

Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития

А. И. Власов, Володин Е. А., С. Г. Семенцов, В. А. Шахнов

Рассмотрены вопросы теории и практики построения средств активного управления волновыми полями (акустическими, вибрационными, электромагнитными). Приведены сравнительные характеристики основных алгоритмов активного управления. Проанализированы особенности построения интеллектуальных систем активного управления акустическими и вибрационными полями на основе сигнальных процессоров. Приведены конкретные примеры перспективных областей применения систем активного гашения влияния волновых полей различной природы: акустических, вибрационных, электромагнитных и т.п.

Theoretical and practical questions of constructing systems of wave fields (acoustic, vibrational, and electromagnetic) active control are considered. Characteristics of main active control algorithms are presented. Properties of constructing intellectual systems of active control of acoustic and vibrational fields are analyzed on the base of signal processors.

Введение

В настоящее время вопросам управления волновыми полями (Active Control) уделяется все больше внимания. Постоянно возрастает количество публикаций по этой теме, проводятся международные конференции и семинары. В последнее время в развитых странах отмечается лавинообразный рост реальных разработок в области Active Control и переход от экспериментальных исследований в лабораториях к выпуску промышленных изделий. Главной задачей, решаемой активными системами управления волновыми полями различной природы (акустическими, вибрационными, электромагнитными), является обеспечение снижения их влияния в конкретной локальной зоне, которое не может быть достигнуто с помощью традиционных пассивных средств защиты.

Широкому распространению активных методов и средств защиты (особенно средств индивидуальной защиты) способствовали два обстоятельства: во-первых, необходимость снижения воздействий в низкочастотном диапазоне, где классические пассивные средства малоэффективны; во-вторых, успехи в области теории управления, вычислительной техники, цифровой обработки сигналов, микроэлектроники и миниатюризации преобразователей позволили обеспечить высокие требования, предъявляемые к качеству гашения, быстродействию, устойчивости, массогабаритным характеристикам и другим технико-экономическим показателям систем активного гашения акустических шумов.

Системы активного управления волновыми полями в общем случае относятся к числу многомерных, многосвязанных систем автоматического

управления полем. При этом под объектом управления следует понимать совокупность компенсирующих излучателей, приемников и расположенных между ними участков среды или конструкции. С помощью вторичных излучателей активные системы формируют дополнительное инверсное по отношению к исходному компенсирующее поле с требуемыми пространственными и частотными характеристиками. Суперпозиция исходного и компенсирующего полей приводит к снижению результирующего поля в зоне контроля. Сегодня такие системы находят применение в различных областях: авиация, автомобилестроение, создание интеллектуальных зданий, вибростабилизации нанотехнических комплексов, транспорт и т. д. (рис. 1.).

В качестве примеров рассмотрим принципы реализации активных систем для борьбы с акустическими шумами и промышленными вибрациями. 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 средства коллективной и индивидуальной акустической защиты человека и технических средств, способные адаптироваться к изменяющимся условиям среды в автоматическом режиме и реальном масштабе времени. В этой связи наряду с пассивными средствами защиты от шума все большее распространение находят активные средства защиты, использующие дополнительные источники энергии.



Рис. 1. Некоторые из областей применения активных систем

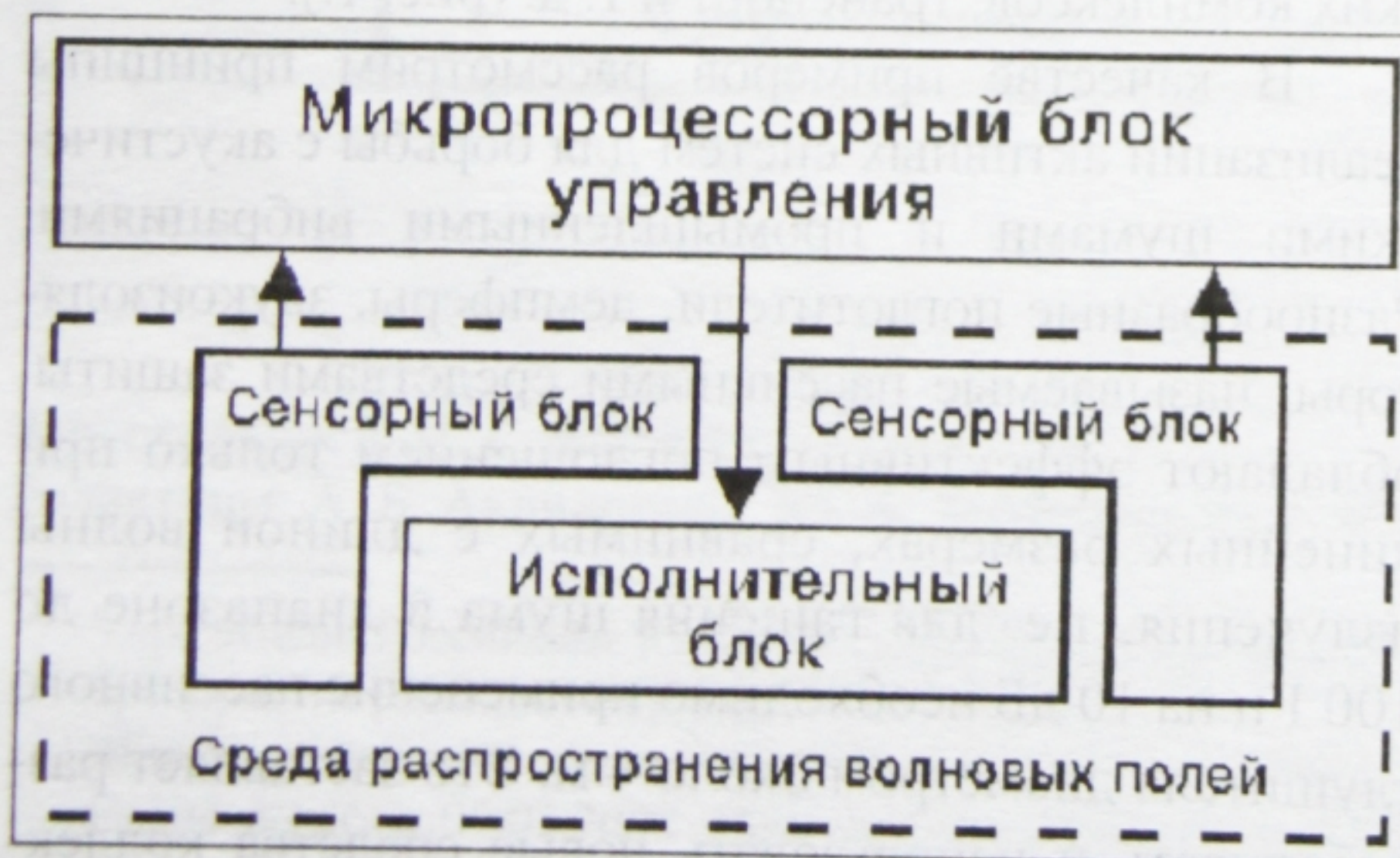


Рис. 2. Структурная схема типовой системы активного гашения

распространение находят системы активного гашения (САГ). В общем случае любая система гашения состоит из трех основных блоков: сенсорный блок (СБ), осуществляющий измерение характеристик параметров поля, микропроцессорный блок управления (МБУ), осуществляющий выработку управляющих сигналов в соответствии с заложенными в него алгоритмами и блок исполнительных устройств (БИУ), осуществляющий излучение компенсирующего поля (рис. 2).

Конструктивная реализация сенсорного и исполнительных блоков зависит от вида компенсируемого поля. Например, для гашения акустических полей наиболее общий тип компенсирующего источника исполнительного блока — перемещающийся громкоговоритель, однако можно использовать и механическое возбуждение структурных компонентов или даже модулируемый поток сжатого воздуха. Данное направление при раз-

работке средств защиты развивается очень быстрыми темпами, что влечет за собой постоянное расширение областей приложения активных систем защиты. Этому способствуют и тенденции к постоянному уменьшению стоимости и росту производительности микропроцессорных комплектов (в основном на основе сигнальных (DSP) процессоров), которые используются для реализации электронного блока управления в системах активной защиты. Рассмотрим более подробно системы активного гашения (САГ) акустических полей и системы активной виброзащиты (САВ) [1–13].

1. Методы и средства снижения влияния волновых полей

В настоящее время известно большое количество разнообразных методов и средств защиты от акустических воздействий, так, ГОСТ 12.1.029-80 классифицирует их в зависимости от характера применения, способа реализации, варианта установки, использования дополнительного источника энергии и т. п.

По характеру применения можно выделить средства защиты от влияния акустических полей, предназначенные для индивидуальной или коллективной защиты. В свою очередь, коллективные средства защиты подразделяются на средства снижения акустического шума в окружающем пространстве и в источнике. Снижение шума в источнике достигается снижением шумности самого источника (уменьшение мощности, применение малошумящих элементов и т.п.) или уменьшением звукоизлучающей способности элементов источника. Снижение шума в окружающем пространстве обеспечивается, как правило, за счет использования различных средств, препятствующих распространению шума.

В зависимости от способа реализации выделяют акустические, компоновочные и организационно-технические средства и методы защиты. Каждая из данных групп включает в себя средства и методы, в основе которых лежат различные принципы действия. Так, в первой группе выделяют звукоизолирующие и звукопоглощающие средства и методы защиты. К последней относятся корректировка направленности излучателя шума, увеличение расстояния от

источника шума до рабочего места и другие средства, реализуемые архитектурно-строительными или конструкторскими методами. Среди организационно-технических мер выделяют правильный ремонт и эксплуатацию систем, применение малошумных конструктивных элементов и т. п.

По варианту установки данные средства защиты можно разделить на средства ближней звукоизоляции (подавление шума вблизи источника), средства уменьшения шума на пути распространения и средства уменьшения шума на рабочем месте.

В зависимости от использования дополнительного источника энергии среди средств и методов защиты от шума можно выделить *пассивные*, без использования дополнительного источника энергии, и *активные*, в которых он применяется (рис. 3). Использование в активных системах дополнительного источника энергии (как правило, электрического) позволяет создавать на их основе уникальные средства борьбы с шумом и вибрацией, обладающие малыми весом и габаритами, что крайне важно при гашении колебаний в области низких частот. Здесь прослеживается аналогия с активными электрическими фильтрами, которые вследствие малых габаритов, веса и стоимости практически полностью вытеснили пассивные фильтры из области звуковых и инфразвуковых волн. Кроме того, активные средства за счет возможности простой электрической перестройки их акустических параметров являются более гибкими, чем пассивные по отношению к конструктивным характеристикам объекта.

