y,z} \Psi(S) \Psi(R)}{2\omega_N k_N / \omega + i(\omega_N^2 / \omega - \omega)}.$$

В рамках этой модели коэффициент демпфирования каждой моды k_N вычисляется исходя из порядка моды и среднего коэффициента поглощения поверхности, с которой мода взаимодействует, т.е. коэффициент демпфирования каждой моды k_N и соответственно ширина ее полосы принимаются общими для всех типов мод в пределах третьоктавных полос. Однако на практике различно не только поглощение поверхностей в пределах

третьоктавных полос, но и поглощение для каждого типа мод (рис. 6).

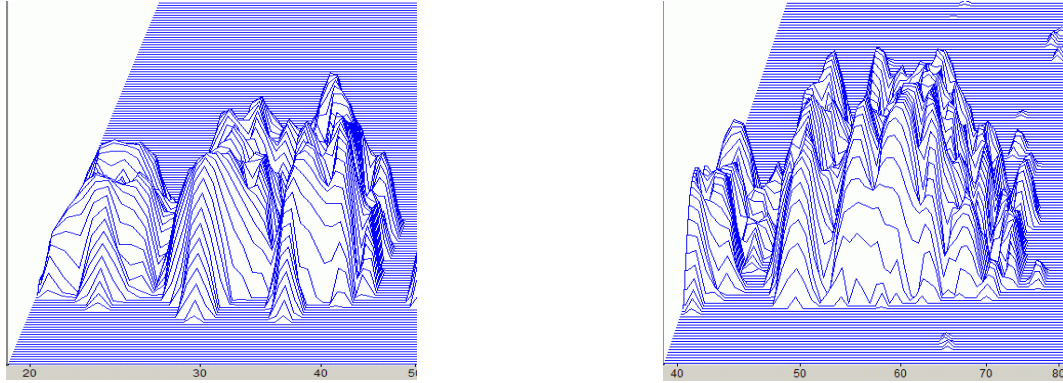


Рис.6. Затухание модальных компонент при узкополосном возбуждении

Каждая реверберационная кривая в октавных и третьоктавных полосах включает в себя усредненное затухание многих мод. Поскольку ширина полосы каждой моды и амплитуда однозначно связаны с постоянной времени, то аппроксимировать с достаточной для использования в системах активного управления точностью функцию Грина в помещениях простой формы позволяет совместное использование модального и узкополосного реверберационного анализа. Если принять, что при отражении изменяется только амплитуда каждой моды, то можно выразить суммарную энергию моды в виде интеграла

$$E_m = \int_V \frac{|\hat{p}_m|^2}{2\rho c^2} dV = \int_V \frac{A_m^2 \Psi_m^2}{2\rho c^2} dV,$$

где A_m - амплитуда каждой моды. Звуковая мощность, поглощенная поверхностью, находится интегрированием произведения среднего квадрата звукового давления и реальной части акустической проводимости поверхности

$$P_{\text{погл}} = \int_S I \cdot dS = \int_S \frac{|\hat{p}_m|^2}{2} \text{Re}\{Y\} dS = \int_S \frac{A_m^2 \Psi_m^2}{2} \text{Re}\{Y\} dS,$$

где Y – акустическая проводимость поверхности.

Тогда для данного типа мод постоянная времени будет константой и определяется для косых, тангенциальных и аксиальных мод как:

$$\tau_m = \begin{cases} \frac{V}{2\rho c^2 S \text{Re}\{Y\}} = \frac{V}{2cS \text{Re}\{\beta\}} \\ \frac{3V}{5\rho c^2 S \text{Re}\{Y\}} = \frac{3V}{5cS \text{Re}\{\beta\}} \\ \frac{3V}{4\rho c^2 S \text{Re}\{Y\}} = \frac{3V}{4cS \text{Re}\{\beta\}} \end{cases},$$

где $\beta = \rho c Y$ – безразмерная величина.

Это решение позволяет при использовании метода суммирования мод учитывать различное затухание и соответственно находить ширину полосы для каждого типа мод. Также учитывается различный коэффициент поглощения поверхностей при расчете взаимодействующих с ними мод низкого порядка.

Трассерный анализ является одним из наиболее эффективных и быстроразвивающихся

методов моделирования акустики помещений сложной формы и позволяет учитывать помимо геометрии помещения и ряд других факторов, таких как температура, влажность, расположение в помещении приемников и излучателей, материал покрытий. Однако разработка модели и расчет поля для больших помещений сложной формы, особенно при учете отражений высоких порядков и комплексном акустическом импедансе поверхностей, требует значительных затрат машинного времени.

