

Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей

Рассмотрены вопросы теории и практики построения средств активного гашения (АГ) волновых полей. Проанализированы особенности построения интеллектуальных измерительно управляющих систем АГ (САГ) на основе сигнальных процессоров. Представлены средства автоматизации их проектирования. Указаны перспективные области применения САГ волновых полей различной природы: акустических, вибрационных, электромагнитных и т.п.

Some problems of theory and practice of building the facilities for active suppression (AS) of wave fields influence are considered. Specific features of building intelligent AS measurement and control systems (ASS) based upon signal processors are analyzed. The facilities for automatization of their design are presented. Some promising application fields of ASS for wave fields of various natures, namely acoustic, vibrational, electromagnetic, etc. are exposed.

Введение

Проблемы защиты систем человек – машина от экстремальных и патогенных воздействий искусственной или природной среды приобрели сейчас глобальный характер. Это повлекло за собой бурное развитие средств комплексной и индивидуальной защиты на основе новейших достижений науки и техники. Среди многообразия действующих на систему человек – машина дестабилизирующих воздействий главное влияние оказывают физические и химические факторы. Анализ свидетельствует, что практически по любому из факторов часто наблюдается превышение нормативных показателей, однако эффективность защиты от нежелательных воздействий с помощью традиционных пассивных средств, как правило, невелика. Это заставляет разрабатывать и применять новые средства защиты, способные адаптироваться к изменяющимся условиям среды и управлять ее параметрами в автоматическом режиме и реальном масштабе времени (РМВ).

В последний период вместе с пассивными средствами защиты, реализуемыми без дополнительных источников энергии, все большее распространение получают активные средства защиты систем человек – машина, построенные на основе применения дополнительных источников энергии, которые излучают поле в противофазе к дестабилизирующему воздействию. В результате достигается их взаимная компенсация. Эффективность (САГ) повышается с увеличением длины волны подавляемого поля. В общем случае любая САГ состоит из трех основных блоков: сенсорного (СБ), регистрирующего характеристики поля, микропроцессорного блока управления (МБУ), вырабатывающего управляющие сигналы в соответствии с заложенными в него алгоритмами, и блока исполнительных устройств (БИУ), излучающего компенсирующее поле (рис. 1).

Конструктивная реализация сенсорного и исполнительных блоков зависит от вида компенсируемого поля. Так, например, для гашения акустических полей наиболее общий тип компенсирующего источника исполнительного блока – перемещающийся громкоговоритель, однако можно применить и механическое возбуждение структурных компонентов

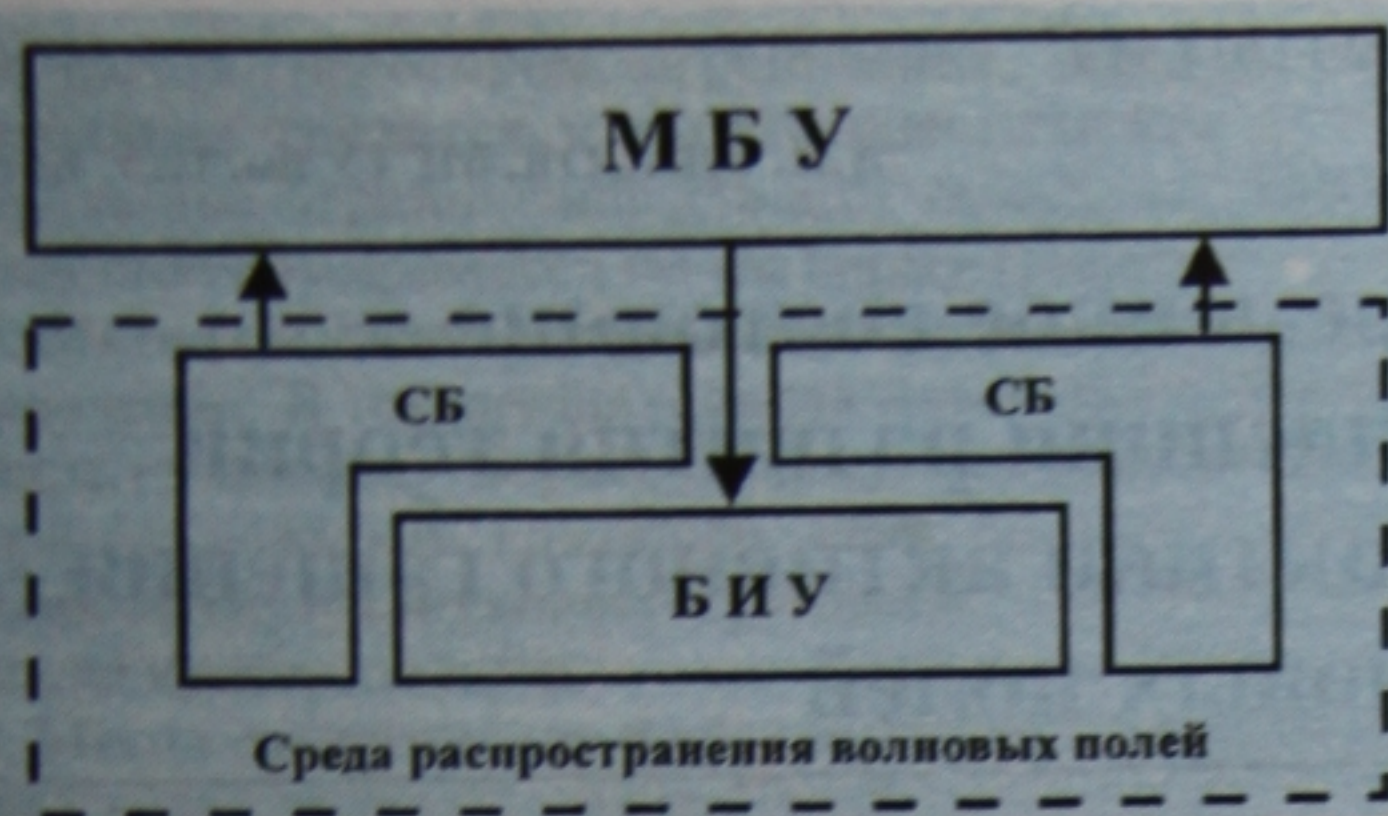


Рис. 1. Обобщенная структурная схема САГ

или даже модулируемый поток сжатого воздуха. Постоянному расширению областей приложения активных систем защиты способствуют и тенденции к постоянному уменьшению стоимости и росту производительности микропроцессорных комплектов.

1. Методы и средства гашения влияния волновых полей

1.1. Пассивное гашение

Большинство распространенных сегодня методов защиты человека от шума реализовано традиционными пассивными средствами: с помощью различных звукопоглощающих материалов, демпферов, перегородок, специальных звукоизолирующих покрытий и конструкций [1]. Данные системы имеют строго фиксированные характеристики и не могут оперативно подстраиваться к изменяющимся условиям среды. Кроме этого, при гашении низкочастотных составляющих эти средства, как правило, малоэффективны вследствие значительного увеличения объема и массы системы гашения. Это обусловлено тем, что на низких частотах длина волны становится больше по сравнению с толщиной типичного поглотителя. Принципы разработки пассивных средств защиты уже во многом хорошо изучены, теоретические аспекты реализации и результаты их применения представлены в большом числе публикаций и монографий [1].

1.2. Активное гашение

Альтернативой пассивным средствам являются САГ, в которых гашение дестабилизирующего волнового воздействия достигается путем наложения на исходное поле другого поля, инверсного по отношению к гасимому. Несмотря на привлекательность этого метода, его практическое применение связано с удовлетворением высоких требований к точности настройки, быстродействию, показателям качества и устойчивости системы управления.

Первые упоминания о разработках САГ относятся к началу 30-х годов. В 1934 г. была запатентована САГ шума, состоявшая из регистрирующего микрофона, блока управления (имевшего усилитель, линии задержки и фильтры, обеспечивающие необходимую амплитудную и фазовую коррекцию измеряемого сигнала) и излучателя [2]. Ее работа основана на том, что скорость распространения звука значительно меньше скорости распространения электрических сигналов, а это позволяет, измерив в некоторой точке пространства параметры звуковой волны и установив на некотором расстоянии от этой точки компенсирующий излучатель, сформировать за время прохождения звуком данного расстояния управляющий сигнал на компенсатор (динамик), основной задачей которого и является формирование поля, инверсного по отношению к исходному. Взаимное наложение исходного и компенсирующего полей приводит к снижению уровня результирующего звукового поля.

Несмотря на кажущуюся простоту метода, вплоть до начала 60-х годов его теория практически не рассматривалась. Большинство авторов ограничивались качественным описанием методов и средств подавления звуковых полей. В этот период были опубликованы работы, посвященные локальному подавлению шума в случае индивидуальной защиты [3], активному подавлению шума трансформаторов [4] и ряд других.

Первоначально в данных системах для управления использовали информацию о характере только исходного или результирующего полей (неадаптивные САГ). Микропроцессорный блок управления этих систем рассчитан на конкретные характеристики компенсируемого поля, что не позволяет подстраиваться к изменяющимся характеристикам среды, однако быстрота реакции на внешнее воздействие, образ которого заранее известен, дает возможность применять неадаптивные САГ для компенсации нестационарных волновых полей. Построение САГ сегодня напрямую связано с принципами адаптивного управления, позволяющими настраиваться на изменяющиеся условия среды, однако это требует определенного времени, что заставляет применять их для компенсации в основном стационарных волновых полей.