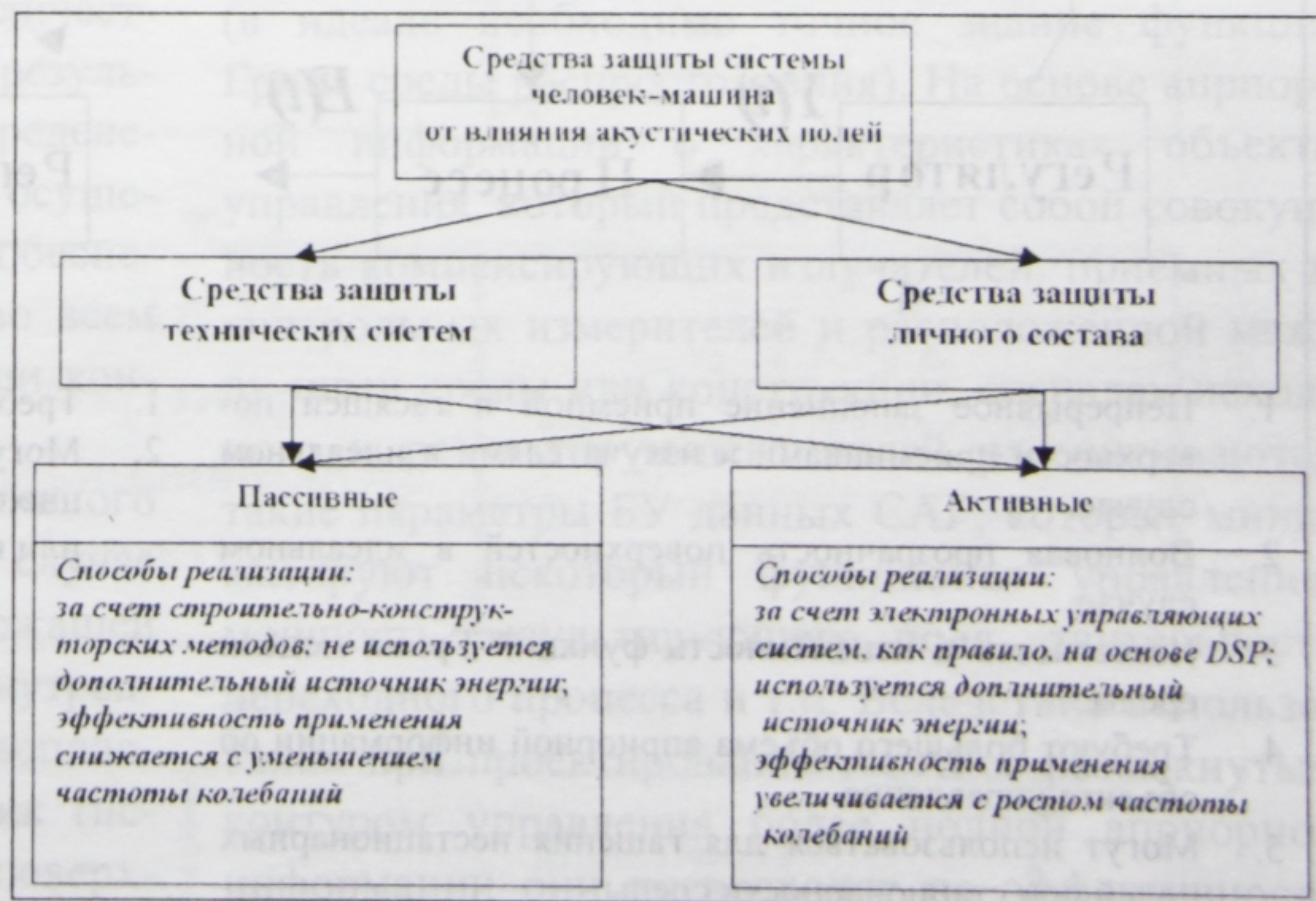


Рис. 3. Классификация средств защиты в зависимости от использования дополнительного источника энергии

Неадаптивные системы активного гашения

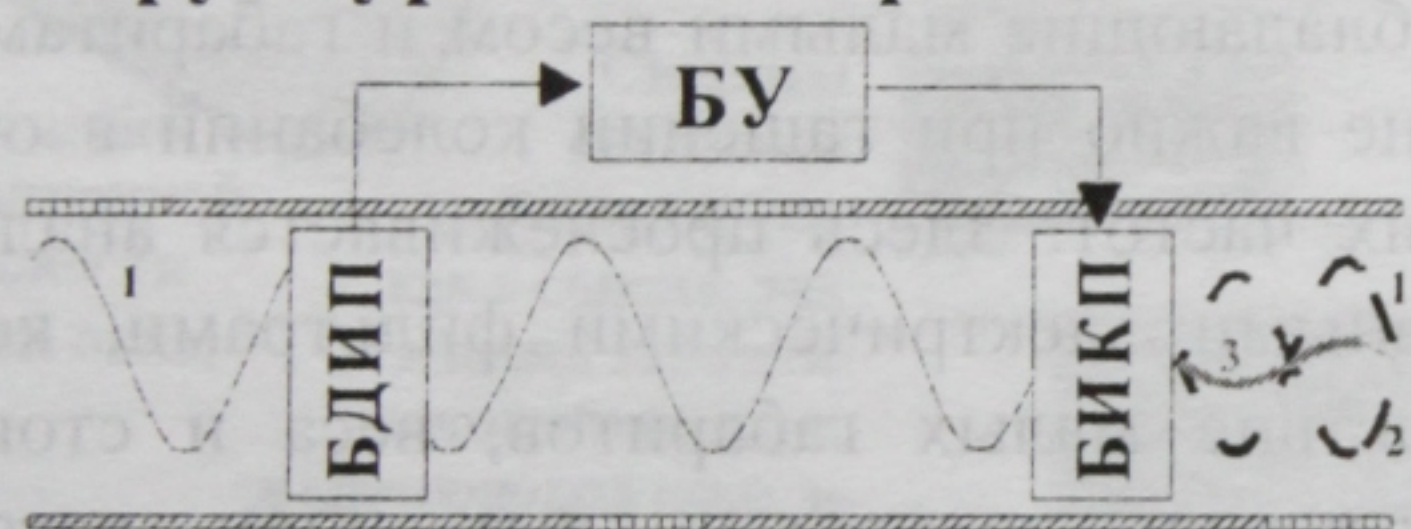
САГ с управлением по возмущению

САГ с управлением по отклонению

Пространственная модель процесса гашения



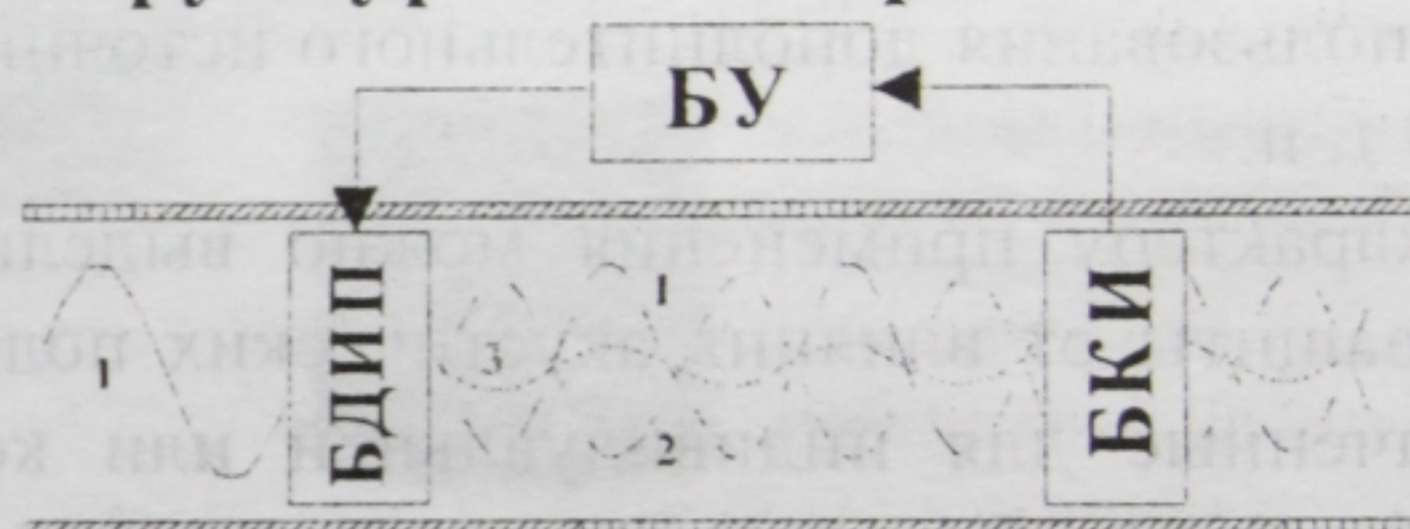
Структура одномерной АСАГ



Пространственная модель процесса гашения

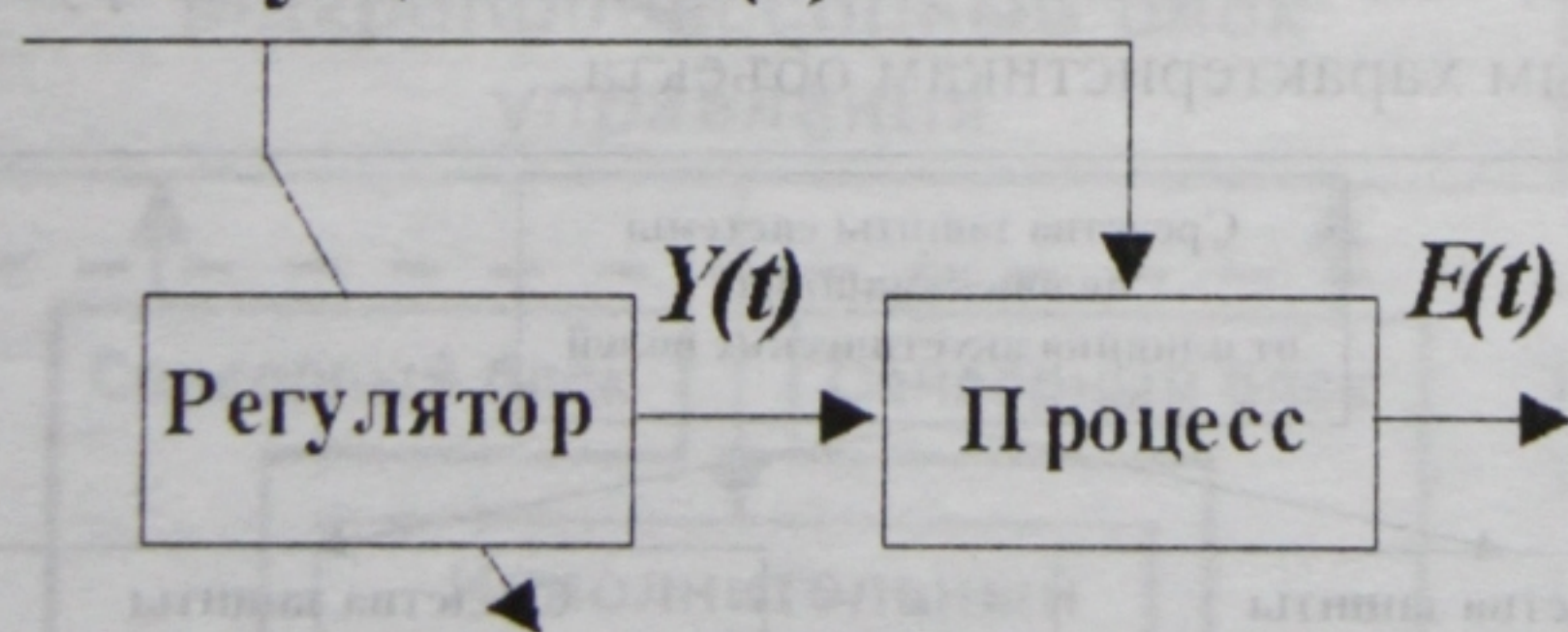


Структура одномерной АСАГ



Основные характеристики

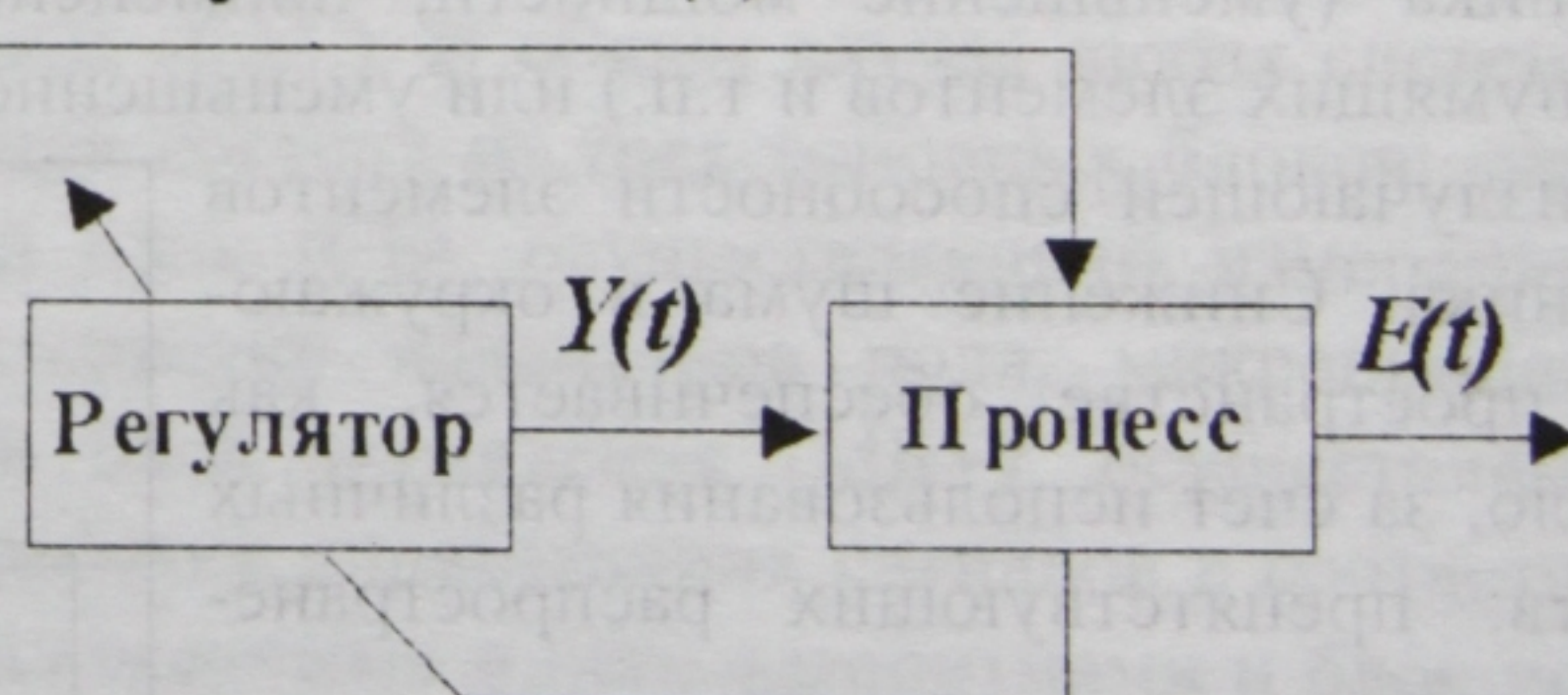
Возмущение $X(t)$



1. Непрерывное заполнение приемной и гасящей поверхности приемниками и излучателями в идеальном случае.
2. Волновая прозрачность поверхностей в идеальном случае.
3. Известность и неизменность функций Грина модели среды.
4. Требуют большего объема априорной информации об объекте управления.
5. Могут использоваться для гашения нестационарных полей при стационарности среды.