Для частот выше первой аксиальной моды с использованием трассерных методов разработана модель (рис. 7) акустического поля в помещении, что позволяет аппроксимировать в первом приближении функцию Грина для среды распространения и использовать ее в качестве модели передаточной функции объекта управления.

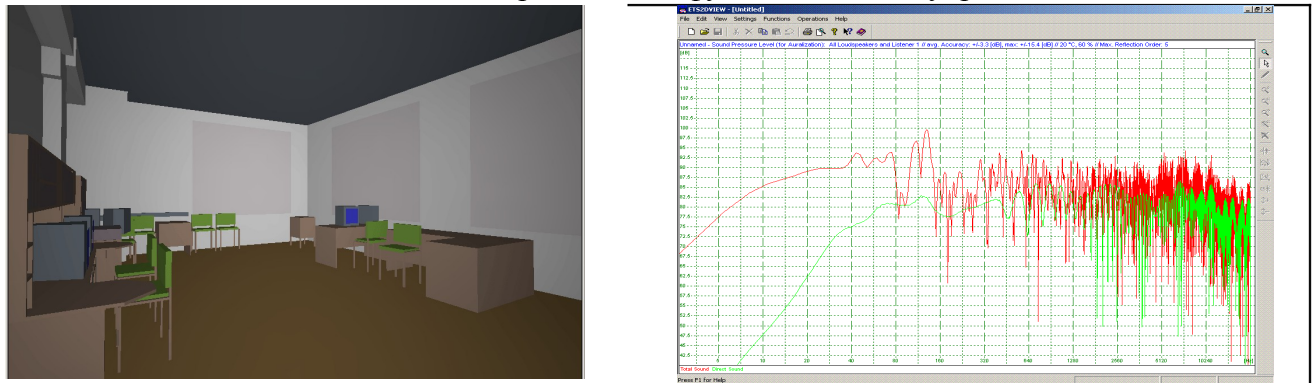


Рис. 7. Трассерная модель объекта управления и ее отклик в частотной области

Оценено влияние ошибок моделирования передаточных функций на параметры САГ в целом. Показано что если ошибка моделирования по частоте модальных компонент не превышает их ширины полосы и ошибка по фазе не превышает $\pm 90^\circ$, то адекватность синтезируемых моделей при правильном выборе режимов моделирования и используемых для процедуры идентификации алгоритмов достаточна для применения в составе адаптивных FX-LMS и leaky-FX-LMS алгоритмов.

Для небольших помещений с высокой пространственной плотностью распределения модальных компонент модель можно считать адекватной для произвольной точки объема. В больших помещениях пространственная структура менее однородна и для ее описания необходимо учитывать изменение отклика при переходе от одной точки объема к другой. В этом случае система может быть реализована во временной области с одним адаптивным фильтром высокого порядка, так и в частотной области с несколькими короткими адаптивными фильтрами, оперирующими на частотах наиболее значимых модальных компонент.

При построении активных индивидуальных систем защиты необходимо учитывать влияние ряда передаточных функций, описывающих изменение спектральных характеристик сигнала при прохождении от источника шума до барабанной перепонки (рис. 8).

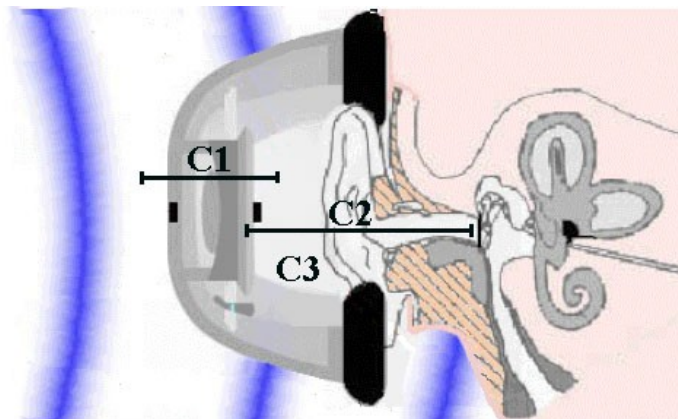


Рис. 8. Анализ объекта управления для случая индивидуальной защиты

На участке C1 передаточная функция зависит от пассивного поглощения чашки и описывается фильтром низких частот с частотой среза 300-350 Гц. На участке C2 передаточная характеристика определяется режимом работы излучателя и может быть описана фильтром высоких частот с частотой среза 40-100 Гц.