1.2.1. Неадаптивные САГ

Неадаптивные САГ – достаточно простые системы, однако они требуют значительного количества априорной информации. Их работа зависит от имеющейся на начальной стадии проектирования априорной информации и осуществляется в результате аналитического вычисления условий экстремума функции, определяющей цель и качество управления. Программа настройки параметров выбирается заранее таким образом, чтобы система управления находилась в определенном квазиоптимальном режиме при некоторых типовых или наиболее вероятных внешних и внутренних условиях.

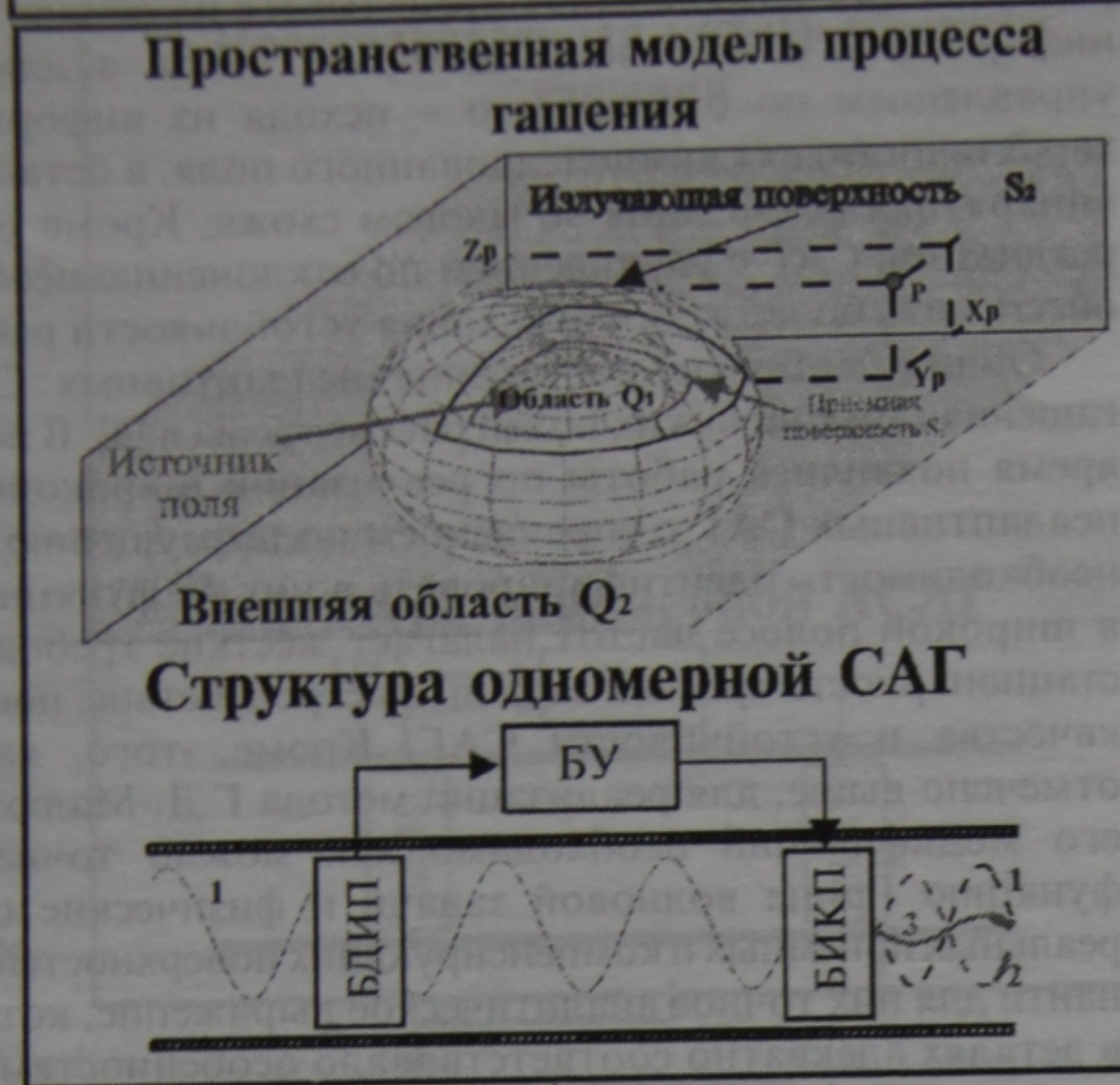
Строгое решение задачи активного пространственного гашения для этого случая было дано в работах Г.Д. Малюжинца [5] и М. Жесселя [6]. В формулировке М. Жесселя излучающая поверхность представлена в виде сферы с равномерно распределенными по ее поверхности диполями и монополями. В соответствии с принципом Гюйгенса такая поверхность гасит снаружи сферическую волну точечного источника, помещенного в ее центр. Для компенсации распределенного в пространстве источника его следует окружить слоем из таких сферических поверхностей. При устремлении толщины слоя к 0 решение М. Жесселя переходит в решение Г.Д. Малюжинца.

Кратко проанализируем общие положения теории Г.Д. Малюжинца. Он предложил для гашения произвольных звуковых волн внутри ограниченного объема использовать охватывающие его приемные и излучающие поверхности Гюйгенса – Френеля, состоящие из элементов монопольного и дипольного типов. Для решения задачи АГ исходного поля вне границ области, содержащей источник, им было предложено рассматриваемую область разбить на две подобласти: внутреннюю Q_1 и внешнюю Q_2 , между которыми расположены две замкнутые непересекающиеся поверхности S_1 и S_2 (рис. 2).

Пусть имеется источник (или несколько источников) звука, создающий в некоторой точке P пространства (см. рис. 2), местоположение которой характеризуется вектором $\vec{P} = \{X_P, Y_P, Z_P\}$, акустическое поле, определяемое давлением $p_n(\vec{P}, t)$ и скоростью частиц $v(\vec{P}, t)$. Потенциал скоростей $F(\vec{P}, f)$ в данном пространстве описывается уравнением Гельмгольца: $\Delta F(\vec{P}, f) + k^2(1 + g(\vec{P}, f))F(\vec{P}, f) = f(\vec{P}, f)$, где $g(\vec{P}, f)$, $f(\vec{P}, f)$ – функции неоднородностей и источников соответственно; $k = f/c$ (f – частота; c – скорость звука).

При этом все источники звука находятся в области Q_1 (см. рис. 1). Функции неоднородностей $g(\vec{P}, f)$ и источников