Основные характеристики

Возмущение $X(t)$



1. Требуют обеспечения условий устойчивой работы.
2. Могут использоваться для гашения медленно меняющихся полей при небольшой нестационарности среды или конструкции.

Рис. 4. Классификация и основные характеристики неадаптивных САГ

Пассивные средства защиты имеют строго фиксированные характеристики и не способны оперативно подстраиваться к изменяющимся условиям среды. Кроме того, при гашении низкочастотных колебаний они малоэффективны из-за возрастания объема и массы системы гашения. Это обусловлено тем, что на низких частотах длина волны больше толщины типичного поглотителя. Значение длины волны λ можно найти из известного соотношения, связывающего частоту f , длину волны и скорость звука c : $\lambda = c/f$, при этом следует учитывать, что скорость распространения звука зависит от характеристик среды распространения и является функцией плотности и упругости среды, а для газообразной среды — функцией температуры $T_{\text{ср}}$: $c = 20,04\sqrt{273 + T_{\text{ср}}}$. Всё это накладывает определенные ограничения на эффективность пассивных систем гашения.

Пассивные системы гашения обеспечивают снижение шума с увеличением частоты колебаний, однако в диапазоне низких частот с верхней граничной частотой в несколько сот герц эти системы при приемлемых массогабаритных характеристиках неэффективны. Поэтому единственно возможным способом гашения акустических и вибрационных полей на низких частотах является использование активных средств.

Первоначально САГ строились с использованием классических принципов управления (*неадаптивные* САГ). Такие САГ являются относительно простыми системами (рис. 4), однако при проектировании требуют значительного количества априорной информации об исходном и результирующем полях, среде и конструкции. Определение параметров их блока управления (БУ) осуществляется таким образом, чтобы система обеспечивала определенный (заданный) режим во всем диапазоне изменений параметров среды или конструкции.

Пространственная модель процесса активного гашения для таких неадаптивных САГ в случае гашения шума вне границ области, содержащей источник, состоит из двух подобластей: внутренней Q_1 и внешней Q_2 , между которыми расположены две охватывающие данный источник (источники) шума поверхности: приемная поверхность S_1 и компенсирующая поверхность S_2 . В зависимости от расположения данных поверхностей

по отношению к источнику можно выделить неадаптивные САГ с управлением по возмущению и с управлением по отклонению.

Построение САГ сегодня напрямую связано с использованием принципов *адаптивного* или *нейроадаптивного* управления, предоставляющих возможность настраиваться на изменяющиеся условия среды, однако такая настройка требует определенного времени. *Адаптивные активные системы гашения* (АСАГ) как правило, осуществляют настройку параметров регулятора основной системы в замкнутом контуре. Поэтому изменения собственных характеристик системы происходят в зависимости от текущей, а не только от априорной информации об условиях работы САГ. Для этого в пространственной модели процесса гашения в дополнение к *приемной* S_1 и *гасящей* S_2 поверхностям вводят *контрольную поверхность* S_3 , на которой располагаются датчики сигнала ошибки компенсации (рис. 5).

С точки зрения теории управления в зависимости от способа реализации все АСАГ можно разделить на два класса: *разомкнутые* и *замкнутые* (рис. 5). Принцип функционирования *разомкнутых* АСАГ состоит в следующем: в результате определения текущих значений исходного поля и идентификации параметров среды определяется вектор параметров регулятора $\mathbf{H}(t)$, после чего производится соответствующая настройка регулятора с помощью устройства адаптации. АСАГ данного класса достаточно просты, однако требуют большого количества априорной информации (в идеале необходимо точное знание функции Грина среды распространения). На основе априорной информации о характеристиках объекта управления, который представляет собой совокупность компенсирующих излучателей, приемных и контрольных измерителей и расположенной между ними среды или конструкции, сигналах исходного и результирующего полей рассчитываются такие параметры БУ данных САГ, которые минимизируют некоторый функционал управления: мощность результирующего поля, длительность переходного процесса и т.п. Вследствие использования при проектировании АСАГ с разомкнутым контуром управления более полной априорной информации они превосходят по эффективности неадаптивные САГ.

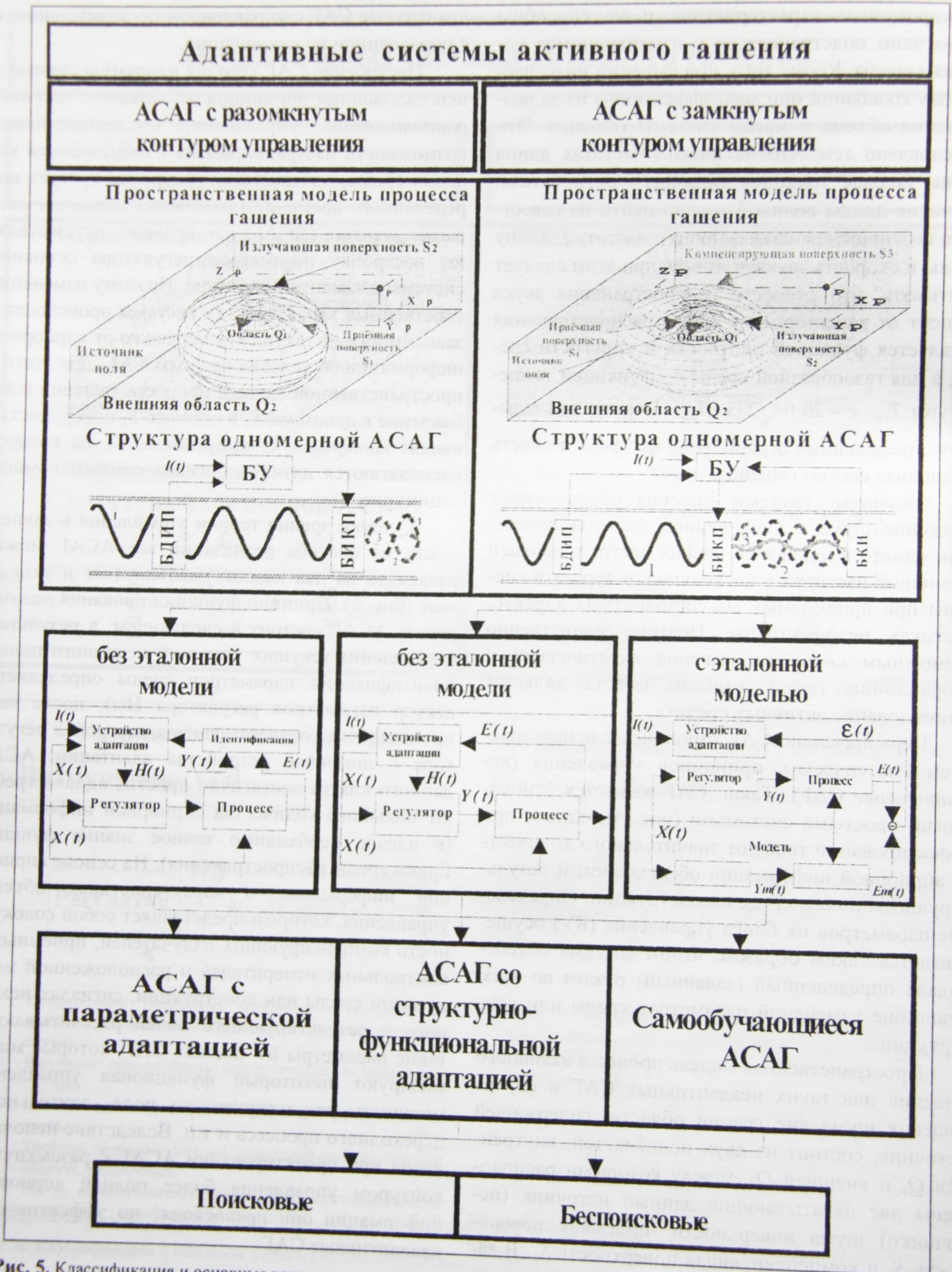


Рис. 5. Классификация и основные характеристики адаптивных САГ

Особенностями реализации таких АСАГ является простота законов адаптации и методов оценки исходной информации, однако процесс настройки зависит от большого числа параметров, что предъявляет определенные требования к точности их определения и адекватности реальному процессу гашения. Быстродействие данных систем в основном зависит от скорости сбора исходной информации, в связи с чем их использование, как правило, ограничено подавлением влияния акустических полей в одномерных структурах, например плоских волн в волноводах и т. п.

В замкнутых АСАГ настройка параметров осуществляется в замкнутом контуре, при этом возможны два варианта реализации (см. рис. 5): замкнутые АСАГ без эталонной модели и замкнутые АСАГ с эталонной моделью. Особенностью первого варианта реализации АСАГ является применение методов идентификации не для определения структуры и параметров модели процесса гашения, а для оценки критерия качества гашения на основе поступающих из основного контура сигналов. Величина $I(t)$ задается, как некоторый одноэкстремальный функционал качества управления.

В таких АСАГ накопление текущей информации об изменяющихся характеристиках объекта управления и возмущающих воздействиях и соответствующая настройка параметров БУ с целью постоянного обеспечения наивысшей эффективности компенсации осуществляются автоматически в ходе её функционирования. Особенностью данных АСАГ является возможность их использования при нестационарном характере среды и стационарном характере гасимых полей, что обусловлено необходимостью обучения АСАГ.

Особенностью АСАГ с эталонной моделью является наличие соединенной в параллель с основной системой, так называемой эталонной модели, которая имитирует идеальное поведение основной системы. Однако настройка регулятора основной системы осуществляется также в процессе адаптивного регулирования в зависимости от сигнала ошибки компенсации. Основным недостатком АСАГ с эталонной моделью – сложность формирования адекватной эталонной модели процесса гашения, так как его характеристики зависят от многих факторов, например, от температуры. В АСАГ без эталонной модели предполагалось выполнение условия квазистационарности процесса

гашения, для данных же АСАГ требования к стационарности процесса гашения не столь жестки, но при их реализации необходимо проведение ряда мероприятий по обеспечению устойчивости работы, которые, как правило, могут быть осуществлены только с помощью экспериментальных исследований поведения АСАГ с эталонной моделью в реальном масштабе времени, так как их аналитическая проверка на устойчивость – чрезмерно сложная задача.

Процесс настройки АСАГ может использовать алгоритмы двух типов: беспойсковые (аналитические) и поисковые. В беспойсковых алгоритмах настройка осуществляется в зависимости от измерений исходного и результирующего полей. АСАГ, построенные на основе беспойсковых алгоритмов, имеют довольно высокое быстродействие. В поисковых алгоритмах вектор управления формируется постепенно, путем медленного “движения” к экстремуму некоторого функционала качества. Их быстродействие крайне низко и зависит от алгоритма поиска и начального состояния системы.