Полученные в гл.2 результаты позволяют использовать для аппроксимации объекта управления в одномерном и трехмерном случаях трассерные и модальные модели, что дает возможность значительно упростить процесс синтеза передаточных функций.

Третья глава посвящена исследованию и разработке структурно-функциональных схем управления систем активного гашения.

Показано, что для локального управления пространственным акустическим полем в помещении могут быть использованы одномерные системы. Такой подход обусловлен возможностью получения за счет оптимизации расположения приемников/излучателей зон тишины в помещении, а также сложностью моделирования и реализации многомерных многосвязных систем управления реального времени. Одномерная модель управления позволяет также учитывать помимо модели объекта управления также и влияние волновой обратной связи, параметров используемых преобразователей.

Проведен анализ применимости аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей различного типа в системах активного гашения. Разработаны модели преобразователей в среде MATLAB, позволяющие оценить особенности их работы с различными классами сигналов. Показано, что, несмотря на меньшую эквивалентную разрядность, параллельные преобразователи имеют преимущества перед одноразрядными при работе со случайными сигналами, а также меньшее время преобразования. Также разработаны модели для электроакустических преобразователей, учитывающие их типовые частотные и фазовые характеристики, а также используемый тип акустического оформления.

На основе разработанных моделей элементов системы предложены управляющие структуры для одномерных систем гашения шума в помещении и систем индивидуальной защиты (рис. 9).

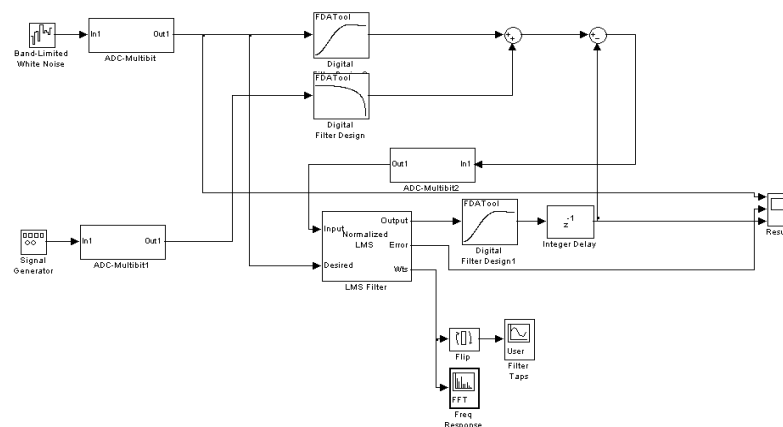


Рис. 9. Модель управления одномерной адаптивной системы индивидуальной защиты

Модель включает в себя помимо передаточных функций и моделей элементов системы также источники полезного (random) и шумового (chirp) сигналов.

Полученные в гл. 3 модели структурно-функционального построения систем активного гашения для одномерного и пространственного случаев дают возможность провести моделирование работы систем в различных режимах (устойчивость, сходимость, эффективность), оценить влияние на параметры системы ее отдельных элементов, в том числе используемых алгоритмов адаптации, а также разработать на их основе управляющие структуры для реальных систем активного управления акустическими полями.

Четвертая глава посвящена исследованию эффективности алгоритмов управления систем активного управления акустическими полями, моделированию работы предложенных управляющих структур при различных входных воздействиях и оценке полученных на этапе моделирования результатов.

Кратко рассмотрены основные алгоритмы управления, используемые при создании блоков управления адаптивных систем активного гашения. Математическим аппаратом, используемым при создании блока управления, являются модифицированные адаптивные алгоритмы Уидроу-Хоффа.

Для блока управления системы индивидуальной защиты предложено применение модификации алгоритма наименьших средних квадратов, использующей опорный входной сигнал (desired input). Такой подход позволяет реализовать адаптивную систему индивидуальной защиты, работающую с любым источником полезного сигнала и использующую лишь один опорный сигнал – сигнал ошибки.

Для пространственных систем могут быть использованы модификации FX-LMS алгоритма: с забыванием (leaky FX-LMS) и filtered-error-LMS-алгоритм, обеспечивающие максимальную устойчивость и малую чувствительность к ошибкам моделирования передаточных функций.

Для предложенных моделей проведено моделирование устойчивости и сходимости при различных входных сигналах, порядках и структурах фильтров. Основные результаты

моделирования приведены на рис. 10.

