



Издается с 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Корчак В.Ю.</i> К 60-летию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН	4
Статьи	
<i>Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И.</i> Компьютерные технологии корабельной гидромеханики: состояние и перспективы	8
<i>Родионов А.А., Хантулева Т.А.</i> Нелокальная гидродинамика и ее приложения	22
<i>Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.</i> Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: современные технологии и перспективы	37
<i>Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.</i> Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетецентрических войн	49
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С., Чулков В.Л.</i> Апертурный синтез гидроакустических антенн – основа мобильных гидроакустических систем наблюдения	65
<i>Тарасов С.П., Воронин В.А.</i> Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска	78
<i>Белогубцев Е.С., Кирюхин А.В., Кузнецов Г.Н., Михайлов С.Г., Пудовкин А.А., Смагин Д.А., Федоров В.А.</i> Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде	93
<i>Иванов М.П., Степанов Б.Г.</i> Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога	108
<i>Стародубцев Ю.Д., Надолишняя А.П.</i> История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения	123
Перспективные направления развития науки и техники	
<i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i> Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ	129
Конференции	135
Поздравляем!	138
Хроника	140
Правила представления материалов в редакцию.....	142

CONTENTS

<i>Korchak V.Yu.</i> To the 60-th Anniversary of Section of Applied Problems at Presidium of RAS	4
--	---

Articles

<i>Guriev U.V., Tkachenko I.V., Ykushenko E.I.</i> Computer Technologies in Marine Hydrodynamics: State-of-the-Art and Perspectives	8
---	---

The basic stages and perspective directions of marine hydrodynamics development are considered. Efficiency of computer technologies in hydrodynamic and engineering analysis is demonstrated. Necessity of their wider use in shipbuilding is substantiated.

Key words: computer-aided technologies, marine hydromechanics, mathematical and physical experiments, multidisciplinary modeling.

<i>Rodionov A.A., Khantuleva T.A.</i> Nonlocal Hydrodynamics and Its Applications	22
---	----

Modern problems of science and engineering lead outside the scope of continuum mechanics. In order to solve the problems a new nonlocal hydrodynamics of nonequilibrium processes had been developed on the base of statistical mechanics using methods of nonlinear operator sets and adaptive control. The allowance for self-organization and selfregulation provides the mathematical model to be completed and results discrete structure spectra and structure transitions in a system. Application of the new approach to problems of flow and wave propagation in condensed media allows the description of the observed effects that have no explanation in the framework of the classical hydrodynamics.

Key words: nonequilibrium process, nonlocality, memory, selforganization, structure, multi-scaling, control..

<i>Kuzmitsky M., Gizitdinova M.</i> Mobile Underwater Robots for the Navy Tasks: Modern Technologies and Prospects	37
--	----

In the article the state-of-the-art review of prospects of mobile underwater robots using for solving some naval problems is resulted: MCM, surveys, ports, harbors and sea borders protection, targeting and underwater surveillance. Possible technologies of the specified problems solving using mobile underwater robotics are considered.

Key words: mobile underwater robot, technical shape, mission, energy source, carriers, problems, technologies.

<i>Kovalenko V.V., Korchak V.J., Chulkov V.L.</i> Concepts and Key Technologies of Underwater Surveillance Systems in Networked Centric Warfare	49
---	----

This paper presents the concept of creation and main features of integrated networked underwater surveillance systems. Several key aspects of such systems variants creation and their features are discussed.

Key words: net-centric warfare; integrated networked underwater surveillance system; sensor networks; distributed network system.

<i>Dashevsky O.Yu., Nejevenko E.S., Chulkov V.L.</i> Sonar Array Aperture Synthesis as a Foundation for Mobile Surveillance Sonar Systems	65
---	----

The paper analyzes the most effective aperture synthesis methods in hydroacoustics. A synthesis method for wide-band signals is suggested. A SynApp program developed for comparative analysis of different methods is described. The results of an experimental study with test signals (generated by the program) and real signals (obtained from a real towed array) are presented. Aperture synthesis availability in hydroacoustics is concluded.