САГ с управлением по возмущению



САГ с управлением по отклонению

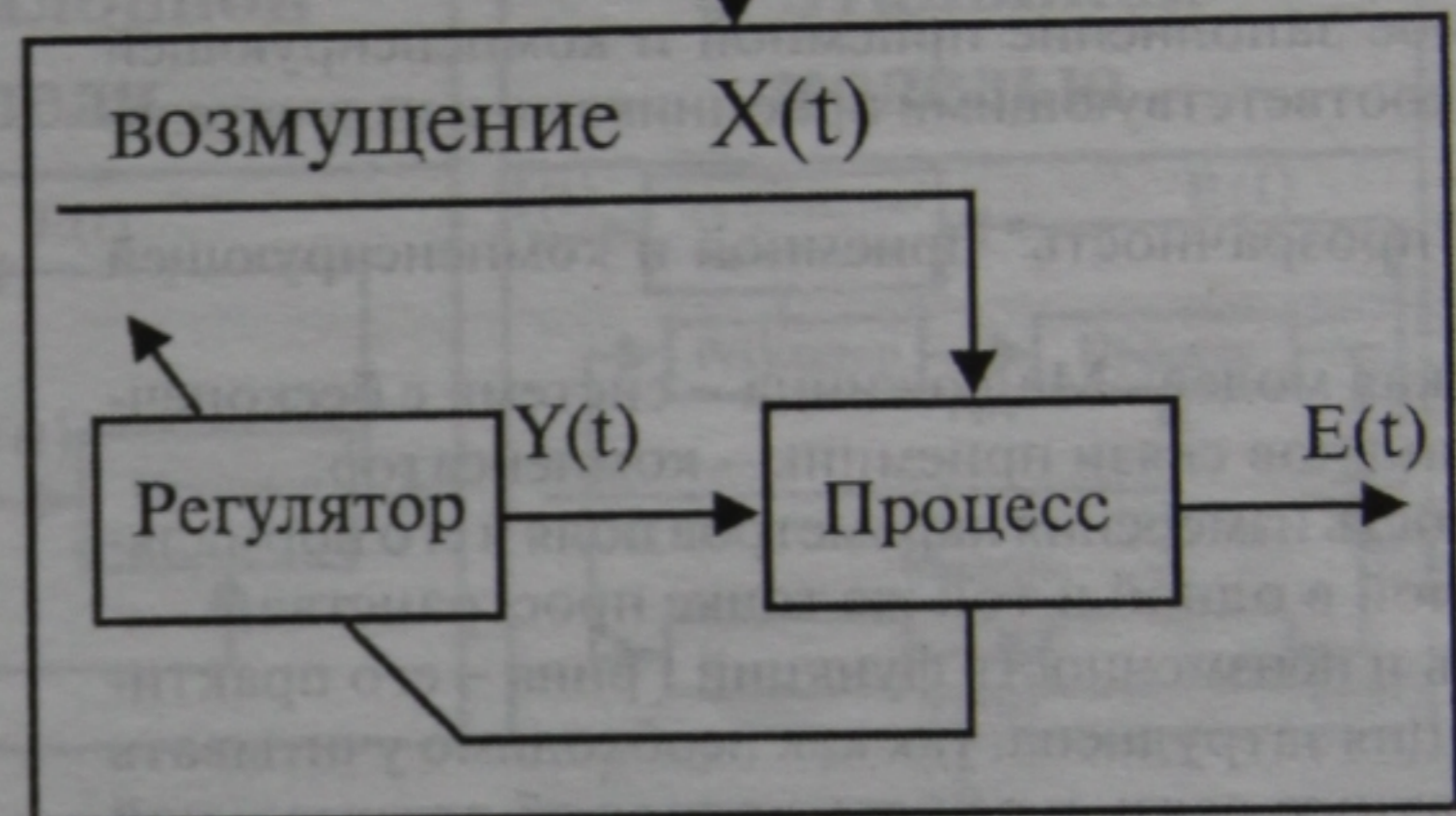
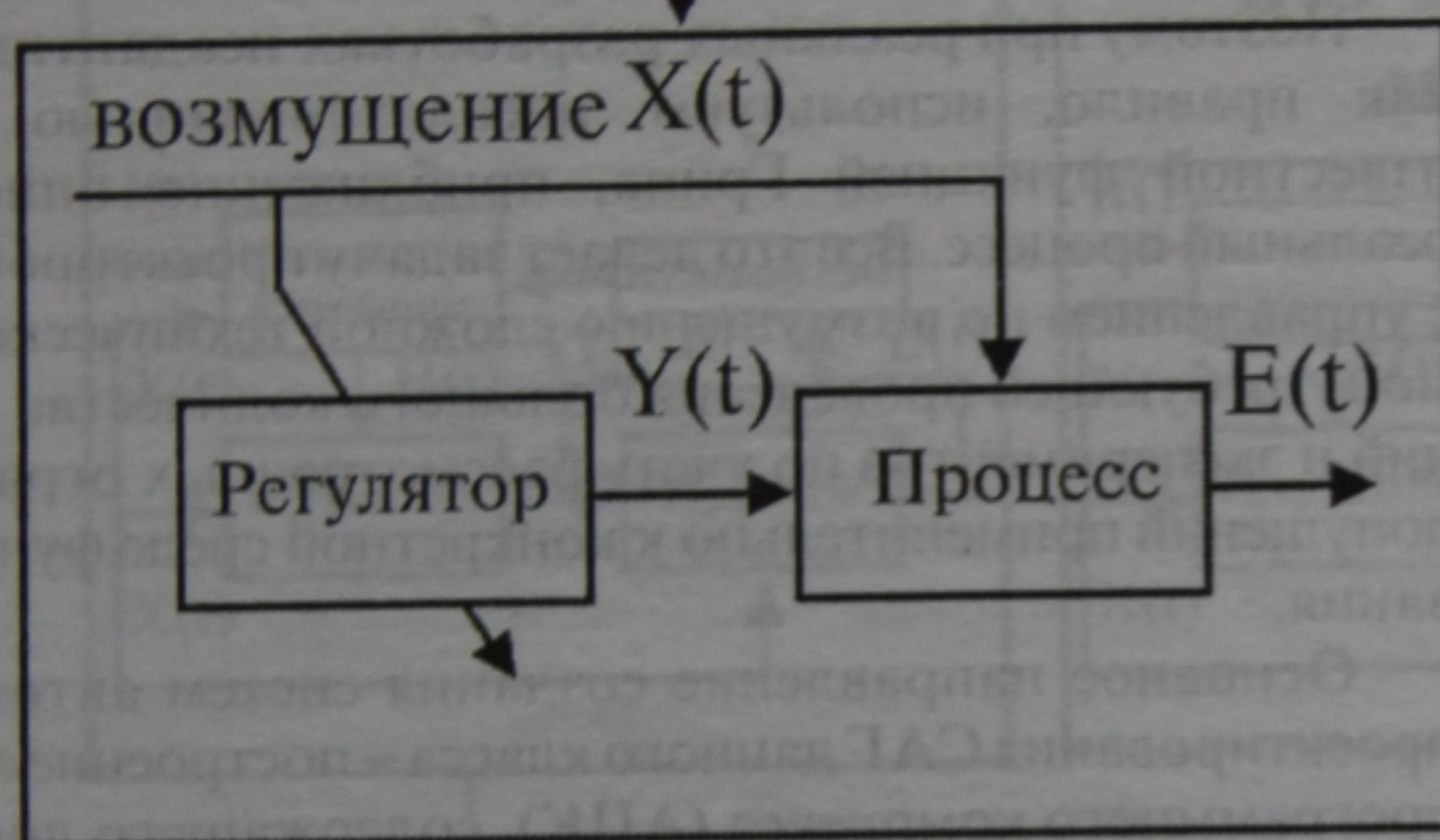


Рис. 2. Особенности построения неадаптивных САГ:

БДИП – блок датчиков исходного поля; БКИ – блок датчиков скомпенсированного поля; БИКП – блок излучателей компенсирующего поля; $P(X_p, Y_p, Z_p)$ – тока пространства; 1 – исходный сигнал $X(t)$; 2 – компенсирующий сигнал $Y(t)$; 3 – сигнал ошибки компенсации $E(t)$

$f(\vec{P}, f)$ зависят от пространственных координат и частоты и удовлетворяют следующим условиям:

$g(\vec{P}, f) = g_{s_1}, f(\vec{P}, f) = f_{s_1}$, если координаты находятся в границах области Q_1 ;

$g(\vec{P}, f) = g_{s_2}, f(\vec{P}, f) = f_{s_2}$, если они расположены в границах области Q_2 .

Значения функций g_{s_1}, f_{s_1} равны нулю вне области Q_1 , а значения функций g_{s_2}, f_{s_2} равны нулю вне области Q_2 . При этом полное звуковое поле внутри области Q_1 складывается из внешнего поля $F_0(\vec{P}, f)$ и собственного поля излучения и рассеяния $F_A(\vec{P}, f)$: $F(\vec{P}, f) = F_0(\vec{P}, f) + F_A(\vec{P}, f)$.

Принцип Гюйгенса устанавливает, что акустическое поле в любой точке P области Q_2 , обусловленное источниками звука, может быть точно воспроизведено вторичными источниками звука (источниками Гюйгенса), непрерывно распределенными на поверхности S_1 . Наложение исходного акустического поля, регистрируемого датчиками на поверхности S_1 , и компенсирующего акустического поля делает возможным полное гашение исходного звукового поля в области Q_2 , внешней по отношению к области Q_1 , включаю-

щей в себя источники звука. Предполагается, что поверхности S_1 и S_2 абсолютно прозрачны. Тогда для получения результирующего поля F_{Σ} , равного 0, достаточно, чтобы компенсирующее поле F_c имело вид $F_c = -F_i$ вне поверхности S_2 и $F_c = 0$ внутри поверхности S_1 . М.П. Завадской с соавторами показано [7], что для этого необходимо, чтобы дипольные и монопольные излучатели, распределенные на поверхности S_2 , имели амплитуды $-F_i$ и $-(\partial F/\partial n)$ соответственно (где n – нормаль к поверхности S_2). По формуле Грина получаем

$$F_c = \frac{1}{4\pi} \oint_{S_2} \left[-F_i \frac{\partial (e^{ikR}/R)}{\partial n} + \frac{\partial (F_i)}{\partial n} \frac{e^{ikR}}{R} \right] dS_2,$$

где R – расстояние от точки наблюдения P до произвольной точки поверхности S_2 .

Тогда, как следует из более поздних работ этих же авторов, поле, созданное непрерывно распределенными монополями и диполями, определяется выражением

$$F_c = \begin{cases} -F_i, \vec{P} \text{ вне } S_2; \\ 0, \vec{P} \text{ внутри } S_2; \end{cases}$$

где \vec{P} – радиус-вектор, характеризующий положение точки наблюдения в пространстве.

Результирующее поле $F_{\Sigma}(\vec{P}, \lambda)$ в области Q_2 имеет вид

$$F_{\Sigma}(\vec{P}, \lambda) = F_{Q_1}(\vec{P}, \lambda) + F_c(\vec{P}, \lambda) = \\ = F_0(\vec{P}, \lambda) + F_i(\vec{P}, \lambda) + F_c(\vec{P}, \lambda) = \begin{cases} F_0(\vec{P}, \lambda) \text{ вне } S_2' \\ F_{Q_1}(\vec{P}, \lambda) \text{ внутри } S_2 \end{cases}$$

Существенная особенность решения Г.Д. Малюжинца на основе приемно-излучающих поверхностей Гюйгенса – однонаправленность приема и компенсации, что обеспечивает невозможность приема сигналов компенсаторов датчиками исходного поля, а это обуславливает устойчивость системы гашения к самовозбуждению.