Любые из рассмотренных выше АСАГ могут быть реализованы в виде: систем с параметрической адаптацией, систем со структурно-функциональной адаптацией или в виде самообучающихся АСАГ (см. рис. 5). Системы с параметрической адаптацией используют текущие данные о характере протекания процесса гашения для оценки качества гашения, которое корректируется путем контролируемых изменений параметров компенсатора. Принцип действия АСАГ со структурно-функциональной адаптацией связан с изменением структуры регулятора и соответственно закона адаптации. Область применения таких АСАГ – гашение акустических полей в средах подверженных существенным изменениям за короткое время. В самообучающихся АСАГ информация о неизвестных характеристиках процесса гашения и среды распространения накапливается ими в ходе процесса обучения и используется в дальнейшем для оценивания, классификации и принятия соответствующих решений с целью существенного улучшения качества гашения. Такие АСАГ строятся как правило на основе нейросети.

Практически все алгоритмы рассмотренных выше систем активного гашения содержат процедуры анализа и синтеза передаточных функций

объекта управления и операции умножения матриц, выполнение которых должно удовлетворять требованию по работе системы гашения в реальном масштабе времени. При переходе от одномерных к пространственным САГ порядок системы возрастает, что приводит к увеличению сложности и снижению её надёжности при реализации традиционными способами. Выполнить же обработку информационных массивов для системы гашения случайного шума с числом каналов более двух в реальном времени можно только с использованием процедур распараллеливания вычислений. Всё это заставляет переходить при разработке многомерных, многосвязанных САГ к использованию нейросетевых технологий, которые являются основой построения самообучающихся систем гашения.

Такие системы могут быть реализованы в виде адаптивных и неадаптивных нейроСАГ. Применение нейросетевого подхода при реализации САГ обусловлено следующими особенностями нейрокompьютеров: нейросистемы строятся из одинаковых и чрезвычайно простых элементов, реализуемые свойства определяются только структурой связей, позволяют создавать надежные системы из низконадежных элементарных элементов (при разрушении части системы она в целом сохраняет свои свойства), ориентированность данных систем на параллельное выполнение векторно-матричных операций высокой размерности.

Нейронные сети представляют собой совокупность элементарных элементов: синапсов, сумматоров, нейронов и т. п. Одним из самых важных элементов является адаптивный сумматор, который осуществляет вычисление скалярного произведения входного вектора на вектор весовых коэффициентов, значения которых адаптивно настраиваются. Из данных элементарных узлов могут быть образованы нейронные сети различной архитектуры, решающие различные задачи. Выделяют две базовые архитектуры нейронных сетей: слоистые сети, в которых нейроны расположены в несколько слоев, где сигналы передаются от слоя к слою, и полносвязанные сети, в которых каждый нейрон передает свой выходной сигнал остальным нейронам, включая самого себя. В общем случае архитектура нейросетей очень гибка, она не накладывает никаких существенных ограничений на конструктивные элементы и связи между ними. Единственное ограничение — соответствие раз-

мерности входного вектора и числа входов элемента сети.

НейроСАГ является практически единственным возможным вариантом построения высокоэффективных многомерных и многосвязанных САГ акустических полей. При этом для нестационарных объектов управления такие системы наделяются свойствами адаптации (нейроАСАГ). Современный уровень развития техники позволяет реализовать такие системы с удовлетворительными массогабаритными характеристиками, низким энергопотреблением, высокой надёжностью и относительно низкой стоимостью, что открывает поистине неограниченные возможности по снижению акустических шумов в пространстве.

Приведенная выше классификация средств гашения акустических шумов позволяет сделать следующие важные выводы: *САГ не имеют альтернативы при гашении низкочастотных шумов, а их совместное использование с пассивными средствами гашения расширяет частотный диапазон снижения шума; САГ позволяет найти наиболее технически целесообразные с точки зрения сложности средства снижения шума в условиях жестких ограничений на габариты и массу, однако построение эффективных многомерных и многосвязанных САГ широкополосных шумов требует перехода к использованию нейросетевых технологий, что обуславливает сложность и значимость задач, решаемых в данной работе.*

2. Сравнительные характеристики основных адаптивных алгоритмов активного гашения

Системы активного гашения акустических полей всегда действуют в “случайной среде”, т.е. параметры объекта управления изменяются случайным образом и степень их неопределенности может быть различной, поэтому приемлемые технические характеристики могут быть получены лишь в результате адаптации системы к изменяющимся условиям в ходе ее работы в реальном масштабе времени. Адаптивные САГ, как правило, осуществляют изменения собственных характеристик в зависимости не только от априорной информации об условиях работы систем гашения, но и от текущей информации об исходном и результирующем акустических полях. Для этого в добавление к измерительной (S_1) и компенсирующей (S_2) поверхно-

стям вводится контрольная поверхность (S_3), на которой располагаются датчики сигнала ошибки компенсации. Процесс адаптации включает два этапа: оценивание искомого выхода фильтра узла настройки и оценивание его весовых коэффициентов, обуславливающих достижение заданного значения целевой функции.

2.1. Обобщенная структурная схема адаптивной системы активного гашения

Любая АСАГ, как правило, состоит из следующих основных частей: блоков датчиков исходного поля (БДИП), блока излучателей компенсирующего поля (БИКП), блока контрольных измерителей (БКИ) и блока управления (БУ), реализующего адаптивный алгоритм настройки системы, т.е. пространственная модель процесса гашения (см. рис. 5) включает в себя три поверхности: измерительную S_1 , компенсирующую S_2 и контрольную S_3 . На рис. 6,а приведена обобщенная структура БУ АСАГ на примере гашения акустического шума в одномерном канале (вид исходного поля показан условно).

Блок управления АСАГ состоит из трех узлов настройки (регуляторов) (УН). Центральный УН вырабатывает сигнал управления компенсирующими излучателями в соответствии с тем или иным адаптивным алгоритмом, УН1 компенсирует ВОС на участке канала с передаточной функцией $C1$, а УН2 идентифицирует участок канала с передаточной функцией $C2$ (от ИКП до КИ). Каждый из УН состоит из двух основных частей: фильтра, выполняющего искомую функцию обработки сигналов (см. рис. 6,а) и блока реализации алгоритма для коррекции коэффициентов данного фильтра (БКК).

В зависимости от области приложения структура УН БУ может быть различной, начиная от простейших трансверсальных фильтров (рис. 6,б-в) и кончая микропроцессорными системами на основе сигнальных процессоров или даже в виде адаптивной нейросети (рис. 6,д). При этом адаптивными свойствами может быть наделен только центральный УН, а остальные УН во многих случаях могут быть реализованы в виде стандартных неперестраиваемых фильтров, настроенных на этапе идентификации на конкретные значения $C1$ и $C2$. В последнее время с развитием вычислительной

техники построение БУ АСАГ осуществляется на основе сигнальных процессоров, например, на базе сигнальных процессоров TMS320Cxx фирмы Texas Instruments® (США) и на базе сигнальных процессоров ADSP-21xxx фирмы Analog Devices (США). Отличительной особенностью решений на базе сигнальных процессоров является применение в БУ цифрового фильтра, реализованного аппаратно-программными методами.

Структура УН АСАГ в большинстве случаев представляет собой фильтр с конечной импульсной характеристикой (Finite Impulse Response — FIR), который может быть реализован аппаратно, программно-аппаратно (см. рис. 6,б,з,в) или являться элементом нейросети, осуществляющим взвешенное (адаптивное) суммирование (см. рис. 6,д). В нем используются умножители только с прямой связью, он безусловно устойчив, имеет ограниченную память, определяемую числом линий задержки (равным порядности фильтра N), и, например, для схемы на рис. 6,б, описывается соотношением

$$Y(n) = \mathbf{H}^T(n)\mathbf{X}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i(n)x(n-i),$$

где $[\]^T$ — транспонирование; n — номер отсчета; N — порядок фильтра; $\mathbf{X}(n) = \{x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)\}^T$ — вектор входного сигнала.

Основные алгоритмы, используемые для настройки вектора весовых коэффициентов, будут рассмотрены в следующем разделе. Из большого многообразия возможных вариантов структур FIR-фильтров при реализации АСАГ, как правило используются: трансверсальный FIR-фильтр (рис. 6,б), симметричный трансверсальный FIR-фильтр (рис. 6,в) и решетчатый фильтр (рис. 6,з).

Число весов в трансверсальном фильтре с симметричной структурой уменьшено наполовину, т.е. N -му весу соответствует четный вес сигнала (см. рис. 6,в). Вектор входного сигнала определяется по формуле

$$\mathbf{X}(n) = [x(n) + x(n-N+1), x(n-1) + x(n-N+2), \dots, x(n-N/2+1) + x(n-N/2)]^T.$$

Результатом фильтрации является вектор $y(n)$

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N/2} h_i(n)[x(n-i) + x(n-N+1+i)].$$

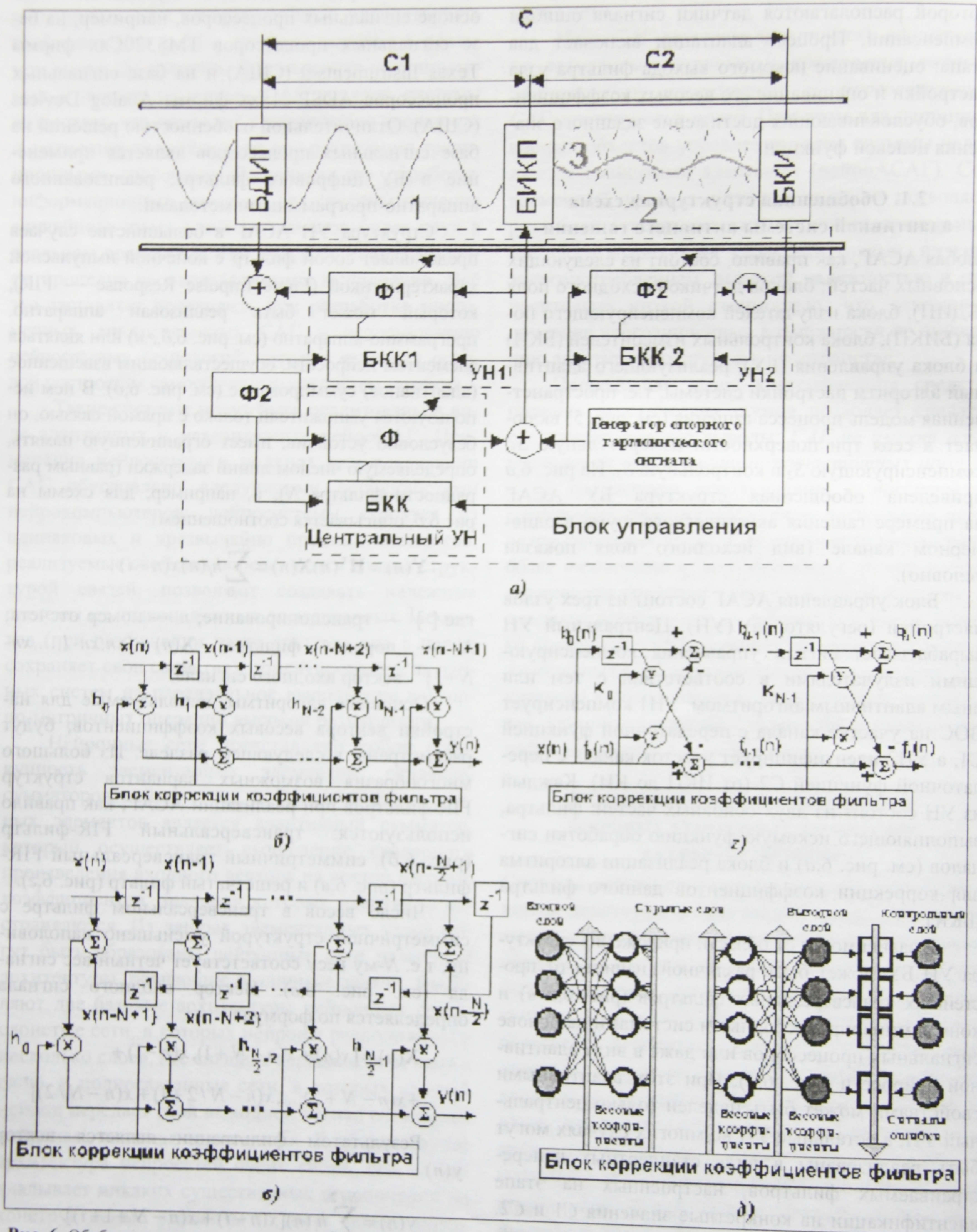


Рис. 6. Обобщенная структурная схема реализации АСАГ и варианты построения узлов настройки

Решетчатый фильтр имеет модульную структуру с каскадным соединением идентичных стадий (см. рис. 6,з) и обладает несколькими преимуществами перед фильтром с классической трансверсальной структурой:

- хорошие числовые округленные характеристики, что делает его менее чувствительным по сравнению с фильтром с трансверсальной структурой к ошибкам округления, причиной которых является усечение чисел при проведении вычислений, обусловленное тем, что в регистрах вычислителя могут размещаться числа ограниченной длины, арифметические операции над которыми обычно дают число, представляемое большим количеством цифр. Для дальнейших вычислений это число должно быть приведено к разрядности регистров вычислителя;
- возможность ортогонализации входного сигнала, что обуславливает быструю сходимость;
- легко масштабируемая структура (каскад идентичных стадий) имеет общую нечувствительность к шуму окружающей среды;
- явная физическая интерпретация коэффициентов отражения с акустическими характеристиками.