Key words: hydroacoustics, synthetic aperture, flexible underwater towed array, wide-band acoustic signals, real signals.

<i>Tarasov S.P., Voronin V.A.</i> Prospects of Application of Nonlinear Acoustics Methods in Hydroacoustic Search Technologies	78
--	----

In the report the results of theoretical and experimental researches of the nonlinear phenomena in acoustics are discussed. It is shown, that using of these phenomena allows to create sonar devices and integrated systems for underwater and buried objects search, underwater surveillance, mineral and biological resources exploration, ocean environment monitoring. Characteristics of parametrical devices are discussed and results of their applications for solving various problems of hydroacoustics are considered. Ways of sonar means perfection and

principles of their construction using methods of nonlinear acoustics are discussed.

Key words: nonlinear phenomena, nonlinear interaction, parametrical arrays, beam pattern.

Belogubtsev E.S., Kirukhin A.V., Kuznetsov G.N., Mikhailov S.G., Pudovkin A.A., Smagin D.A., Fedorov V.A. Testing of Low Frequency Water and Air Sound Active Cancellation Techniques: Problems and Preliminary Results 93

Active control of low frequency sound vibration is considered. The necessity of solving this problem by active means in consequence of low cancellation effectiveness of passive techniques and means for signals on low frequencies is concluded. The algorithms and techniques development results are discussed for active cancellation of sound signals in water and air medium. The importance of solving this problem to ensure sea objects stealth and maintenance staff environmental safety is concluded. The real opportunity to cancel low frequency discreet components on not less then 8–15 dB and to reduce wide band level on not less then 6...8 dB is demonstrated. It is denoted that discreet frequency components cancellation both increase objects latency hiding and falsify objects classification characteristics.

Key words: Object ADT (armament and defense technology), Active cancelling of inner and outer noises, perceptibility decrease, environmental safety support, discreet receiving and radiating elements, falsification of classification characteristics, designer alternative.

Ivanov M.P., Stepanov B.G. Study of the Dolphin Acoustic Biosonar and Feasibility of Constructing Its Technical Analogue 108

Presented below are the results of experimental studies of the biosensor system of dolphins using acoustic channel for search and identification of underwater objects as well as for orientation in three dimensional space and underwater communications between individuals. The dolphin's (*Tursiops truncatus*) sonar functioning in complicated conditions of acoustic noise of the dolphin sonar is analyzed. It is shown that the basic mechanisms that provide noise immunity of the dolphin sonar are: the radiation of broadband pulses with zero carrier, use of burst (accumulation), burst rate variable repetition (time selection), and burst with interval-time coding. Possible ways of constructing of broadband underwater transducers and arrays capable to radiate acoustic signals similar to echolocation impulses of cetaceans are considered. Analyzed in the paper is functioning of two electrically operated models of broadband transducers: rod with phased excitation of sections and waveguide type transducer in the form of a coaxial set of piezoactive rings. Some results of solving synthesis and analysis problems for the above models of transducers are presented. It is shown that these transducers provide bandwidth, respectively, 1.5–2 octaves and 2–3 octaves and more.

Key words: echolocation signals, the analysis and synthesis of broadband signals, noise immunity, broadband signal, signal without carrier, wideband underwater transducer.

Starodubtsev Yu.D., Nadolishnyaya A.P. History, State-of-the-Art and Perspectives of the Cetaceans Use as a Part of Biotechnical Dual-Purpose Systems 123

Here we present the history of using marine mammals (MM) as humans' assistants, the place and time of the Soviet Navy Aquarium creation, the main tasks of Lomonosov Moscow State University (MSU) involved into the research of dolphins' abilities. We describe the biotechnical system for the underwater search (UwS) creation by MSU, about the active work of the USA on using MM. It is shown that the effectiveness and the economy of UwS using MM is much higher than using divers and technical means. The forecast of biotechnical systems development perspectives is given, and the necessity of creation of the Federal base for working with MM in Russia is pointed out.