Главное значение работ Г.Д. Малюжинца состоит в том, что в них было показано, как при одновременном использовании приемников двух типов – монополей и диполей – с определенными свойствами можно выделить часть поля, относящуюся лишь к внутренним или внешним источникам в отдельности.

Вследствие того что решение Г.Д. Малюжинца и его модификации подразумевают удовлетворение некоторым, в том числе и взаимоисключающим, допущениям:

непрерывное заполнение приемной и компенсирующей поверхностей соответствующими приемниками и излучателями;

волновая "прозрачность" приемной и компенсирующей поверхностей;

теоретическая модель Малюжинца – система с бесконечным числом каналов связи приемник – компенсатор;

необходимость измерения параметров поля и его нормальной производной в одной и той же точке пространства;

известность и неизменность функций Грина – его практическая реализация затруднена, так как необходимо учитывать волновую обратную связь и решать вопрос об оптимальной дискретизации приемной и компенсирующей поверхностей.

Развитие решения Г.Д. Малюжинца с учетом вышеперечисленных особенностей и снятия тех или иных идеализаций было осуществлено в работах М.П. Завадской, G. Mangiante, М.В. Федорюка, М. Swinbanks, G. Canevet, К.Н. Eghtesadi, М.Л.М. Jessel, Б.Д. Тартаковского, Г.С. Любашевского и др. Несмотря на значительные идеализации, решения Малюжинца представляется очень привлекательным, поскольку без коренного изменения алгоритма обработки сигналов приемников оно допускает очевидный переход к практически реализуемым схемам гашения. При этом непрерывно распределенные элементы системы гашения заменяются их дискретными аналогами, а каждый приемник соединяется с соответствующим излучателем через преобразовательный блок, который для гармонических сигналов включает в себя фазовращатель и усилитель. Однако такая замена противоречит требованиям прозрачности поверхностей S_1 и S_2 и многим другим требованиям теоретического решения Г.Д. Малюжинца, что значительно уменьшает эффективность компенсации, которая могла бы быть достигнута в идеальном случае.

Неадаптивные САГ можно разбить на два класса: САГ с управлением по возмущению и САГ с управлением по отклонению. Системы с управлением по возмущению в идеальном случае наряду с непрерывным заполнением приемной и компенсирующей поверхностей соответствующими приемниками и излучателями требуют и обеспечения волновой прозрачности этих поверхностей, что является взаимоисключающим. Кроме того, неадаптивные САГ с управлением как по возмущению, так и по отклонению требуют большого количества априорной информации и выполнения требований, сформулированных выше. Про-

странственная модель процесса гашения и структурные схемы для САГ каждого из классов приведены на рис. 2. Главное отличие САГ разных классов друг от друга заключается в том, что для САГ с управлением по возмущению управляющие воздействия определяются на основе текущей информации о состоянии исходного поля, а для САГ с управлением по отклонению – исходя из информации о характеристиках скомпенсированного поля, в остальном их аппаратная реализация во многом схожа. Кроме того, при реализации САГ с управлением по отклонению необходимо обеспечить более жесткие условия устойчивости работы.

Общие моменты построения неадаптивных САГ для гашения гармонических полей рассмотрены в [8]. В последнее время появились работы по реализации широкополосных неадаптивных САГ с управлением по возмущению, однако необходимость идентифицировать в них N^2 функций Грина в широкой полосе частот налагает жесткие требования на стационарность краевой задачи, быстродействие, показатели качества и устойчивости САГ. Кроме этого, как было отмечено выше, для реализации метода Г.Д. Малюжинца и его модификаций необходимо как можно точнее знать функцию Грина волновой задачи и физические свойства реальных приемных и компенсирующих поверхностей, однако найти для них точное аналитическое выражение, которое бы в деталях адекватно соответствовало особенностям каждой конкретной задачи, не всегда удается.

Поэтому при реальных разработках неадаптивных САГ, как правило, используют идеализированную модель с известной функцией Грина, приближенно описывающей реальный процесс. Все это делает задачу проектирования САГ с управлением по возмущению сложной технической проблемой, требующей проведения большого количества исследований и экспериментов по учету рассмотренных ограничений и допущений применительно к конкретной среде функционирования.

Основное направление создания систем автоматизации проектирования САГ данного класса – построение аппаратно-программного комплекса (АПК), содержащего динамически расширяемую базу данных по известным на сегодня функциям Грина для конкретных условий работы САГ.

1.2.2. Адаптивные САГ

Адаптивные САГ (АСАГ) [9...21], как правило, используют настройку по замкнутому контуру, благодаря чему собственные характеристики системы изменяются в зависимости от текущей, а не только априорной информации об условиях работы САГ. Для этого в добавлении к измерительной S_1 и компенсирующей S_2 поверхностям вводится контрольная поверхность S_3 , на которой располагаются датчики сигнала ошибки компенсации (рис.3). В зависимости от способа реализации с позиций теории управления все АСАГ можно разделить на два класса: *разомкнутые* и *замкнутые АСАГ*.

Принцип работы разомкнутых АСАГ состоит в следующем. В результате определения текущих значений измеряемых величин и связанных с ними параметров, относящихся к процессу гашения (получение недостающей априорной информации в ходе идентификации), вектору параметров модели процесса, определяется вектор параметров регулятора $\vec{H}(t)$ (см. рис. 4), после чего проводится соответствующая настройка данного регулятора. Адаптивные САГ этого класса достаточно просты, однако требуют большого количества априорной информации (в идеале необходимо точное знание функции Грина среды распространения). Адаптация осуществляется в направлении достижения заданного критерия качества $I(t)$ гашения.

В замкнутых АСАГ настройка параметров выполняется в замкнутом контуре, при этом возможны два варианта реализации (см. рис. 4): замкнутые АСАГ без эталонной

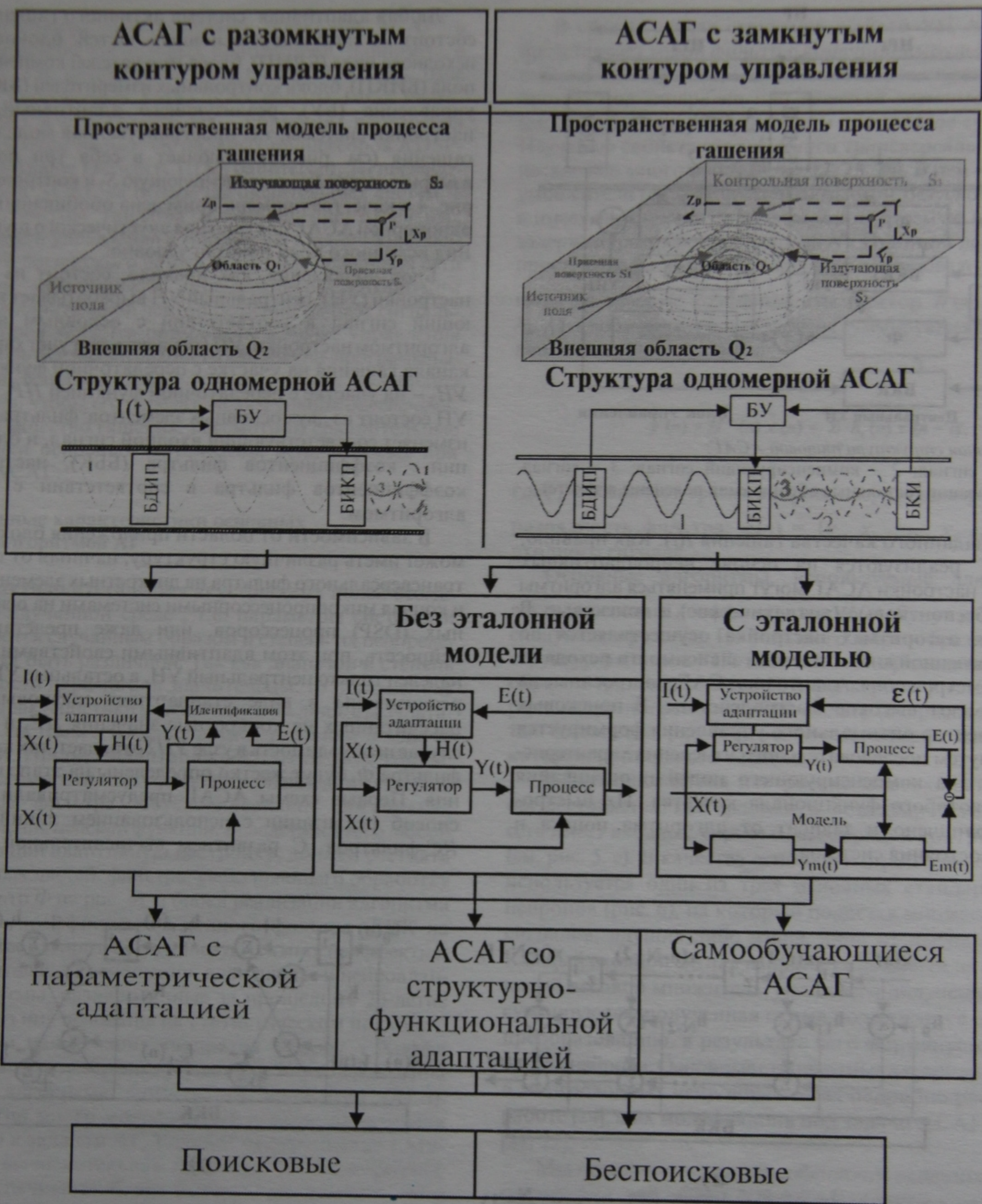


Рис. 3. Особенности построения АСАГ:
 $I(t)$ – критерий качества гашения (остальные обозначения те же, что и на рис. 2)

модели и замкнутые АСАГ с эталонной моделью. В основе принципа действия первого вида АСАГ лежит алгоритм одноконтурного регулирования, при котором параметры регулятора модифицируются в процессе сведения сигнала ошибки компенсации $E(t)$ к 0. Особенностью АСАГ с эталонной моделью является наличие соединенной в параллель с основной системой так называемой эталонной модели, имитирующей идеальное поведение основной системы. Однако настройка регулятора последней осуществляется также в ходе адаптивного регулирования только в зависимости от аналитически вычисленного сигнала ошибки компенсации $\epsilon(t)$.