Всё это делает решетчатые фильтры более предпочтительными при обработке акустических полей. Динамику m -х стадий решетчатого фильтра МК-го порядка представляют следующие уравнения:

$$f_m(n) = f_{m-1}(n) - K_m(n)b_{m-1}(n-1), \quad 0 < m < M_K,$$

$$b_m(n) = b_{m-1}(n-1) - K_m(n)f_{m-1}(n), \quad 0 < m < M_K,$$

где $f_m(n)$ — прямая ошибка предсказания; $b_m(n)$ — обратная ошибка предсказания; $K_m(n)$ — рефлексивный коэффициент; m — индекс стадии; а M_K — число каскадных стадий; $K_m(n) < 1$. Условия для $f_m(n)$ и $b_m(n)$ инициализированы как $f_0(n) = b_0(n) = x(n)$.

При реализации УН АСАГ может быть использован любой из рассмотренных структурных

вариантов. Однако УН на основе решетчатых FIR-фильтров обладают рядом преимуществ перед фильтрами других структур. M -каскадный решетчатый фильтр автоматически вырабатывает все выходные сигналы, которые обычно вырабатывают N различных фильтров на линиях задержки с отводами, что обеспечивает динамический подбор такой длины фильтра, которая обуславливает наибольшую эффективность компенсации в любой момент адаптивной обработки сигнала. Однако построение УН на базе решетчатых фильтров более сложно и требует для осуществления всех процедур процесса адаптивного гашения проведения большего объема вычислений, чем в УН, реализованном на базе стандартного трансверсального фильтра.

Практически единственно возможным способом построения эффективных многомерных и многосвязанных АСАГ, как было отмечено выше, является их реализация на основе нейросетевого логического базиса. Только при таком подходе удастся добиться работы АСАГ высокого порядка в реальном масштабе времени. Данный подход подразумевает построение БУ АСАГ на основе нейрокомпьютера, который чаще всего реализуется в виде модуля параллельно работающих спецпроцессоров-нейровычислителей, построенных на базе специальных или универсальных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП). Например, нейровычислитель может быть реализован на основе рассмотренных выше трансверсальных фильтров. Используя БИС А100, представляющие собой трансверсальный фильтр 32-го порядка, вычисление взвешенной оценки входного вектора $X(n)$ осуществляют в следующей последовательности: загружают значения весовых коэффициентов, подают значения вектора $X(n)$ в обратном порядке: $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$, через N тактов на выходе А100 сформируется взвешенная сумма элементов входного вектора $X(n)$, т.е. не что иное, как результат базовой нейронной операции. Нейросетевой подход позволяет, используя возможность каскадирования трансверсальных фильтров порядка нескольких тысяч, параллельно выполнять векторные и матричные операции большой размерности с высокой эффективностью и в реальном времени, что проблематично при построении многоканальных АСАГ на основе типовых FIR-фильтров.

2.2. Исследование и сравнительный анализ адаптивных алгоритмов, используемых при реализации адаптивных систем активного гашения

В качестве алгоритмов настройки АСАГ используются, как правило, адаптивные или нейроадаптивные алгоритмы [1–13]. Многие из них, эффективные в вычислительном отношении и ориентированные на различные смежные области приложения, были разработаны за прошедшее двадцатилетие. Одни из таких алгоритмов, типа алгоритма наименьших квадратов Уидроу–Хоффа (LSM), основаны на статистическом подходе, другие, типа рекурсивного алгоритма наименьших квадратов (РНК) — на детерминированном подходе. Сегодня известно большое число модификаций данных алгоритмов применительно, в основном, к одномерным задачам активного гашения. Главное преимущество LSM-алгоритмов — вычислительная простота. РНК-алгоритмы, наоборот, обеспечивают более быструю сходимость, но с более высокой степенью вычислительной сложности.

Адаптивный алгоритм Уидроу–Хоффа и его модификации

Разработанный Уидроу и Хоффом адаптивный алгоритм на основе метода наименьших квадратов достаточно прост в реализации, основные его недостатки связаны со свойствами сходимости. Исследованию его свойств посвящено большое количество работ. Он практически является одним из самых популярных алгоритмов адаптации, ориентированным на использование в FIR-фильтрах. Точность настройки алгоритма определяется по уровню сигнала с контрольных приемников $e(n)$. Алгоритм является итерационным и для него необходимо найти оценку градиента квадратичной ошибки единственной выборки $\partial e^2(n)/\partial \mathbf{H}(n)$ ($\mathbf{H}(n)$ — вектор коэффициентов фильтра). Каждый следующий коэффициент фильтра определяется по классической формуле

$$h_i(n) = h_i(n-1) + 2\mu x(n-i)e(n),$$

из которой видно, что ошибка $e(n)$ является одной и той же для всех коэффициентов фильтра. Следовательно, коэффициенты являются взаимосвязанными, что обуславливает относительно низкую скорость сходимости данного алгоритма. Большинство его недостатков связаны со свойствами

сходимости, регулируемые значением коэффициента μ , которое рекомендуется выбирать в диапазоне: $0 < \mu < 1/(3N \text{Var}\{x(n)\})$, где N — разрядность фильтра. При построении АСАГ достаточно трудно выбрать наилучшую разрядность фильтра, которая обеспечивала бы приемлемый баланс между сходимостью, точностью и временем настройки. Кроме того, время сходимости данного алгоритма зависит и от отношения максимальных к минимальным собственным значениям автокорреляционной матрицы R входного сигнала. Для обеспечения пребывания значения коэффициента сходимости μ в заданных пределах, выход за которые может вызвать неустойчивость фильтра, часто используется *нормализованный LSM-алгоритм*, который определяет значение коэффициента сходимости по формуле

$$\mu = \frac{u}{\mathbf{X}^T(n) \mathbf{X}(n)},$$

где u — нормализованный размер шага, выбранный между 0 и 2.

Текущие значения коэффициентов h модифицируются:

$$\mathbf{H}(n+1) = \mathbf{H}(n) + \frac{u e(n) \mathbf{X}(n)}{r + \mathbf{X}^T(n) \mathbf{X}(n)},$$

В этом случае u — новая нормализованная константа адаптации; r — положительный параметр, включенный для гарантии того, что коэффициент модификации не окажется чрезмерно большим, когда выражение $\mathbf{X}^T(n) \mathbf{X}(n)$ временно становится маленьким.

Другой модификацией является *LSM-алгоритм с забыванием*:

$$\mathbf{H}(n+1) = (1 - \mu r) \mathbf{H}(n) + \mu e(n) \mathbf{X}(n),$$

где μ и r — положительные числа.

Не последнее место при реализации УН АСАГ занимают *упрощенные LSM-алгоритмы*. Упрощения осуществляются за счет ограничения одного или обоих сигналов, используемых при корректировке весовых коэффициентов. Все это позволяет повысить эффективность аппаратно-программной реализации АСАГ. При этом возможны три модификации стандартного LSM-алгоритма: *контрольный LSM-алгоритм*, *ограничивающий (Sing Data)* и *обнуляющий (Sing Sing) алгоритмы*. Данный подход дает преимущества при реализации АСАГ на основе аппаратно реализованных фильтров, одна-

ко это не дает никакой вычислительной выгоды при реализации с использованием программируемых сигнальных процессоров (аппаратно-программная реализация). Отметим, что ограничивающие по знаку LSM-алгоритмы, первоначально разработанные для снижения сложности реализации, требуют большого количества циклов команд при использовании в программируемых сигнальных процессорах.

Для контрольного алгоритма веса модифицируются согласно выражению $h_i(n+1) = h_i(n) + \mu \operatorname{sgn}\{e(n)\} x(n-i)$, где $\operatorname{sgn}\{e(n)\} = 1$ при $e(n) \geq 0$; $\operatorname{sgn}\{e(n)\} = -1$ при $e(n) < 0$, а для ограничивающего алгоритма $h_i(n+1) = h_i(n) + \mu e(n) \operatorname{sgn}\{x(n-i)\}$.

Обнуляющий LSM-алгоритм использует уменьшение до одного разряда чисел, представляющих информацию о знаке для обоих сигналов, используемых при коррекции весовых коэффициентов. В этом случае выражение для их корректировки имеет вид:

$$h_i(n+1) = h_i(n) + \mu \operatorname{sgn}\{e(n)\} \operatorname{sgn}\{x(n-i)\}.$$

Знаки сигнала ошибки $e(n)$ и входного сигнала $x(n)$ перемножают, чтобы установить соответствующий флаг знака множителя. Результирующий флаг определяет добавляется значение коэффициента сходимости или вычитается из прежнего значения весового коэффициента.

При использовании LSM-алгоритма в трансверсальном фильтре с симметричной структурой вычисление выхода фильтра разбивается на два цикла. Первый подобен циклу для стандартного LSM-алгоритма и рассчитывает первую значащую сумму фильтра, второй служит для расчета второй значащей суммы. В цикле корректировки весовых коэффициентов предусмотрена дополнительная операция умножения для учета дополнительного множителя. При этом уравнение модификации весовых коэффициентов имеет вид

$$h_i(n+1) = h_i(n) + \text{speed} - \text{const} e(n) u(n - N_z + i - 1),$$

где $N_z = 2N$ — длина линии задержки.

LSM-алгоритм для оценки коэффициентов отражения решетчатых фильтров обеспечивает одновременное вычисление обоих сигналов прямого и обратного предсказаний. Это позволяет дать оптимальную оценку выхода фильтра. Данная объединительная методика дает возможность быстро настраивать каналы адаптации системы и

реализовывать прикладные программы гашения шума. Эта методика известна под названием gradient lattice-ladder алгоритм, при котором используются ошибки прямого и обратного предсказания, взятые с весом α :

$$k_m(n+1) = k_m(n) + \alpha [f_m(n) b_{m-1}(n-1) + b_m(n) f_{m-1}(n)],$$

где $0 < m < MR$.

На первой стадии ошибка определяется как $e_0(n) = d(n) - b_0(n)g_0(n)$, а на последующих стадиях как $e_m(n) = e_{m-1}(n) - b_m(n)g_m(n)$, где $0 < m < MR$. Коэффициенты модифицируются согласно выражению $g_m(n+1) = g_m(n) + \alpha e_m(n) b_m(n)$, где $0 < m < MR$.

Значение выходного сигнала для данного типа фильтра вычисляются по формуле

$$y(n) = \sum_{m=0}^M g_m(n) b_m(n).$$

Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов

Этот алгоритм основан на минимизации суммы квадратов выборок сигнала ошибки компенсации. Задача алгоритма РНК — нахождение значений коэффициентов фильтра, для которых данная сумма будет минимальной. Работающий по данному алгоритму фильтр является устройством предсказания по критерию наименьших квадратов для входной последовательности $x(n)$, при этом сигнал ошибки компенсации $e(n)$ может быть интерпретирован как ошибка предсказания [13]. Данный алгоритм по сравнению с LSM-алгоритмом приводит к более значительным затратам на вычисления, хотя и обеспечивает более быструю сходимость. Кроме того, LSM-алгоритм имеет только один корректируемый параметр, который воздействует на скорость сходимости, коэффициент сходимости μ , обладающий ограниченным диапазоном корректировки при условии обеспечения заданной стабильности. Для достижения более высокой скорости сходимости необходимо использовать более сложные алгоритмы, как правило, с несколькими регулируемыми параметрами. Алгоритм РНК использует метод наименьших квадратов для непосредственной оценки корреляции входных данных. В то время как алгоритм LSM использует этот метод для оценки среднестатистической ошибки, которая изменяет-

ся медленнее. Классический РНК-алгоритм подразумевает наличие бесконечной памяти для хранения предыдущей информации, однако наиболее эффективные его модификации используют процедуру “забывания”, которая определяется значением коэффициента λ .