Key words: marine mammals, aquarium, oceanarium, office use, biotechnical systems, underwater search, echolocation, training animals, cognitive activities of animals.

Perspective Tendency of Development of Science and Technics

Arsentiev V.G., Krivolapov G.I. Some Results of Undersea Networks Technologies Realization in SibSUTIS 129

This article represents some results, achieved in Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS) in research of networks for underwater monitoring. Also, this article reports development and small series manufacturing of the range of unified underwater communication, control and navigation modules. These modules are needed for work in the near-field zone. Now they are used in the University experimental researches in the field of underwater networks technologies. These modules can be used as basis for solution of wide class of underwater researching and manufacturing problems.

Key words: underwater network technologies, underwater communication, control, navigation.

УДК 534.014

© *Е.С. Белогубцев*¹, *А.В. Кирюхин*², *Г.Н. Кузнецов*¹, *С.Г. Михайлов*¹, *А.А. Пудовкин*¹,
*Д.А. Смагин*³, *В.А. Федоров*², 2011

¹Научный центр волновых исследований Учреждения Российской академии наук Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

²ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», г. Калуга

³ГНЦ РФ ФГУП «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», г. Москва
skbmortex@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В ВОДНОЙ И ВОЗДУШНОЙ СРЕДАХ

Рассмотрена проблема активного гашения низкочастотных звуковых колебаний. Отмечается необходимость решения в связи с низкой эффективностью пассивных методов и средств. Обсуждаются результаты разработки алгоритмов и технических средств для активного подавления звуковых сигналов в водной и воздушной средах. Отмечается важность обеспечения скрытности объектов и экологической безопасности обслуживающего персонала. Показана реальная возможность подавления низкочастотных дискретных составляющих на величину не менее 8–15 дБ и снижения уровня в широкой полосе частот не менее 6–8 дБ. Подавление уровней дискретных составляющих одновременно искажает классификационные признаки объектов.

Ключевые слова: объекты ВВТ, активное гашение внутренних и внешних шумов, снижение заметности, обеспечение экологической безопасности, дискретные приемные и излучающие элементы, искажение классификационных признаков, варианты построения.

В соответствии с разработанной в США стратегической концепцией «Действие с моря против берега» («Forward ... From the Sea») ВМС должны решать задачу обнаружения, целеуказания и уничтожения подводных лодок (ПЛ) вероятного противника в зоне их развертывания до нанесения ответного удара [1]. Для этого планируется проводить действия ПЛ ВМС в морских районах, специально оборудованных системой пространственно разнесенных, скрытно установленных мобильных или стационарных гидроакустических средств подводного наблюдения. Эти средства, образуя протяженные рубежи или площадные зоны, решают автономно задачи подводного наблюдения и передают информацию о принятом решении, например по гидроакустическому каналу.

Учитывая снижение шумности ПЛ во всех странах, США и страны НАТО создают быстро развертываемые активно-пассивные средства, работающие в диапазоне частот в сотни герц. Одновременно в США приняты на вооружение низкочастотные активно-пассивные корабельные средства обнаружения и проводятся широкомасштабные исследования стационарных систем низкочастотной гидролокации. Достаточно перечислить низкочастотные ГАК типа SOSUS, SURTASS-LFA, LFAS, MSS, ADS, чтобы оценить масштаб финансирования и разработок [2]. Как правило, стандартные противогидролокационные покрытия снижают заметность на высоких частотах, а на частотах ниже 1–2 кГц их эффективность падает.