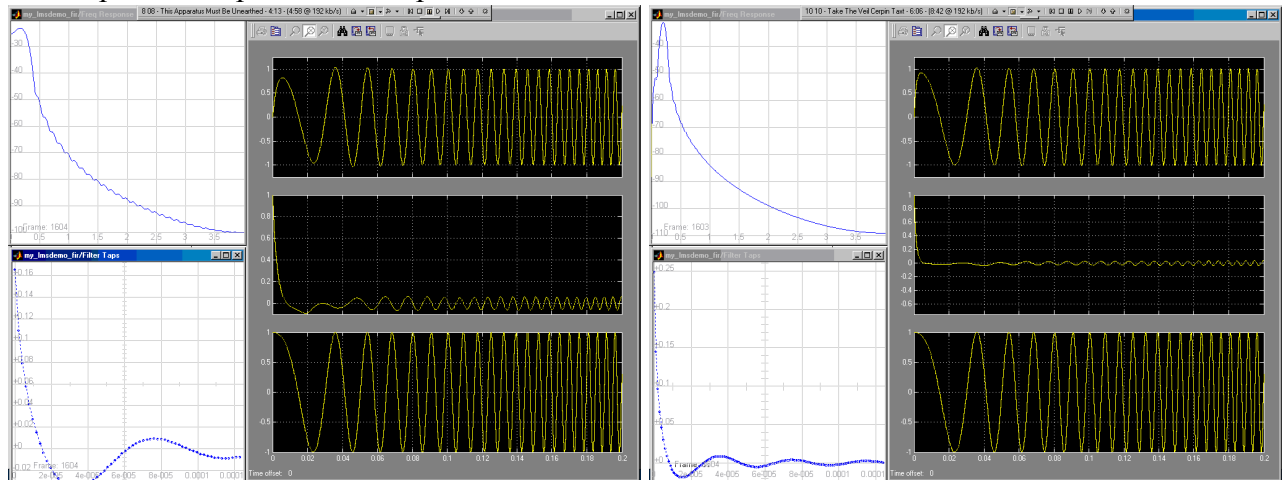


Рис. 10. Результаты исследования устойчивости и сходимости предложенных управляющих структур для нормализованного НСК-алгоритма

Сходимость и устойчивость системы, определяется помимо типа используемого адаптивного алгоритма, также размером шага адаптации, фазовым сдвигом, вносимым элементами системы, скоростью изменения входного сигнала и ошибкой моделирования передаточной функции.

Проведен сравнительный анализ использования арифметики с плавающей и фиксированной точкой и показано ее влияние на параметры системы. Показано что при использовании арифметики с фиксированной точкой без дополнительной оптимизации кода из-за эффектов конечной разрядности возможна потеря устойчивости адаптивных алгоритмов.

Полученные в гл. 4 результаты дают возможность использовать полученные на этапе моделирования выводы для создания реальных аппаратных и программных подсистем САГ, работающих в режиме реального времени.

Пятая глава посвящена разработке структурно-функционального построения аппаратно-программных средств, реализующих предложенные управляющие структуры.

Показано, что реализация адаптивных систем возможна на базе быстродействующих средств цифровой сигнальной обработки, осуществляющих непрерывную адаптацию системы к изменяющимся условиям среды в реальном масштабе времени. В зависимости от области применения реализация структуры блока управления может быть различной, начиная от простейших трансверсальных фильтров и заканчивая мультипроцессорными системами с распараллеливанием вычислительных потоков.

Показаны пути перехода от моделей управляющих структур к реальным цифровым фильтрам, реализованным на базе процессоров сигнальной обработки Motorola и Texas Instruments с использованием стандартных библиотек пакета MATLAB, а также процессоров Analog Devices с использованием библиотечных модулей на языке C.

Разработаны требования к элементам регистрирующего и компенсирующего блоков и проанализированы варианты их конструктивной реализации. На основе проведенного анализа с учетом разработанных требований предложены различные варианты построения блоков в зависимости от предполагаемых областей применения.

Проведен синтез цифрового блока управления адаптивной системой. Рассмотрены особенности реализации библиотечных модулей обработки на базе цифровых сигнальных процессоров и ПЛИС и предложены варианты их использования с учетом быстродействия и стоимости. Рассмотрены вопросы применения новых типов электроакустических преобразователей в системах активного гашения. Показано, что применение, например, магнитострикционных преобразователей позволяет строить на их базе высокоэффективные системы снижения шума в волноводах.