Значение коэффициента “забывания” располагается между нулем и единицей, обеспечивая тем самым такую скорость забывания входных данных, что самые новые отсчеты имеют более высокий вес, чем прошлые. Это позволяет адаптировать коэффициенты фильтра во времени. Модификация веса сигнала зависит от сигнала ошибки и значений вектора Калмана $\mathbf{K}(n)$ и находится по формуле

$$\mathbf{H}(n) = \mathbf{H}(n-1) + \mathbf{K}(n)e(n).$$

При этом значения вектора $\mathbf{K}(n)$ мало влияют на скорость сходимости в переходном режиме в отличие от коэффициента μ в LSM-алгоритмах. Алгоритм РНК вследствие рассмотренных выше вычислительных трудностей, связанных с его реализацией, долгое время не находил широкого применения.

При использовании РНК-алгоритма для трансверсального фильтра значение вектора Калмана вычисляется за два шага. На первом шаге вычисляется промежуточное значение x , зависящее от N -мерной автокорреляционной матрицы входных данных, которая определяется посредством вложенного цикла. На втором шаге берется x и выполняется точечная программа с вводом вектора x в цикл. При этом определяется $K_0(n)$ — первый элемент в векторе. Автокорреляционная матрица R модифицируется во вложенном цикле, где внутренний цикл модифицирует строки, а внешний — столбцы. Быстрая сходимость РНК обусловлена большим числом циклов внутри итерационных циклов.

Несмотря на большое количество разработанных алгоритмов, основными трудностями при реализации АСАГ являются: сложность правильного выбора пространственной размерности фильтров УН АСАГ с точки зрения достижения наилучшего соотношения между скоростью сходимости и возможным качеством гашения; сложность, а порой и практическая невозможность построения АСАГ высокого порядка, работающих в реальном времени на основе традиционных под-

ходов. Увеличение порядка системы при построении АСАГ пространственного гашения приводит к существенному снижению их надежности и увеличению сложности, что обуславливает повышенные требования к ресурсам памяти и быстродействию БУ данных систем. Это определяет их реализацию только на основе сигнальных процессоров или с использованием нейросетевого логического базиса. Реализация нейроАСАГ аналогична построению нейроСАГ, с той лишь разницей, что при разработке последних сигналы с контрольных измерителей использовались только в режиме обучения на этапе проектирования. Для нейроАСАГ процесс настройки происходит постоянно в реальном времени. Это повышает требования к производительности БУ нейроАСАГ, так как при реальной работе необходимо не только осуществлять обработку входных сигналов, но и проводить корректировку весовых коэффициентов.

НейроАСАГ может быть реализована на базе адаптивных сумматоров, при этом наличие нелинейности на выходе нейронов не требуется. Структурная схема нейроАСАГ для одномерного случая с обработкой во временной области может быть представлена в виде пяти слоёв, входные сигналы нейронов слоёв 2–4 формируют сдвиговые регистры, длина которых определяет порядок АСАГ. Нейроны слоёв 1 и 5 производят только суммирование входных сигналов. Нейроны второго слоя осуществляют учет изменения характеристик акустического поля на участке от компенсирующих излучателей до контрольных измерителей, для чего в состав схемы введен генератор, некоррелированный с входным сигналом. Третий слой нейросети осуществляет формирование сигнала компенсации, а четвертый — учет ВОС между компенсирующим излучателем и приёмником исходного поля. Такое построение одномерной нейроАСАГ позволяет организовать пятиуровневый конвейер, причем предложенный подход к корректировке весовых коэффициентов позволяет отказаться от классической процедуры обратного распространения для обучения нейросети и использовать нейроны без нелинейных элементов на выходах.

Переход к нейроАСАГ более высокой пространственной размерности может быть осуществлен путем каскадного соединения однотипных нейромодулей. В этом случае нейроны первого

сложно также будут наделены свойствами взвешенного суммирования входных сигналов от датчиков, а значения весовых коэффициентов будут учитывать взаимную корреляцию между датчиками.

Выигрыш при использовании нейросетевого подхода по сравнению с традиционным заключается в том, что нейросетевой подход позволяет проводить вычисления параллельно, а это в свою очередь дает возможность реализовать АСАГ более высокого порядка при приемлемых показателях сходимости и, следовательно, добиться более высокого качества гашения. Нейросетевой подход к реализации многомерных пространственных АСАГ во многом снимает проблемы, стоявшие перед разработчиками систем активной защиты, по необходимости выполнения векторно-матричных операций высокой размерности в реальном времени.

3. Примеры проектирования и экспериментальных исследований активных систем

Основным сдерживающим фактором при разработке средств активной защиты является практически полное отсутствие комплексных систем автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования их функционирования в реальном масштабе времени, что заставляет разработчиков тратить колоссальные средства на проведение экспериментальных исследований и натурных испытаний для разработки и доводки активных средств защиты. Это объясняется в основном тем, что при создании САГ обычно требуется экспериментально определять передаточные функции отдельных компонентов объекта управления, что влечет за собой необходимость использования в составе средств проектирования аппаратно-программных измерительных комплексов, как правило, на базе систем цифровой обработки сигналов. Проиллюстрируем экспериментальные исследования САГ на примере активных наушников и системы активной виброзащиты.

Выпускаемые на сегодняшний день серийно системы индивидуальной защиты (активные наушники) являются неадаптивными и используют аналоговый блок управления, что ограничивает полосу подавления частотой 1000 Гц и позволяет достигнуть ослабления в 10–15 дБ в указанной полосе. Переход к использованию цифровых блоков

управления, например, на базе сигнального процессора TMS320C30, можно рассчитывать на увеличение эффективности гашения до 35–40 дБ (для синусоидальных сигналов) и расширение полосы подавления до 2 кГц по сравнению с неадаптивными системами. Однако эта адаптивная система обладает существенным недостатком – невозможностью функционирования при наличии полезного сигнала. Следовательно, дальнейшее направление повышения качественных показателей – использование новых структурно-алгоритмических решений при микроминиатюризации как электроакустических преобразователей, так и элементов блока управления, т.е. объединение таких узлов, как АЦП, ЦАП и процессорного ядра на одном кристалле, за счет применения современных микроконтроллеров с высокой степенью интеграции.

Для реализации классического метода Г. Д. Малюжинца или его модификаций при разработке активных наушников необходимо выполнение ряда взаимоисключающих условий. Кроме того, необходимо точное знание функции Грина среды, а также свойств реальных приемных и компенсирующих поверхностей в случае сферической волны. Все это создает дополнительные трудности при проектировании реальных систем активного пространственного гашения.

При построении адаптивных индивидуальных систем защиты возможно использование быстродействующих средств цифровой сигнальной обработки, осуществляющих непрерывную адаптацию системы к изменяющимся условиям среды в ходе ее работы в реальном масштабе времени. В зависимости от области применения реализация структуры блока управления может быть различной, начиная с простейших трансверсальных фильтров и заканчивая мультипроцессорными системами с распараллеливанием вычислительных потоков. Математическим аппаратом, используемым при создании блока управления, могут быть модифицированные адаптивные алгоритмы Уидроу–Хоффа, Элиота, Нельсона, рассмотренные выше.

Как показывают исследования, по уровню акустических шумов на первом месте, безусловно, стоит движительная техника специального назначения. Наиболее неблагоприятная шумовая обстановка складывается в обитаемых отделениях образцов техники, имеющих гусеничное шасси, в кабинах летного состава авиационной техники. От-

мечено, что, несмотря на принимаемые меры по снижению уровня шума и шумоизоляции салонов, в силу физических ограничений подавление низкочастотных составляющих крайне неэффективно.

Применимость тех или иных средств индивидуальной защиты от шума определяется не только внешними факторами, но и физиологическими особенностями органов слуха у человека, внутриличностными психофизиологическими особенностями и даже изменением психологического состояния под влиянием интенсивных акустических воздействий. При уровнях звукового давления свыше 90 дБ субъективное восприятие громкости не зависит от частоты и интенсивные низкочастотные колебания воспринимаются так же хорошо, как и среднечастотные.

Еще одной характерной особенностью слуха является значительное изменение порога слышимости при наличии маскирующих сигналов с близкими частотами. Маскирующее действие максимально на частотах, кратных частоте маскирующего тона. Это вызвано появлением биений между основным тоном и субъективными гармониками маскирующего тона.

Таким образом, на фоне интенсивных низкочастотных сигналов полезные сигналы с меньшей амплитудой не воспринимаются вплоть до средних частот. Человек способен воспринимать акустические колебания с частотами значительно ниже порога в 20 Гц, если амплитуда сигнала достаточно велика. 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 ощущения звука, 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. Установлено, что пребывание в течение 10 мин в условиях шума с уровнем 120 дБ сопровождается временной потерей слуха. Продолжительное воздействие шумов приводит к повышению порога слышимости уже за первые пять лет в среднем на 10 дБ.

Учитывая, что практически во всем диапазоне слышимых частот акустическая волна в слуховом



Рис. 7. Схема поясняющая принцип функционирования активных наушников

тракте человека является плоской, акустическую модель слухового тракта человека (рис. 7) в режиме активного гашения можно представить в виде цилиндрического волновода с закрытым концом и бесконечно мягкими стенками.

Для рассматриваемой задачи функция Грина описывает характер среды, в которой распространяются шумовые колебания, с точки зрения влияния на проходящую в этой среде волну (от источника к приемной поверхности), т.е. отражает влияние возможных факторов на процесс распространения и изменения звуковой волны в цилиндрическом волноводе. Функция Грина для цилиндрического волновода при акустических свойствах стенок волновода, близких к абсолютно мягкой поверхности (что определяет краевые условия), имеет вид:

$$G(\mathbf{r} \mathbf{r}_0) = \frac{1}{4i} H_0^{(2)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) + \frac{i}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(kr_0) H_n^{(2)}(kr) e^{-in(\varphi - \varphi_0)}.$$

Следует отметить, что для реальных задач функция Грина, как правило, не может быть получена аналитически, так как на акустическую волну действует множество различных факторов, оценить которые в каждом конкретном случае очень трудно или вообще невозможно. Единственное решение поставленной задачи в этом случае — экспериментальные исследования передаточных характеристик акустического канала между излучателем и контрольным микрофоном. Полученная математическая модель, т.е. цифровой фильтр,

описывающий передаточную характеристику, может использоваться для синтеза внешнего шумового поля по данным датчика сигнала ошибки гашения в системе с одним микрофоном. Более подробно структурная схема цифрового блока управления с синтезом внешнего шумового поля на основе математической модели, аппроксимирующей функцию Грина для слухового канала, рассмотрена в [8–14].

Подчеркнем, что для корректной регистрации внешнего шумового поля и сигнала ошибки гашения необходимо применение двух датчиков, а для генерации противофазного акустического поля – одного излучателя. Эти выводы позволяют значительно упростить функциональную схему блока управления за счет отказа от применения нескольких взаимосвязанных контуров настройки и систем датчиков-излучателей. Максимальное качество гашения достигается при максимально близком расположении контрольного датчика к барабанной перепонке.

С учетом спектральных характеристик шума современной техники и особенностей слуха человека средства активной индивидуальной защиты являются на сегодняшний день наиболее эффективным и просто реализуемым методом решения задачи защиты от низкочастотного шума. Система, содержащая один излучатель и два датчика, способна обеспечить уровень подавления внешнего шума в среднем на 20–25 дБ для псевдослучайных сигналов.

Для исследования алгоритмов построения адаптивных систем активного гашения на основе различных цифровых фильтров разработан аппаратно-программный комплекс на базе семейства сигнальных процессоров SHARC (фирмы Analog Devices).