Каждая из рассмотренных систем может быть реализована в виде системы с параметрической адаптацией, системы

со структурно-функциональной адаптацией и как самообучающаяся АСАГ (см. рис. 4). В адаптивной САГ с параметрической адаптацией компенсирующее поле формируется на основе анализа текущих характеристик процесса гашения. Качество гашения достигается оптимизацией заданного критерия качества $I(t)$. Адаптивная САГ со структурно-функциональной адаптацией обеспечивает заданный уровень качества гашения путем непрерывного измерения доступных входных и выходных сигналов и корректировки структуры АСАГ. Самообучающиеся АСАГ получают информацию о неизвестных характеристиках процесса гашения и среды в ходе обучения. Данная информация в дальнейшем используется при оценивании, классификации и принятии решений для

Наименование структуры	Математическая модель	Особенности реализации
Трансверсальный FIR-фильтр	$\vec{y}(n) = \vec{H}^T(n) \vec{x}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i(n) x(n-i)$	—
Симметричный трансверсальный FIR-фильтр	$x(n) = [x(n) + x(n-N+1), x(n-1) + x(n-N+2), \dots, x(n-N/2+1) + x(n-N/2)]^T$ $y(n) = \sum_{i=0}^{N/2} h_i(n) [x(n-i) + x(n-N+1+i)]$ $h_i(n+1) = h_i(n) + \mu e(n) x(n-M+i-1)$, где $M = 2N$ — длина линии задержки	Число весовых коэффициентов в 2 раза меньше, чем в трансверсальной структуре
Решетчатый фильтр	$f_m(n) = f_{m-1}(n) - K_m(n)h_{m-1}(n-1)$, $0 < m < N$; $h_m(n) = h_{m-1}(n-1)K_m(n)f_{m-1}(n)$, $0 < m < N$; $K_m(n+1) = K_m(n) + \alpha[f_m(n)h_{m-1}(n-1) + h_m(n)f_{m-1}(n)]$, где $0 < m < M$; $f_m(n)$ представляет собой прямую ошибку предсказания, $h_m(n)$ — обратную ошибку предсказания; $K_m(n)$ — PARCOR коэффициент; m — индекс стадии; N — разрядность фильтра (число каскадных стадий); $K_m(n) < 1$. Начальные условия для $f_m(n)$ и $h_m(n)$ инициализированы как: $f_0(n) = h_0(n) = x(n)$. Корректировка сигналов осуществляется путем их умножения на PARCOR-коэффициенты	Расщепляет входной сигнал на набор прямых f_m и обратных h_m выборок разностных сигналов с задержками, добавляемыми в обратном канале [13]. Имеет модульную структуру с каскадным соединением идентичных модулей и обладает преимуществами над трансверсальным: — позволяет измерять на обратных разностных выходах автокорреляцию сигнала при последовательно возрастающих задержках для получения на выходе серии информационно зависимых ортогональных выборок сигналов, что обуславливает быструю сходимость; — имеет хорошие числовые округленные характеристики, что делает его менее чувствительным, чем трансверсальный, к ошибкам округления, причиной которых является усечение чисел при вычислениях; — масштабируемость благодаря возможности наращивания звеньев одинаковой структуры; — так как динамический диапазон $K_m(n)$ значительно меньше, чем таковой у весов $h(n)$ трансверсального фильтра, то они требуют для своего хранения меньшего числа битов, что также снижает требования к аппаратной реализации фильтра

Примечание. PARCOR — PARTIAL CORrelation.

Теперь перейдем к вопросам, связанным с реализацией адаптивных алгоритмов для подстройки весовых коэффициентов фильтров. Рассмотрим два основных типа адаптивных алгоритмов: LMS и RLS, а также их модификации применительно к задачам АГ.

2.1. Алгоритм Уидроу–Хоффа (LMS-Algorithm) и его модификации [14, 16...20, 22, 23]

Данный алгоритм предложен Б. Уидроу и Хоффом для подстройки коэффициентов адаптивной системы корректирующей электронные помехи. Точность настройки алгоритма определяется по уровню сигнала ошибки $e(n)$. Алгоритм является итерационным, и для него необходимо определять градиент квадратичной ошибки единственной выборки $\partial e^2(n)/\partial H$ [22]. Каждый коэффициент фильтра корректируется путем добавления слагаемого, содержащего взвешенную ошибку [22, 23]:

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

Как видно из данной формулы ошибка $e(n)$ одна и та же для всех коэффициентов фильтра, следовательно, коэффициенты взаимосвязаны, что обуславливает относительно низкую скорость сходимости этого алгоритма. Исследованию его свойств посвящено огромное число работ. Он относится к самым популярным алгоритмам адаптации. Основными его достоинствами являются простота и вычислительная легкость реализации. При этом сам фильтр и алгоритм его

настройки могут быть построены как на основе только аппаратных средств, так и с помощью программно-алгоритмических методов (под DSP). Большинство его недостатков связаны со свойствами сходимости, которые регулируются значением коэффициента сходимости μ . Его значение рекомендуется брать в диапазоне $0 < \mu < 1/(3N \text{Var}\{x(n)\})$ [22].

Наряду с этим достаточно трудно выбрать оптимально разрядность фильтра, которая обеспечивает приемлемый баланс между сходимостью, точностью и временем настройки. Отметим, что время сходимости LMS-алгоритма зависит и от многих других факторов [22, 23, 24]. Для обеспечения значения коэффициента сходимости μ в заданных пределах, выход за которые может вызвать неустойчивость фильтра, часто используется *нормализованный LMS-алгоритм*, который определяет значение коэффициента сходимости по

формуле $\mu = \frac{u}{\vec{x}^T(n) \vec{x}(n)}$, где u — нормализованный размер шага, выбранный между 0 и 2. Текущие значения коэффициентов h модифицируются:

$$\vec{h}(n+1) = \vec{h}(n) + \frac{ue(n)\vec{x}(n)}{r + \vec{x}^T(n)\vec{x}(n)},$$

где параметр u — новая нормализованная константа адаптации, в то время как r — положительный параметр, включенный для гарантии того, что коэффициент модификации не окажется чрезмерно большим, когда значение $\vec{x}^T(n)\vec{x}(n)$ временно становится маленьким.

Другой модификацией LMS-алгоритма является *LMS-алгоритм с забыванием*:

$$\vec{h}(n+1) = (1 - \mu r) \vec{h}(n) + \mu e(n) \vec{x}(n),$$

где константа адаптации μ и коэффициент забывания r – положительные числа.

Не последнее место занимают *упрощенные LMS-алгоритмы*. Все упрощения осуществляются путем ограничения одного или обоих сигналов, используемых при вычислении весовых коэффициентов. Это позволяет повысить эффективность аппаратно-программной реализации. При этом возможны три модификации стандартного LMS-алгоритма: *контрольный, ограничивающий (Sing Data)* и *обнуляющий (Sing Sing)* [18, 19, 22]. Этот подход обеспечивает преимущества при аппаратной реализации систем гашения в виде фильтров, однако это не дает никакой вычислительной выгоды при реализации с использованием программируемых DSP-процессоров.

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 $e(n) < 0$, для ограничивающего алгоритма по выражению $h_i(n+1) = h_i(n) + \mu e(n) \operatorname{sgn}\{x(n-i)\}$.

Обнуляющий LMS-алгоритм использует уменьшение до одного разряда чисел, представляющих информацию о знаке для обоих сигналов, задействованных при коррекции весовых коэффициентов. В этом случае выражение для их корректировки записывается следующим образом: $h_i(n+1) = h_i(n) + \mu^* \operatorname{sgn}\{e(n)\} \operatorname{sgn}\{x(n-i)\}$.

В последнее время появилось большое число работ, посвященных реализации модификаций LMS-алгоритма, ориентированных на использование в АСАГ (учитывающие некоторые особенности их реализации: волновая обратная связь и т.п.), например *filtered-x LMS-алгоритм* или *Multiple Error LMS-алгоритм* [14, 15] и др.

Исходные листинги реализации данных алгоритмов на языках высокого уровня можно получить на web-сервере МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: <http://www.bmstu.ru/iu/iu4/soft.htm>.