Рассмотрены вопросы разработки программного обеспечения системы индивидуальной защиты. Проанализированы прикладные пакеты разработки программного обеспечения для систем защиты, а также системы отладки и симуляторы, позволяющие протестировать ПО на стадии разработки. На основе проведенного анализа для обеспечения универсальности разрабатываемого ПО предложено использовать интегрированную графическую среду разработки Visual DSP, включающую в себя Си-компилятор, отладчик, симулятор и модуль поддержки различных аппаратных средств. Такой выбор обусловлен высоким качеством Си-компилятора, что позволяет обойтись без дополнительной оптимизации кода, а также универсальностью пакета, т.е. возможностью работы с процессорами семейств ADSP-218x, SHARC, Tiger SHARC и Blackfin.

На рис. 11 приведена схема организации и взаимодействия аппаратных и программных средств, реализующих предложенные управляющие структуры.

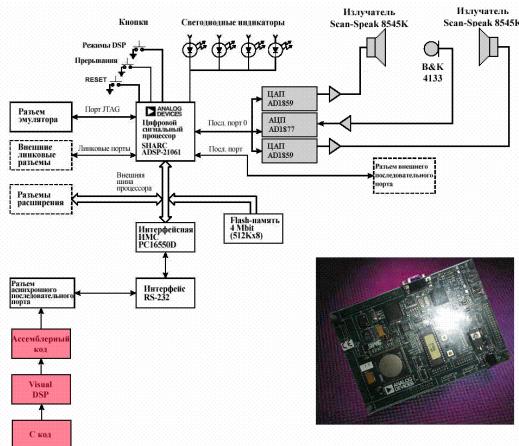


Рис. 11. Взаимодействие аппаратных и программных средств блока управления САГ

В заключении главы приведены результаты разработки структурно-функционального построения аппаратно-программных средств микропроцессорных адаптивных систем активной коллективной и индивидуальной акустической защиты, показаны пути модификации систем в зависимости от предполагаемой области применения.

Шестая глава посвящена результатам экспериментальных исследований и оценке полученных результатов работы различных модификаций системы на натурных объектах и физических моделях.

Разработано структурно-функциональное построение экспериментальных установок для исследования разработанных макетных образцов систем активного управления акустическими полями. Разработана методика экспериментальной оценки качества гашения.

Экспериментальные исследования системы коллективной защиты проводились с использованием адаптивного блока управления на базе отладочного модуля цифровой

сигнальной обработки ADSP-BF533 в безэховой камере и в жилом помещении объемом 130 куб. м. Для данного помещения частота первой аксиальной моды составляет 22 Гц. Исследовалась пространственная структура остаточного акустического поля в режиме активного гашения на синусоидальном сигнале частотой 330 Гц. Для проведения измерений был использован многоканальный измерительный комплекс Bruel&Kjaer Pulse. Результаты измерений приведены на рис. 12.

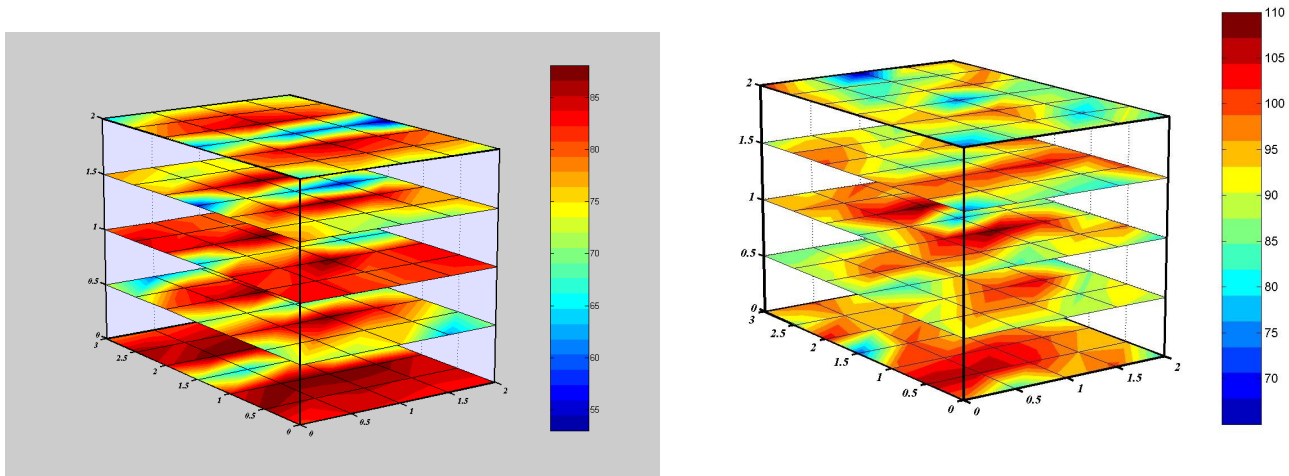


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований системы активного гашения на частоте 330 Гц в безэховой камере (слева) и жилом помещении (справа)