В качестве типовых можно рассматривать два варианта построения систем активной индивидуальной защиты. При первом варианте предполагается использование головных телефонов с улучшенной звукоизоляцией и применение в блоке управления сигнального процессора с плавающей точкой. Системы, выполненные по второму варианту, имеют более низкую себестоимость; они

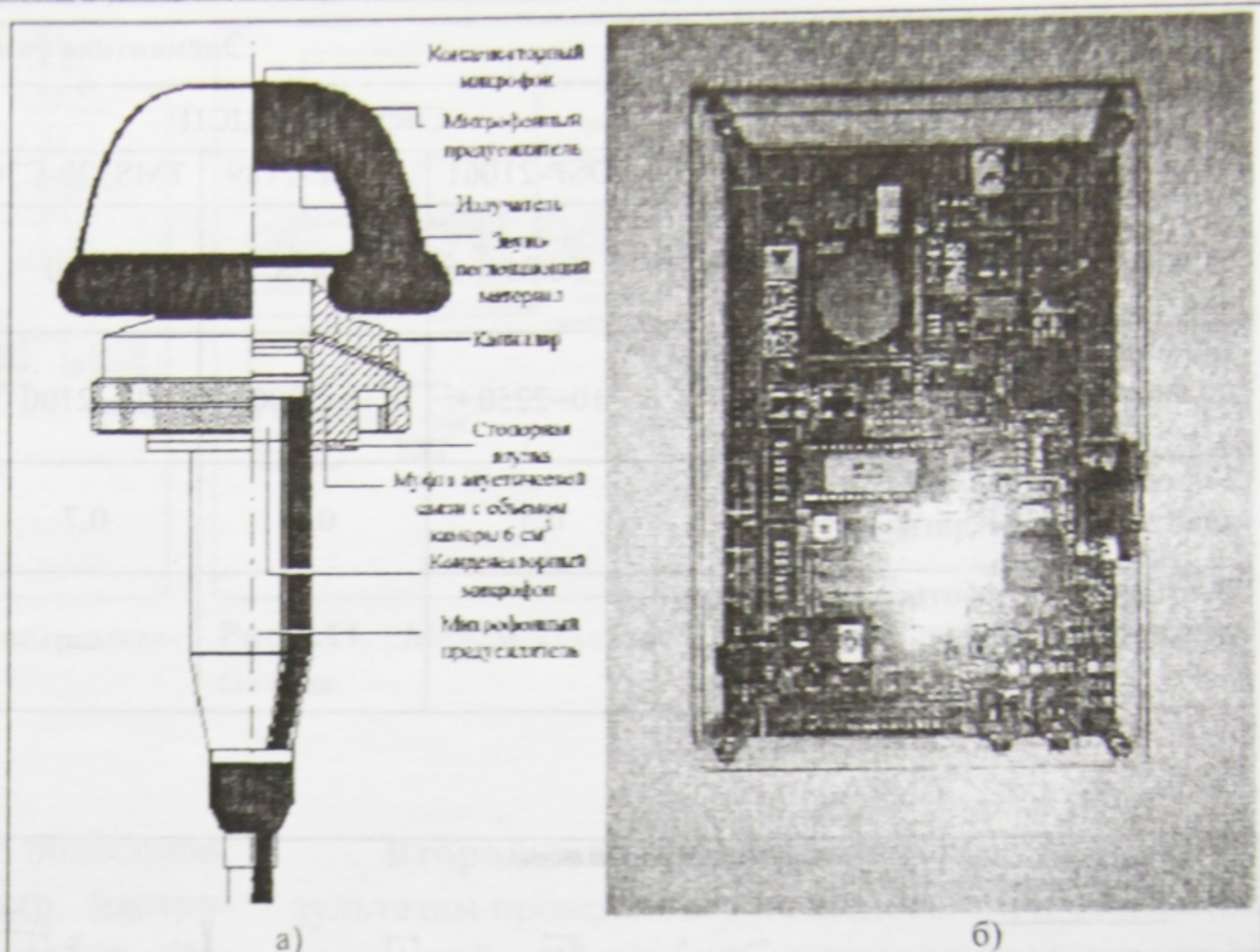


Рис. 8. Внешний вид элементов экспериментальной установки ИАСАГ: а — конструктивное исполнение микрофона сенсорного блока; б — реализация блока управления экспериментальной установки на базе SHARC EZ-KIT

строятся на базе обычных головных телефонов с закрытым акустическим исполнением и процессора с фиксированной точкой. Использование в конструкции миниатюрных микрофонов и наушников, а также микроконтроллеров типа ADuC812, интегрирующих в себе АЦП, ЦАП и процессорное ядро, позволяет добиться еще большей миниатюризации электроакустических преобразователей и элементов блока управления [14–21].

Для исследования активных наушников разработано структурно-функциональное построение экспериментальной установки. В качестве акустической модели слухового тракта человека использована физическая модель “искусственное ухо” в двух вариантах: с объемом камеры акустической связи 6 и 2 см³. На базе обоих вариантов разработано конструктивное исполнение блока датчиков и излучателей экспериментальной установки (рис. 8,а).

В таблице приведены основные технические характеристики систем индивидуальной защиты на базе цифровых сигнальных процессоров с фиксированной и плавающей точкой, системы на базе TMS320C30 и серийно выпускаемых систем с аналоговым блоком управления на операционном усилителе (ОУ): MDR-NC5 фирмы Sony (Япония), QZ2000 фирмы Koss (США) и HDC 451 фирмы Sennheiser (ФРГ).

Технические характеристики	Элементная база блока управления					
	Системы на ЦСП			Системы на ОУ		
	ADSP-21061	ADSP-2189	TMS320-C30	MDR NC5	QZ 2000	HDC 451
Ослабление шума для синусоидальных / псевдослучайных сигналов, дБ	50/35	50/28	53/30	15/9	18/10	18/9
Диапазон частот с уровнем подавления >15 дБ, Гц	10–2250	10–2000	10–2100	30–500	30–1100	30–950
Усредненное время сходимости адаптивного алгоритма, с	0,5	0,8	0,7	—	—	—
Возможность работы с источником полезного сигнала	+	+	—	+	+	+

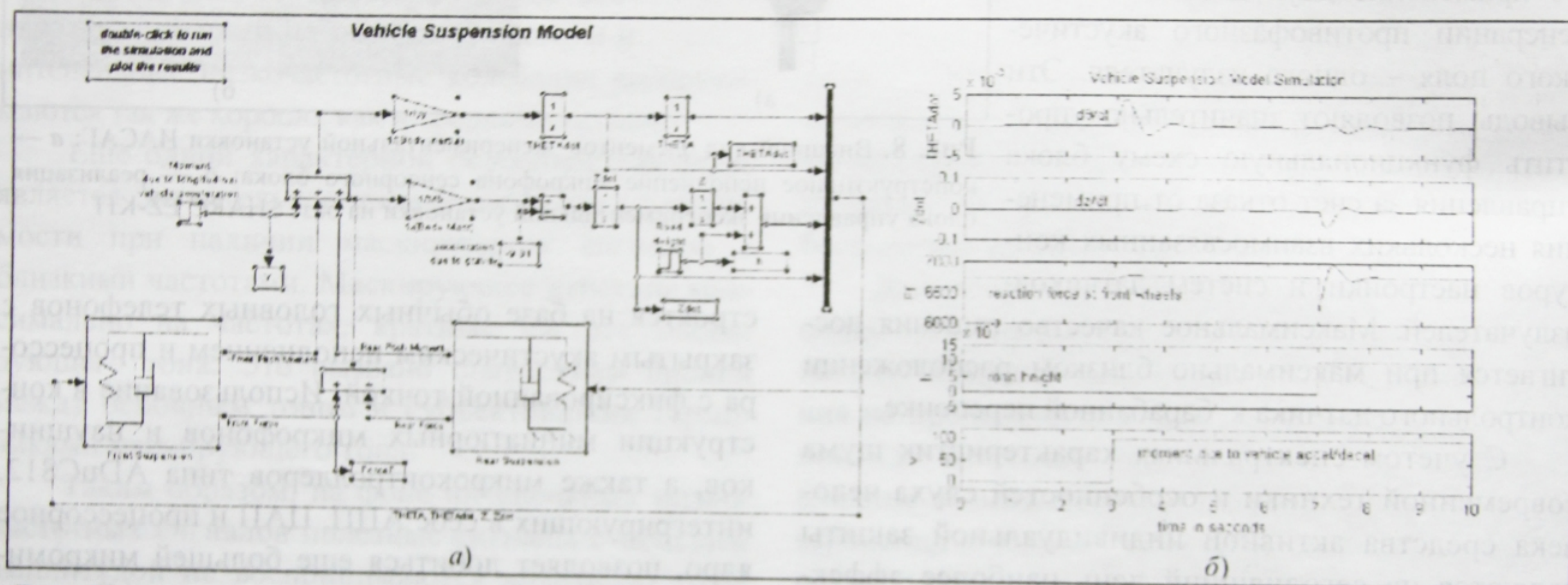


Рис. 9. САВ для гашения пространственной вибрации: а — обобщенная функциональная схема, б — показания контрольных точек

Современные системы активной индивидуальной защиты характеризуют ослабление уровня внешнего шума в среднем на 50 дБ для синусоидальных и 30 дБ для псевдослучайных сигналов с уровнем от 20 до 125 дБ, возможность работы с любым источником полезного сигнала, малое время сходимости адаптивного алгоритма.

Системы активной индивидуальной защиты — это только один из примеров эффективного использования активных методов для снижения акустических шумов.

Активные системы также находят применение и при борьбе с промышленными вибрациями. Пример типовой схемы системы активной компенсации вибрационных воздействий (САВ) для гашения пространственной вибрации из библиотеки пакета MatLab представлен на рис. 9.

На рис. 10 представлена схема для компенсации монохроматического синусоидального сигнала, для чего используется линия задержки, управляемая цепями обратной связи, которые в зависимости от рассогласования входного и компенсирующего сигналов вырабатывают сигнал по уменьшению или увеличению значения задержки. Сама схема представляет собой следящую систему управления. Здесь также используется блок задержки, имитирующий суммарную задержку в блоках приема, обработки сигналов и системах компенсации воздействий.

На рис. 11 представлена модель многоканальной схемы для компенсации полигармонического сигнала (состоящего из нескольких ярко выраженных гармоник), для чего используется аналогичная схема задержки с управлением её вели-