2.2. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов

Этот алгоритм основан на минимизации суммы квадратов выборок сигнала ошибки компенсации. Задача алгоритма состоит в нахождении значений коэффициентов фильтра, для которых данная сумма будет минимальна. Работающий по названному алгоритму фильтр является устройством предсказания по критерию наименьших квадратов для входной последовательности $x(n)$, причем сигнал ошибки компенсации $e(n)$ может быть интерпретирован как ошибка предсказания [22]. Данный алгоритм по сравнению с LMS-алгоритмом приводит к более значительным затратам на вычисления, хотя и обеспечивает более высокую сходимость. При этом LMS-алгоритм имеет только один корректируемый параметр, который воздействует на скорость сходимости – коэффициент μ , имеющий ограниченный диапазон корректировки при условии обеспечения заданной стабильности. Для достижения более быстрой скорости сходимости необходимо использовать более сложные алгоритмы, как правило, с несколькими регулируемыми параметрами. RLS-алгоритм использует метод наименьших квадратов, что позволяет непосредственно оценить корреляцию входных данных. LMS-алгоритм использует этот метод для оценивания среднестатистической ошибки, которая изменяется медленнее. RLS-алгоритм подразумевает трансверсальную реализацию FIR-фильтра. Классический RLS-алгоритм использует бесконечную память для хранения предыдущей информации, однако в наиболее эффективных его модификациях применяется процедура "забывания".

Значение коэффициента забывания располагается между 0 и 1, что обеспечивает такой вес времени во входных данных, что самые новые их отсчеты имеют более высокий вес, чем прошлые. Это позволяет адаптировать коэффициенты фильтра во времени, изменяя статистические характеристики входных данных. Модификация веса сигнала зависит от сигнала ошибки и значений вектора Калмана и находится по формуле $\vec{h}(n) = \vec{h}(n-1) + \vec{K}(n) e(n)$, где $\vec{K}(n)$ – вектор Калмана. При этом данный коэффициент мало влияет на скорость сходимости в переходном режиме в отличие от коэффициента μ в предыдущем алгоритме.

Этот алгоритм вследствие рассмотренных здесь вычислительных трудностей, связанных с его реализацией, долгое время не находил широкого применения. Однако сейчас имеется ряд публикаций, посвященных практическому использованию его быстрых модификаций [15, 22].

Кроме уже приведенных традиционных алгоритмов адаптации отметим ряд работ [8...16, 20, 21, 25], посвященных разработке новых алгоритмов адаптации в АСАГ, например: алгоритма подавления гармонических составляющих, алгоритма активной компенсации с идентификацией объекта управления, различных модификаций поисковых алгоритмов (случайного поиска, градиентного спуска, циклического покоординатного спуска и т.п.), алгоритмов на основе сеточной аппроксимации среды, алгоритмов компенсации звукового давления, максимума суммарной поглощаемой мощности, нейросетевых алгоритмов и т.п.

3. Методы и средства автоматизации проектирования САГ

Основным сдерживающим фактором при разработке АСАГ является практически полное отсутствие систем автоматизированного проектирования (САПР) их функционирования в РМВ, что заставляет разработчиков тратить колоссальные средства на экспериментальные исследования и натурные испытания по разработке и доводке активных средств защиты. В связи с тем что одна из главных особенностей построения таких систем – их жесткая привязка к конструктивно-техническим характеристикам объекта, практически не поддающимся формализации, актуально создание универсальных САПР реального времени, ориентированных на проектирование активных средств подавления влияния электромагнитных, вибрационных, акустических, виброакустических и других волновых полей. В качестве примера рассмотрим особенности построения и применения АПК автоматизированного проектирования в РМВ САГ влияния одного из самых распространенных и значимых дестабилизирующих факторов – акустического шума.

При разработке АСАГ акустических шумов приходится решать многие задачи, например правильного выбора типа реализации алгоритма (полностью аппаратная реализация или программно-аппаратная) подбора основных параметров (например, частоты дискретизации, разрядности фильтра, коэффициентов скорости и т.п.). Достаточно трудно оптимально выбрать разрядность фильтра, которая обеспечивает допустимый баланс между сходимостью, точностью и временем настройки. Также необходимо учесть влияние ВОС, возникающей в пространстве между датчиками исходного поля и компенсирующими излучателями, которая может значительно повлиять на устойчивость работы такой системы.

Все это вызвало необходимость введения в общую схему системы гашения дополнительных контуров настройки и усложнило алгоритм. Решение этих вопросов требует проведения большого количества исследований на физических и математических моделях для максимальной ориентации параметров разрабатываемой системы гашения на реальные условия эксплуатации, что приводит к значительным финансо-

вым затратам. Использование АПК позволяет выбрать с минимальными затратами тип и параметры алгоритма гашения, промоделировать эффективность гашения в близких к реальным условиям работы. Для снижения материальных затрат и сокращения сроков проектирования АСАГ акустических шумов в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан АПК автоматизированного проектирования САГ, позволяющий решить большинство из выше перечисленных задач. Получить учебную версию АПК можно на web-сервере МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу <http://www.bmstu.ru/facult/iu/iu4/soft.htm> или в Интернет разделе – "Новости с российского рынка нейрокомпьютеров" (<http://www.chat.ru/~vlasov>).

В составе этого АПК: персональный компьютер, который обрабатывает полученные в ходе моделирования данные и вырабатывает управляющие воздействия в соответствии с заложенным в его программное обеспечение алгоритмом, для регистрации экспериментальных данных используются "органы чувств", которые представляют собой набор определенных датчиков (микрофонов). Для преобразования исходной информации, регистрируемой датчиками, в понятный компьютеру вид служат, как правило, различные интерфейсные средства ввода/вывода со встроенными АЦП и ЦАП. Выработанные в ходе работы алгоритма управляющие сигналы подаются через интерфейсные средства к исполнительным устройствам (динамикам).

Основные функции по накоплению и обработке поступающей с блоков датчиков информации осуществляет прикладное программное обеспечение. Рассматриваемый АПК позволяет проводить эксперимент только с находящимися в его информационной базе алгоритмами, что является недостатком, если говорить о концепции "открытой архитектуры". Однако простота интерфейса дает возможность разработчику практически сразу приступить к реальному эксперименту. Информационная база алгоритмов обновляется от версии к версии, что делает упомянутый недостаток менее критичным. Для обеспечения совместимости с различными интерфейсными системами ввода/вывода производства как отечественных, так и зарубежных фирм разработано несколько различных версий АПК. Программное обеспечение АПК позволяет пользователю осуществлять работу в двух режимах:

отработки алгоритмов гашения на основе анализа реальных сигналов с БДИП, БКИ через интерфейсную плату;

теоретической отработки алгоритмов гашения с использованием программно заданных сигналов (при этом наличие интерфейсной платы не требуется).

При загрузке происходит автоматическое тестирование на обнаружение интерфейсной платы в компьютере и выводится сообщение о доступных для пользователя режимах. Имеющаяся в системе интерактивная система графического отображения результатов выводит информацию в двух режимах: анализа реальных сигналов; построения диаграмм эффективности, при котором отображаются текущие изменения коэффициента сходимости процесса адаптивной настройки и коэффициентов фильтра.

Используя возможности изменения параметров алгоритма гашения, пользователь по получаемым результатам может корректировать эффективность гашения, выбирая тем самым оптимальные характеристики будущей системы, ориентированной на реальные условия работы.

Рассмотренная версия АПК рассчитана непосредственно на проектирование САГ акустических полей, однако ведутся также проработки по созданию версий АПК САПР САГ, предназначенных для проектирования САГ вибрационных и электромагнитных полей.

Кроме рассмотренного АПК на рынке систем обработки сигналов имеются комплексы ориентированных на анализ сигналов различной природы. В первую очередь необходимо отметить программное обеспечение фирмы "Мера" (Россия),

поставляемое, как правило, с аппаратным обеспечением фирмы L-Card (Россия, <http://www.lcard.ru>), программно-аппаратные комплексы фирмы "Информационные Системы" (Россия) и средства обработки сигналов АО "КАСКОД" и др.

Программное обеспечение фирмы "Мера" представляет собой пакет обработки сигналов для мониторинга (ПОС-М) [26]. Этот пакет содержит программный режим пользователя, который позволяет ему реализовать свои алгоритмы и протоколы обработки на языке Паскаль, а также создавать собственные виртуальные приборы. Используя АПК для моделирования САГ и системы спектрального и взаимно-спектрального анализов фирм "Мера" и L-Card, разработчик САГ получает возможность проводить весь комплекс исследования вибрационных и акустических полей с помощью анализа сигналов от регистрирующих датчиков на одной ПЭВМ, которая полностью заменит широкий спектр различных измерительных приборов.