По результатам эксперимента можно констатировать, что система обеспечивает снижение уровня шума в среднем на 10 дБ для частоты 330 Гц, но если в случае безэховой камеры достигается высокая однородность и детерминированность областей с низким звуковым давлением, то для реального помещения размер и расположение областей с низким звуковым давлением носит сложный характер. Результаты эксперимента подтверждают вывод о том, что при решении задачи активного гашения в реальных помещениях выше частоты первой аксиальной моды возможно лишь локальное гашения шума в заданных точках. Размер защищаемых областей определяется длиной волны возмущающего сигнала.

При экспериментальных исследованиях системы индивидуальной защиты в качестве акустической модели слухового тракта использована физическая модель «искусственное ухо».

Для реализации цифрового адаптивного блока управления экспериментальной установки использованы стандартные отладочные средства цифровой обработки EZ-Kit Sharc ADSP-21061. Проведена оценка эффективности гашения при воздействии синусоидального сигнала плавающей частоты с уровнем 80 дБ в диапазоне от 20 Гц до 2 кГц, а также однотонального сигнала с частотой 400 Гц (рис. 13). В диапазоне до 500 Гц разработанная система обеспечивает уровень подавления внешнего шума в среднем на 20 дБ. Выше частоты 700 Гц ослабление шума составляет в среднем 15 дБ. Неравномерность характеристики объясняется влиянием волновой обратной связи между датчиками и излучателем, а также влиянием фазовых характеристик элементов системы.

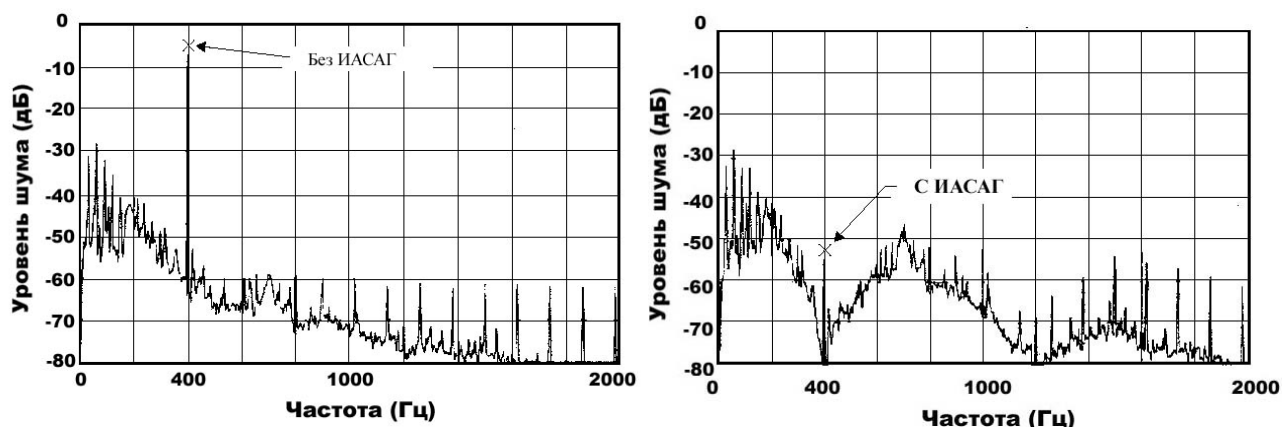


Рис. 13. Эффективность гашения внешнего шума экспериментальной установкой при воздействии узкополосного сигнала 400 Гц

Также проводились экспериментальные исследования системы активного гашения шума медицинского оборудования с моделью передаточной функции. Компенсирующий источник располагался непосредственно на корпусе прибора. Пространственная структура акустического поля при гашении частотной компоненты 100 Гц приведена на рис. 14.