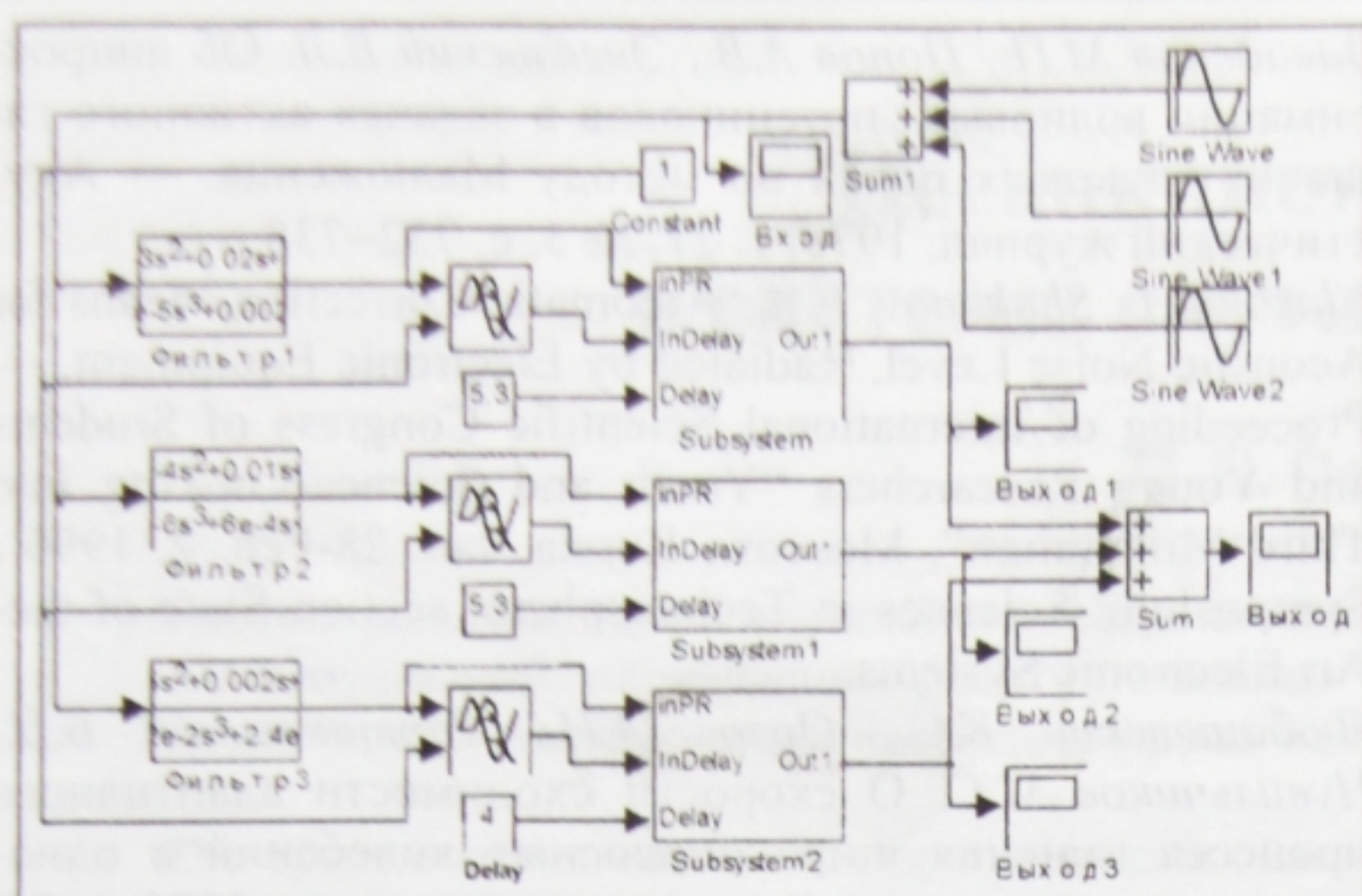


Рис. 10. Модель схемы для компенсации монохроматического синусоидального сигнала

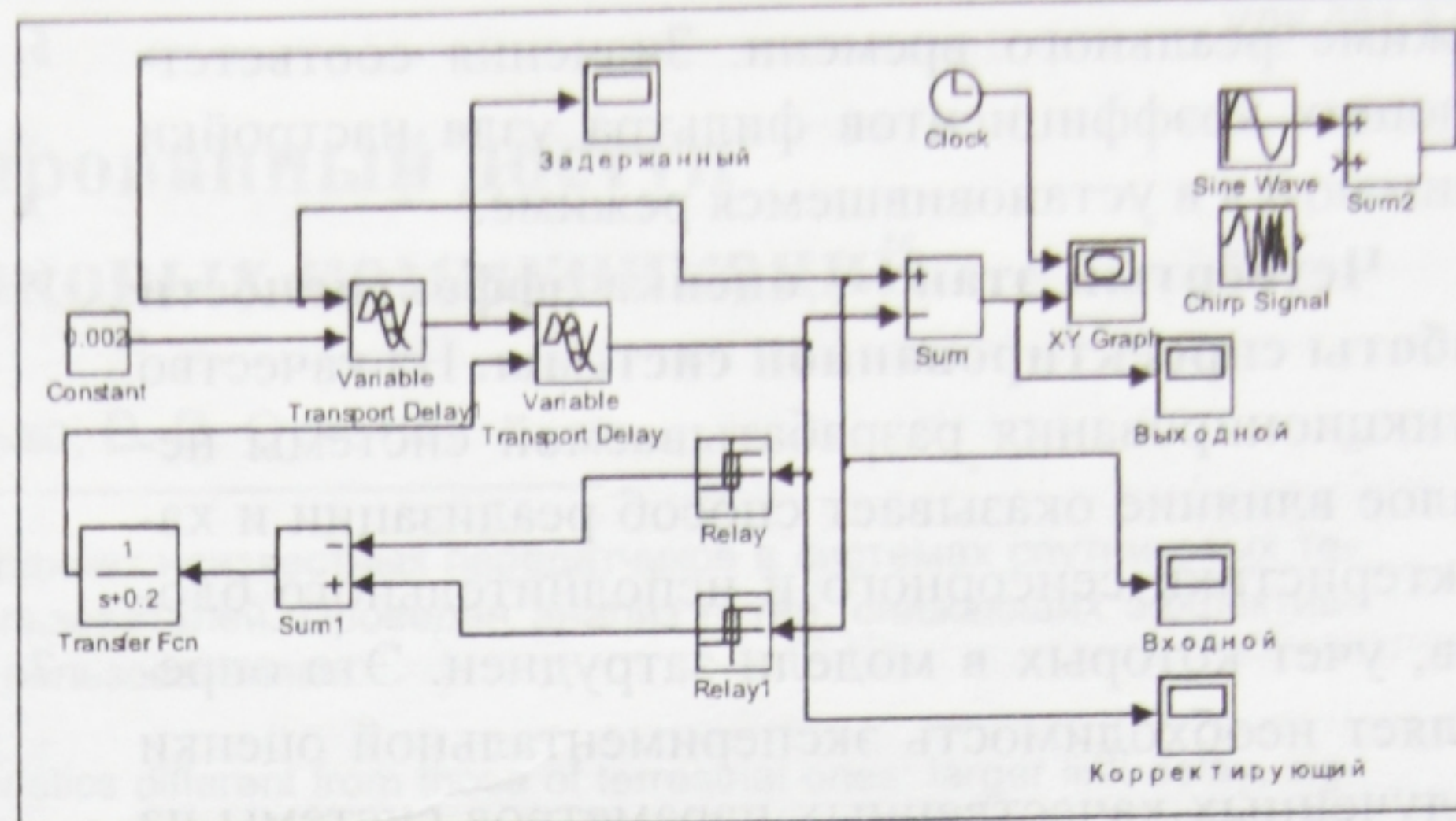


Рис. 11. Модель схемы компенсации полигармонического сигнала

чины. На входе каждого канала стоит полосовой, программно перенастраиваемый фильтр, настроенный на определённый диапазон частот. Настраиваются фильтры таким образом, чтобы сумма их ЛАЧХ представляла собой ЛАЧХ полосового фильтра, перекрывающего весь диапазон частот компенсируемого сигнала. На данной схеме использованы фильтры 8-го порядка. После фильтра ставится перенастраиваемая линия задержки. Величину задержки определяют, исходя из резонансной частоты, на которую настроен входной фильтр. Далее задержанный сигнал поступает на сумматор, где он суммируется с сигналами с параллельных каналов, и затем на устройства компенсации. В зависимости от качества компенсации происходит автоподстройка фильтров и значений времени задержки.

Задержка для каждого фильтра $t_3 = 2\pi / \omega_0 - t_{30}$, где ω_0 — частота настройки фильтра; t_{30} — время задержки внутри системы управления.

Использование моделирования на программных моделях оправдывает себя при разработке полигармонических САВ. При проектировании пространственных САВ от случайной вибрации алгоритм разработки можно представить в виде следующих основных этапов.

Первый этап — экспериментальные исследования свойств объекта управления. Определяем передаточные функции отдельных участков трактов канала управления и каналов возбуждения, получаем общую информацию о характере протекающих в конструкции вибрационных процессов.

Второй этап — структурный синтез. По результатам проведенных исследований и выявления априорной информации синтезируется структурный вариант реализации системы защиты.

Третий этап — параметрический синтез. После синтеза структуры варианта реализации определяем значения параметров активной системы: размерность нерекурсивных фильтров, тип алгоритма адаптации, частоту дискретизации итерационного процесса (частоту опроса АЦП и вывода на ЦАП), способ обработки сигналов с датчиков (кадровый или бинарный) и т.п.

Первым шагом при определении перечисленных характеристик является нахождение передаточных функций электровибрационных трактов. Результатом данного шага является вектор весовых коэффициентов нерекурсивного фильтра, передаточная функция (ПФ) которого идентична ПФ, соответствующего участка электровибрационного тракта объекта управления.

Решение данной задачи может быть осуществлено двумя способами:

- на основе машинной обработки измеренных передаточных функций соответствующих каналов в режиме моделирования;
- в процессе адаптации в реальном времени на основе одного из реализованных в АПК алгоритмов.

Основные шаги первого способа соответствуют последовательности определения наилучших параметров нерекурсивного фильтра.

В основе второго способа лежит определение параметров путем автоматической настройки в

режиме реального времени. Значения соответствующих коэффициентов фильтра узла настройки снимаются в установившемся режиме.

Четвёртый этап — оценка эффективности работы спроектированной системы. На качество функционирования разрабатываемой системы немалое влияние оказывает способ реализации и характеристики сенсорного и исполнительного блоков, учет которых в модели затруднен. Это определяет необходимость экспериментальной оценки полученных качественных параметров системы на реальном объекте.

Заключение

Рассмотрены только некоторые аспекты применения систем активного гашения акустических шумов и промышленной вибрации. Вследствие того, что основная энергия большинства источников шума сконцентрирована в диапазоне до 500 Гц, можно достаточно эффективно применять системы активного гашения. На сегодня наиболее правильным является подход совместного использования активных и пассивных средств для подавления шума в низкочастотном и высокочастотном диапазонах соответственно. Лишь в случае невозможности использования пассивных средств в высокочастотном диапазоне необходимо реализовывать систему гашения только активными методами, переходя к решению задачи широкополосного пространственного активного гашения. Только такой подход позволит добиться необходимых результатов с наименьшими затратами.

Литература

1. *Lueg, P.*, Process of Silencing Sound Oscillations. U.S. Patent № 2043416, June 9, 1936.
2. *Olson, H., May, E.G.*, Electronic Sound Absorber. — *J. Acoust. Soc. America*, 1953, 25, 6, pp.1130–1136.
3. *Малюжинец Г.Д.* Об одной теореме для аналитических функций и ее обобщение для волновых потенциалов. — III Всесоюзный симпозиум по дифракции волн (Сб. докладов). — М.: Наука, 1964.
4. *Jessel, M.J.M.*, Sur les absorbeus actifs, Paper F-5-6, 82, Proceedings 6th International Congress on Acoustics, Tokyo, 1968.

Власов А.И. — канд. техн. наук, доц. кафедры ИУ-4 МВТУ им. Баумана.

Область научных интересов: информационные технологии и микропроцессорные системы.

Володин Е. А. — студент кафедры ИУ-4 МВТУ им. Баумана.

Область научных интересов: системы активной виброзащиты, нейрокомпьютеры.

Семенов С. Г. — аспирант кафедры ИУ-4 МВТУ им. Баумана.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов.

Шахнов В.А. — докт., техн., наук, проф., зав. кафедрой ИУ-4 МВТУ им. Баумана.

Область научных интересов: микропроцессорные системы.

5. *Завадская М.П., Попов А.В., Энгельский Б.Л.* Об аппроксимации волновых потенциалов в задачах активного гашения звуковых полей по методу Малюженца. — *Акустический журнал*, 1975, т. 21, № 5, с. 732–738.
6. *Vlasov A.I., Shakhnov, V.A.*, Automatic Correction Means for Acoustic Noise Level, Radiated by Electronic Equipment. — *Proceeding of International Scientific Congress of Students and Young Researchers "Youth and Science-Looking into Third Millennium"*, Moscow, Russia, Jan. 28-Feb. 2, 1996 / *Symposium: Sciences in Technosphere, section State-of-the-Art Electronic Systems*.
7. *Любашевский Г.С., Орлов А.И., Тартаковский Б.Д., Чувильчиков М.С.* О скорости сходимости адаптивного процесса гашения широкополосных колебаний в одномерных структурах. — *Акустический журнал*, 1990, т. 36, № 3, с. 496–501.
8. *Власов А.И.* Принципы активного подавления действия вибрационных полей на электронную аппаратуру. — *Приборы и системы управления*, 1996, №11, с.30–32.
9. *Колкин А.И.* Снижение шума машин активным методом. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
10. *Семенов С.Г., Власов А.И., Володин Е.А.* Проектирование и применение систем активной защиты от акустических воздействий. — 2-я Межд. конф. СНГ "Молодые ученые – науке, технологиям и профобразованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения". — Москва, октябрь, 2000, ч. 2,3, с. 83–85.
11. *Власов А.И., Колосков С.В.* Волшебство волновых полей: волновые поля в школьном курсе физики. — *Компьютер в школе*, 2000, № 3(17), с. 16–20.
12. *Власов А.И.* Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей. — *Приборы и системы управления*, 1997, № 12, с. 59–70.
13. *Власов А.И., Семенов С.Г., Поляков Ю.А.* Микропроцессорные системы активной индивидуальной акустозащиты. — *Микросистемная техника*, 2000, № 2, с. 15–20.
14. *Адаптивные фильтры: Пер. с англ./Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта.* — М.: Мир, 1988
15. *Арзамасов С.Н., Мальцев А.А.* Адаптивный алгоритм активной компенсации широкополосного случайного поля. — *Известия ВУЗов. Радиофизика*, 1985, т. 28, № 8.
16. *Elliott, S.J., Nelson, P.A.*, Active Noise Control, *Noise/News International*, June, 1994, pp.75–98.
17. *Costin, M. H. and Elzinga, D. R.*, Active Reduction of Low-Frequency Tire Impact Noise Using Digital Feedback Control - Digital Control Applications with the TMS320 Family, Texas Instruments, 1991, pp. 395–398.
18. *Allie, C.D., Bremigan, L.J., Eriksson, R.A., Greiner,* Hardware and Software Considerations for Active Sound Control-ICA SSP 88, New York, 1988, pp. 2598–2601.
19. *Digital Control Applications with the TMS320 Family*, Texas Instrument Inc., 1991.
20. *Digital Signal Processing Applications Using the ADSP-2100 Family*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, vol. 1, 1992.
21. *Digital Signal Processing Applications Using the ADSP-2100 Family*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, vol. 2, 1992.

Поступила 15 октября 2001 г.