Кроме рассмотренных вариантов при разработке САГ можно воспользоваться более универсальными программными продуктами LabVIEW[®] или LabWindows[®] (National Instruments[™], США), оснатив свою рабочую станцию соответствующим АЦП/ЦАП (с платами ввода/вывода фирм L-Card и "Информационные системы" поставляется набор виртуальных инструментов для программирования в графической среде LabVIEW[®] или LabWindows[®]). Программная система LabVIEW[®] в отличие от LabWindows[®], где программирование осуществляется на языке Си, представляет собой среду графического программирования с помощью графических "виртуальных" инструментов, которая позволяет разработчику создавать собственные программы обработки сигналов с высококачественным графическим интерфейсом за короткое время. Достоинством данного варианта является открытость системы для расширения и исследования собственных алгоритмов. Как и любая универсальная система, она обладает большими графическо-математическими возможностями, имеет встроенные модели рекурсивных и других фильтров, а также модели систем на основе сигнальных (DSP) процессоров и многие другие "приятные мелочи". Однако при работе с ней разработчикам САГ придется самим разработать программно-алгоритмическую базу алгоритмов АГ, что потребует определенных знаний в области программно-аппаратного обеспечения и увеличит время разработки, однако с накоплением большой базы моделей для САГ шума различной природы, вложения в данную систему автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования без сомнения себя окупят.

4. Особенности построения АСАГ влияния акустических шумов при эксплуатации электронной аппаратуры

На эффективность применения САГ налагается целый ряд физических ограничений, которые никогда не смогут быть преодолены. Так, для пространственного гашения САГ можно применить, если разделение между первичными и вторичными источниками того же самого порядка, как и длина волны, поэтому эффективность использования САГ растет с ростом длины волны подавляемых полей. Основные области применения средств активной защиты приведены на рис. 7. С развитием информационных технологий получили широкое распространение электронные средства обработки информации и системы обеспечения их функционирования, которые вносят немалую лепту в общую картину шумовой нагрузки на систему человек-машина. Наибольшее влияние на акустический климат помещения оказывают шумы матричных принтеров [11], систем кондиционирования и вентиляции, разнообразной оргтехники, систем воздушного охлаждения высокопроизводительных вычислительных комплексов и источников бесперебойного питания (UPS) [10, 11, 14, 21].

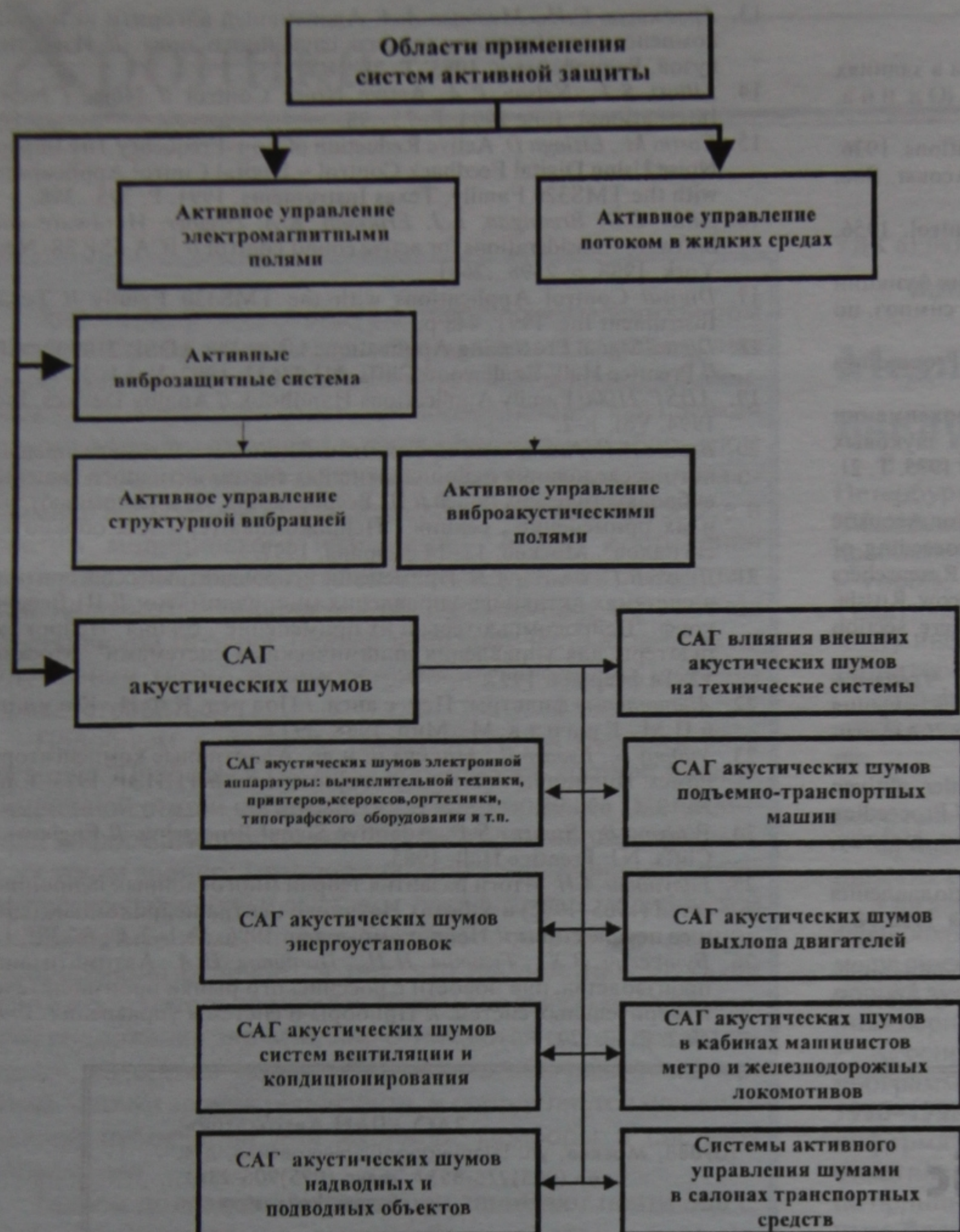


Рис. 7. Основные области применения систем активной защиты

Особая актуальность борьбы с акустическими шумами электронного офисного оборудования обусловлена тем, что оно находится непосредственно на рабочем месте или в рабочем помещении в прямом контакте с человеком—оператором. Высокие требования, предъявляемые к высоконадежным электронным системам по быстрой доступности блоков электронной аппаратуры для замены и ремонта, делает малоэффективным применение классических пассивных средств защиты от шума. К тому же использование специальных глушителей шума в системах охлаждения высокопроизводительных вычислительных комплексов и UPS вносит дополнительное аэродинамическое сопротивление в канал охлаждения, что уменьшает срок службы термочувствительных элементов электронной аппаратуры и UPS и может вывести систему из строя [12].

Наметившаяся на сегодня тенденция "GREEN PC" налагает повышенные требования не только на уровень электромагнитного излучения электронной аппаратуры, потребляемую мощность, но и на уровень излучаемых ею акустических шумов. Рассмотрим в качестве примера особенности построения и результаты применения АСАГ для подавления низкочастотных составляющих шума двигательных источников бесперебойного питания. Из анализа спектра шума выпуска двигательной системы обеспечения бесперебойного электропитания видно, что применение пассивных глушителей позволяет снизить уровень шума в высокочастотной области на 10...20 дБ, однако в низкочастотной области

его эффективность низка. Для достижения эффективности в 20 дБ на низких частотах пришлось бы использовать пассивные глушители гигантских размеров, поэтому наиболее правильным на сегодня является подход совместного использования активных и пассивных средств подавления шума в низко- и высокочастотных диапазонах. Лишь в этом случае можно добиться необходимого результата с наименьшими затратами.

Кроме непосредственно систем охлаждения вычислительных комплексов, а также источников бесперебойного питания на общий акустический климат рабочего помещения, как было отмечено, могут влиять шумы матричных принтеров, пишущих машинок, переплетных устройств, счетчиков банкнот, кассовых аппаратов и другой техники. Для решения вопроса об использовании САГ в этой электронной аппаратуре необходимы достаточно подробные предпроектные исследования. Наибольший эффект по критерию качество/стоимость при применении САГ удастся получить в случае подавления акустических шумов низкочастотного спектра. Основная энергия большинства источников шума электронной аппаратуры сконцентрирована в диапазоне 0...500 Гц, что позволяет использовать системы активного гашения достаточно эффективно. С расширением спектра шума в высокочастотную область происходит практически экспоненциальный рост затрат на вычисления и аппаратную реализацию системы управления, что делает применение САГ при этом менее эффективным.

Несмотря на то что разработка и применение САГ в электронной аппаратуре неизменно ведут к увеличению ее себестоимости, последние тенденции дальнейшего совершенствования микропроцессорной элементной базы, удешевления сигнальных процессоров и применения новых адаптивных алгоритмов,

например на основе сеточной аппроксимации среды [10], или нейроадаптивных алгоритмов [20, 21] позволят использовать данные системы не только в относительно дорогостоящих и высококачественных электронных офисных системах, но и в более доступной электронной аппаратуре, ориентированной на личное использование.

Выводы

Рассмотрев некоторые особенности теории и практики построения САГ, можно сделать выводы об актуальности их применения решения целого круга задач по компенсации волновых полей с доминирующим влиянием составляющих, имеющих относительно большую длину волны, а также о необходимости дальнейшего изучения теоретических вопросов, связанных с построением многоканальных пространственных САГ и их аппаратно-программной реализацией на основе сигнальных процессоров или нейросетевого логического базиса. Таким образом, перед разработчиками возникает широкий круг задач, решению которых будут посвящены большинство последующих работ.