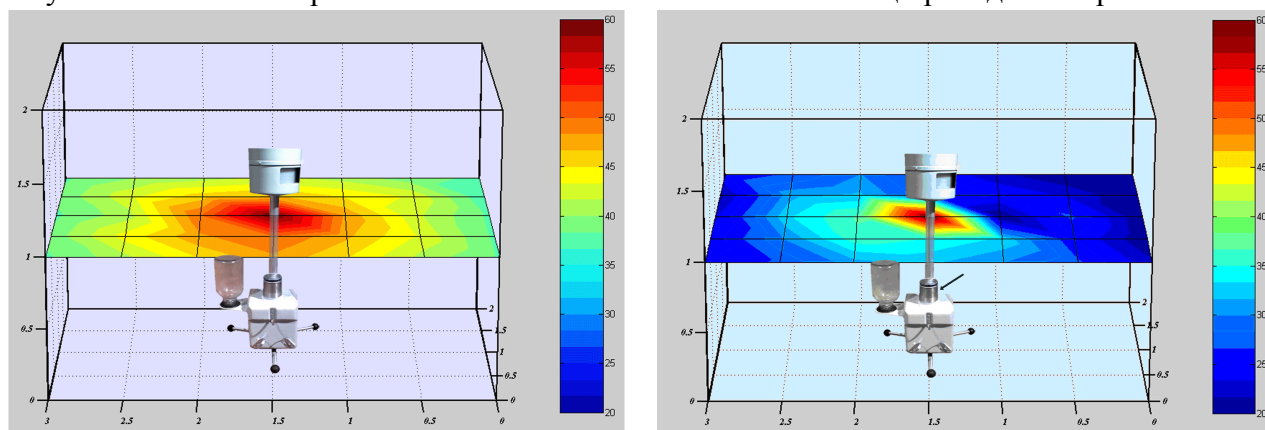


Рис. 14. Результаты экспериментальных исследований системы активного гашения шума медицинского оборудования на частоте 100 Гц

Полученные в гл. 6 результаты подтверждают работоспособность и эффективность разработанных вариантов микропроцессорных систем коллективной и индивидуальной защиты, созданных на основе предложенного структурно-алгоритмического базиса.

В заключении приведены основные результаты работы и показаны перспективы развития систем активного управления акустическими полями. Показано, что дальнейшее увеличение эффективности и функциональности систем может быть достигнуто при переходе к многомерным пространственным системам с использованием оптимизационных алгоритмов размещения элементов системы. Отмечено, что на сегодняшний день наиболее перспективным путем развития активных систем является совместное использование активных и пассивных методов акустической защиты.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ:

- на основе проведенного анализа активных средств управления акустическими полями выявлены особенности их реализации с учетом используемой модели управления, наличия

дополнительных источников энергии, а также характеристик объекта управления и размерности системы;

- с учетом психоакустических особенностей восприятия разработана метамодель реакции человека на воздействие низкочастотных акустических полей высокой интенсивности;
- предложена технология синтеза передаточных функций на основе априорной информации об объекте управления с использованием модальных и трассерных методов, значительно упрощающая процесс синтеза САГ для различных объектов;
- синтезированы передаточные функции объекта управления для случая локальных пространственных систем и систем индивидуальной защиты, проведена оценка границ адекватности предложенных моделей;
- построены математические модели элементов системы и проведена оценка влияния их параметров на характеристики системы;
- проведено математическое моделирование систем индивидуальной и коллективной защиты при различных входных воздействиях с учетом особенностей объекта управления. Оценено влияние используемых алгоритмов адаптации на параметры системы;
- предложен критерий сопоставления вариантов аппаратно-программной реализации активных систем управления акустическими полями с использованием современных средств сигнальной обработки;
- созданы установки САГ шума медицинского оборудования, электрических машин специального назначения, установки локального гашения шума в помещении, гашения шума в волноводе;
- на основе обобщенных результатов экспериментальных исследований пространственных и одномерных систем показано, что их эффективность, в зависимости от характера объекта управления, составляет 4-25 дБ в полосе 20-300 Гц; указаны пути дальнейшего совершенствования подобных систем.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

Научно-практические статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Семенцов С.Г. Моделирование передаточной функции вторичного канала систем активного гашения шума // Информационно-управляющие системы, 2008, №4, С.18-22.
2. Семенцов С.Г., Шахнов В.А., Власов А.И., Володин Е.А. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 2002, №4, с.3-23.
3. Семенцов С.Г., Власов А.И. Системный анализ на основе моделирования передаточных функций вторичного канала для систем активного гашения шума авиационной техники // Авиакосмическое приборостроение. 2008. №10, с. 43-49.
4. Семенцов С.Г. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи в системах активного управления акустическими полями. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2008. №4 с. 88-102
5. Семенцов С.Г. Применение адаптивных алгоритмов для моделирования передаточной

функции вторичного канала систем активного гашения шума. // Информационно-управляющие системы, 2009, №2, С.24-27.

6. Семенцов С.Г. Применение систем активного гашения с моделью передаточной функции для снижения шума медицинского оборудования и машин с ограниченным шумом. Вопросы электромеханики. Том 106, 2008, с. 8-14

7. Семенцов С.Г., Власов А.И. Анализ эффектов конечной разрядности в системах цифровой обработки сигналов // Датчики и системы, 2009, №6, с. 39-43.

8. Семенцов С.Г. Применение систем активной акустовиброзащиты с моделью передаточной функции для снижения шума электронной аппаратуры // Надежность, 2008, №4, с. 42-47

9. Семенцов С.Г., Аксенов А.В., Кобзарев А.Н. Общий подход к построению операционных систем реального времени в системах управления // Вопросы электромеханики. Том 101, 2004, с. 188-199.

Научно-практические статьи

10. Семенцов С.Г. Применение цифровых сигнальных процессоров на платах АЦП: плюсы и минусы. // Компоненты и технологии. №4 2000. С.50 - 51.

11. Семенцов С.Г., Власов А.И., Поляков Ю.А. Микропроцессорная система активной индивидуальной акустической защиты // Микросистемная техника. №2. 2000. С. 15 - 20.

12. Семенцов С.Г., Власов А.И., Поляков Ю.А. Цифровые сигнальные процессоры - элементная база современных систем управления: тенденции и перспективы развития // Датчики и системы. №6. 2000. С.61-69.

13. Семенцов С.Г., Власов А.И., Поляков Ю.А. Микропроцессорная адаптивная система активной индивидуальной акустической защиты // Сборник трудов молодежной научно-технической конференции "Наுகоемкие технологии и интеллектуальные системы в XXI веке". Москва. 2000 г. С. 16 - 24.

14. Семенцов С.Г., Власов А.И., Поляков Ю.А. Цифровые сигнальные процессоры - элементная база современных систем управления // Сборник трудов молодежной научно-технической конференции "Наுகоемкие технологии и интеллектуальные системы в XXI веке". Москва. 2000 г. С. 229 - 238.

15. Семенцов С.Г., Соловьев А.Н. Новые цифровые процессоры обработки сигналов фирмы Analog Devices // Компоненты и технологии. №8 2000 С. 16 - 18.

16. Семенцов С.Г., Власов А.И., Володин Е.А. Проектирование и применение систем активной защиты от акустических воздействий // Сборник научных статей и тезисов 2-й Международной конференции "Молодые ученые - промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения". Москва. 13 - 17 ноября 2000 г. С. 83 – 85.

17. Семенцов С.Г., Поляков Ю.А., Власов А.И. Архитектура TigerSHARC" и ее возможности при построении нейровычислителей // Сборник научных статей и тезисов 2-й Международной конференции "Молодые ученые - промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения". Москва. 13 - 17 ноября 2000 г. С. 75 – 76.

18. Семенцов С.Г., Геча В.Я., Коноплев А.М. Концепция обеспечения безопасности Linux-подобных операционных систем в системах управления и защиты реакторов АЭС // Вопросы электромеханики. Том 101, 2004, с. 132-140.

19. Семенцов С.Г., Герман Н.Р. Linux-подобные операционные системы в системах, важных для

безопасности АЭС // Вопросы электромеханики. Том 101, 2004, с. 141-150.

20. Семенцов С.Г., Выпов П.А. Опыт создания специализированной операционной системы LINEM для систем управления и защиты АЭС // Вопросы электромеханики. Том 101, 2004, с. 174-181.

21. Семенцов С.Г., Выпов П.А. Связывание паттернов проектирования с программным кодом // Сборник трудов 6-й молодежной научно-технической конференции "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы". Москва. 2004 г. С. 267 - 272.

Доклады на конференциях

1. S. Sementsov, V. Gecha. New Types of Electroacoustic Transducers in ANC Systems. Thesis of XI International Congress "Sound and Vibration", 5-8 July 2004, St.-Petersburg, Russia.

2. Семенцов С.Г., Половинкина Т.В. Особенности аппаратно-программной реализации систем активного снижения шума транспортных потоков // Материалы международного семинара «Современные конструкции активного шумопоглощения на железнодорожном транспорте» г. Щербинка, 20-21 марта 2007.

Личный вклад автора

В работах поз. 2, 3, 7, 9 автором разработаны механизмы формирования передаточных функций, проведено численное моделирование алгоритмов и элементов систем управления акустическими полями. В работах поз. 11-21 автором предложены теоретические положения разработки систем активного управления акустическими полями на базе предложенных механизмов, описаны схемы практической реализации систем.