Контактный телефон (095) 263-65-53.

E-mail: vlasov@chat.ru

<http://www.bmstu.ru/facult/iu/iu4/activ.htm>,

<http://www.deol.ru/users/vlasov/activ.htm>,

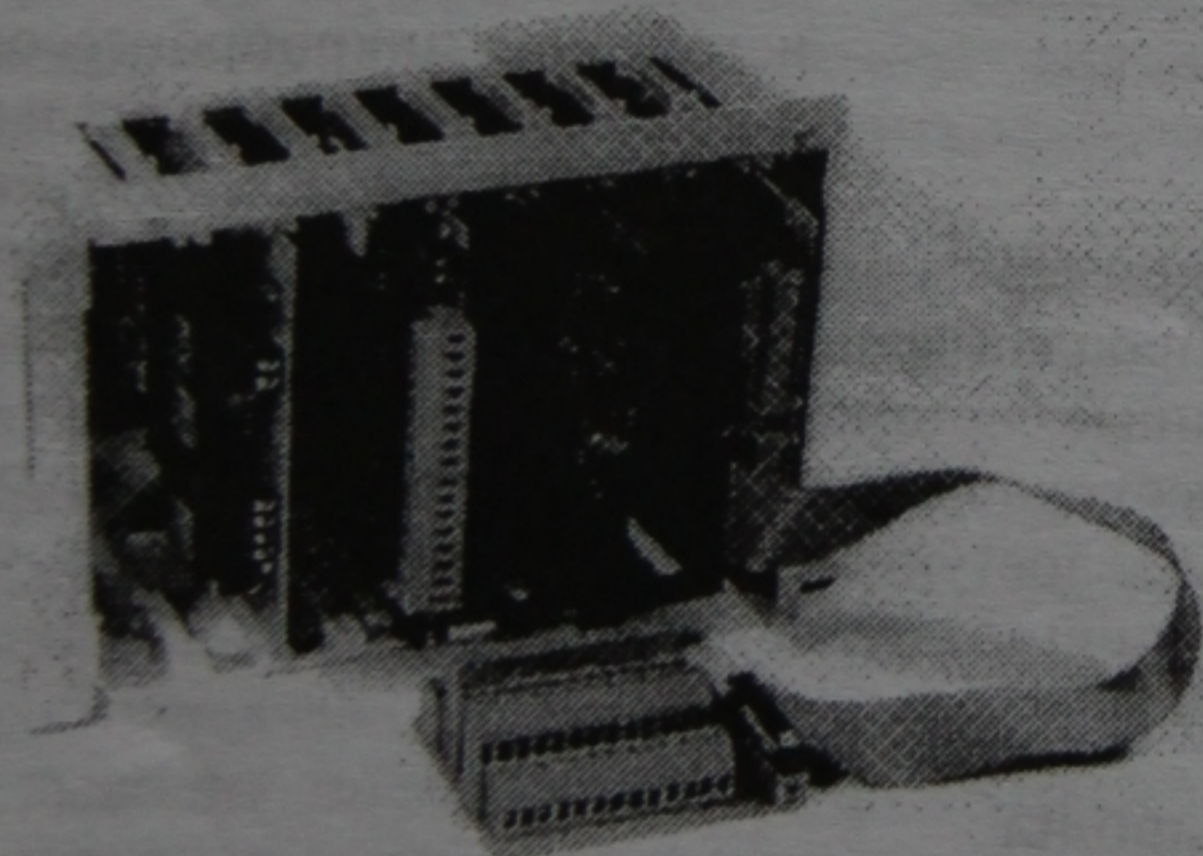
<http://www.chat.ru/~vlasov>

Список литературы

1. Орлов Г.Л., Юдин Е.Я., Хюбнер Г. и др. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. О с и п о в а, Е.Я. Ю д и н а. М.: Стройиздат, 1987. – 558 с.
2. Патент 2043416 США. Process of silencing sound oscillations. 1936.
3. Olson H., May E.G. Electronic sound absorber // J. Acoust. Soc. America. 1953. Vol. 25. № 6. P. 1130.
4. Conover W.B. Fighting noise with noise // Noise Control, 1956. P. 78...82.
5. Малюжинец Г.Д. Об одной теореме для аналитических функций и ее обобщение для волновых потенциалов. // III Всес. симпоз. по дифракции волн – М.: Наука, 1964.
6. Jexel M.J.M. Sur les absorbeus actifs. Paper F-5-6, 82 // Proceedings 6th International Congress on Acoustics. Tokyo, 1968.
7. Завадская М.П., Попов А.В., Энгельский Б.Л. Об аппроксимации волновых потенциалов в задачах активного гашения звуковых полей по методу Малюжинца // Акустический журнал. 1975. Т. 21. № 5. С. 732...738.
8. 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 system.
9. 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.
10. Shakhnov V.A., Vlasov A.I. Das Realisierungskonzept der aktiven Unterdrückung der Akustiklärme der Electronengerate. // Proceeding of 15th International Congress on Acoustics. Trondheim, Norway, 26–30 June, 1995.
11. Власов А.И. Применение адаптивной системы для подавления акустических шумов матричных принтеров // Конверсия. 1996. № 1. С. 17...19.
12. Власов А.И. Принципы активного подавления действия вибрационных полей на электронную аппаратуру // Приборы и системы управления. 1996. № 11. С. 30...32.

13. Арзамасов С.И., Мальцев А.А. Адаптивный алгоритм активной компенсации широкополосного случайного поля. // Известия вузов, Радиофизика. 1985. Т. 28. № 8.
14. Elliott S.J., Nelson P.A. Active Noise Control // Noise / News International. June 1994. P. 75...98.
15. Costin M., Elzinga D. Active Reduction of Low-Frequency Tire Impact Noise Using Digital Feedback Control – Digital Control Applications with the TMS320 Family, Texas Instruments. 1991. P. 395...398.
16. Allie, C.D., Bremigan, L.J., Eriksson, R.A., Greiner. Hardware and Software Considerations for active sound control // ICA SSP 88, New York, 1988, p. 2598...2601.
17. Digital Control Applications with the TMS320 Family // Texas Instrument Inc. 1991. 448 p.
18. Digital Signal Processing Applications Using the ADSP-2100 Family // Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1992. Vol.1, 2.
19. ADSP-21000 Family Applications Handbook // Analog Devices, Inc. 1994. Vol. 1–2.
20. Власов А.И. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного исследования нейроробастивных систем активного гашения виброакустических полей // III Всерос. конф. "Нейрокомпьютеры и их применение", секция: "Нейрокомпьютеры для обработки сигналов". Москва. 12–14 февраля, 1997.
21. Дудко В.Г., Власов А.И. Применения микроклиматом // III Всерос. конф. "Нейрокомпьютеры и их применение", секция "Нейрокомпьютеры для управления динамическими системами". Москва. 12–14 февраля, 1997.
22. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гр ан т а. М.: Мир. 1988. 392 с.
23. Уидроу Б., Гловер Д., Маккул Д. и др. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения // ТИИЭР. 1975. Т. 63. № 12. С. 69...98.
24. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive Signal Processing. // Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
25. Галушкин А.И. Итоги развития теории многослойных нейронных сетей (1965–1995) в работах Научного центра нейрокомпьютеров и ее перспективы // Нейрокомпьютер. 1996. № 1–2. С. 5...38.
26. Буткевич В.Х., Туляков Н.Н., Потапов И.А. Автоматизация производства, или новости с российского рынка производителей измерительных систем. // Приборы и системы управления. 1996. № 2. С.19...22.

LAN Automatic



ЗАО «ЛАН Автоматик»,
109088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д.4,
тел.(095)275-8537, факс (095)905-2391,
E-mail: keksas@orc.ru

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ В СТАНДАРТЕ MICRO

Микроконтроллеры	от 170\$
Терминальные платы	от 126\$
Источники питания	от 141\$
Модули УСО	от 106\$

**Клеммные платы, Корпуса, Кабели
Программное обеспечение**

Предлагаемые средства позволят в **1,5÷2** раза **уменьшить стоимость** и избыточность оборудования при разработке АСУ. Использование разработок фирмы "ЛАН Автоматик" в сочетании с оборудованием OCTAGON System, ADVANTECH, GRAYHILL, SCHROFF, BOPLA, GEBE, WAGO позволит **оптимизировать** решение стоящих перед Вами задач.

Помимо предлагаемого базового набора фирма "ЛАН Автоматик" в кратчайшие сроки (от 4 недель) разработает и изготовит нестандартное оборудование "под заказчика".

Надежность нашего оборудования обеспечивается применением **только импортной** элементной базы.

Мы работаем на рынке автоматизированных систем управления с 1991 года. Потребителями нашей продукции являются **более 30 организаций** из 15 городов России и ближнего зарубежья.

Приглашаем к сотрудничеству дилеров (скидки - до 20%), системных интеграторов, а также все организации, работающие в области промышленной автоматизации.

Гарантия на все поставляемое оборудование - 2 года.

Консультационная поддержка - на все время эксплуатации.

МЫ - ПРОИЗВОДИТЕЛИ. С НАМИ ВЫГОДНО ИМЕТЬ ДЕЛО !