Для еще большего увеличения скрытности своих объектов в США и странах НАТО применяются новейшие высокоэффективные активные средства гашения первичных и вторичных гидроакустических полей. Установленные на борту атомных или дизельных

ПЛ управляемые покровные антенны, образованные «интеллектуальными сонопанелями», обеспечивают [3, 4]:

- уменьшение заметности по первичным полям путем активного гашения собственных шумов, прежде всего – «стиранием» классификационных признаков (сигнатур);
- подавление отраженных от корпуса ПЛ эхосигналов и обеспечение скрытности ПЛ к средствам гидролокации с использованием методов и средств активного гашения;
- активное подавление ходовых и вибрационных помех, повышение эффективности дальнего гидроакустического наблюдения и обнаружения в пассивном и активном режиме с использованием вынесенных за прочный корпус бортовых гидроакустических антенн.

Иными словами, в США уже создается и испытывается технология «СТЕЛС» для подводных лодок с целью повышения боевой устойчивости и создания подавляющего превосходства ПЛ ВМС как в дуэльной ситуации, так и при их взаимодействии с разнесенными в пространстве автономными, стационарными и корабельными средствами гидроакустического обнаружения и целеуказания. Основой «СТЕЛС»-технологии является система активного гашения (САГ), обеспечивающая подавление внешних и внутренних шумовых полей, а также гашение отраженных сигналов и собственных помех [5].

САГ выполняет активное поглощение (компенсацию) излучаемого или отраженного поля на низких и средних частотах. Пассивные средства решают эти же задачи на средних и высоких частотах. Высказывается мнение [3], что частоты 1–3кГц разделяют зоны ответственности активных и пассивных средств.

В России работы, направленные на создание активных покрытий, разработку и внедрение «интеллектуальных сонопанелей», не производятся. В то время как только в США существует шесть известных, рекламирующих свою продукцию фирм, которые наладили производство и выпуск гасящих звуковые сигналы «сонопанелей» или «интеллектуальных покрытий» [5, 6]. Имеются публикации, свидетельствующие о разработке методов и технических средств активного гашения во Франции, Германии и Китае.

Для российских морских объектов (МО) перечисленные направления работ также являются актуальными, поскольку увеличение мощности двигательных комплексов и насыщенность механизмами, техническими средствами приводят к уменьшению скрытности по внешним шумовым полям и одновременно (из-за мощных шумов и вибраций) внутри объектов ВМФ ухудшается экологическая обстановка. Невыполнение санитарно-гигиенических норм по шумам и вибрациям понижает работоспособность и боевую устойчивость личного состава и обслуживающего персонала.

Широкомасштабное применение активных методов и проектирование отечественных МО с установкой «интеллектуальных покрытий» большой площади на внешней оболочке корпуса, вероятно, в настоящее время невозможны, так как отсутствуют отечественные конструкции «сонопанелей». Не отработаны на макетах и опытных образцах пути создания и функционирования активно-пассивных покрытий. Для коренной перестройки технологии акустического проектирования корпуса с размещением активных покрытий, для создания элементной базы («сонопанелей») требуется значительное финансирование, выделение которых в настоящее время маловероятно.

Однако уже сейчас в России разработаны научно-технические предпосылки и технические решения, которые позволяют приступить к созданию «локальных» САГ, обеспечивающих уменьшение шумности МО путем подавления отдельных составляющих интегрального шумоизлучения. Например, необходимы и возможны активное гашение вибраций и низкочастотных пульсаций давления в тракте ГЦТ, подавление воздушной компоненты шумов, образованных внутри корпуса основными и вспомогательными механизмами, гашение шума в воздуховодах. Решение этих задач требует умеренного финансирования и может быть выполнено в реальные сроки с применением выпускаемых

отечественной промышленностью дискретных акустических элементов, использование которых должно обеспечить снижение шумов, особенно узкополосных составляющих (сигнатур), на величину не менее 10–12 дБ. В России выполнены серьезные теоретические разработки, которые могут быть использованы при создании САГ [7–12].

Анализ показывает, что особенно мощные шумы и вибрации возникают в низкой звуковой и инфразвуковой области частот. Традиционно применяемые для шумопоглощения и снижения вибраций пассивные средства – шумопоглощающие покрытия, экраны и перегородки, пассивные резонаторы – на низких частотах недостаточно эффективны или требуют нереально больших весогабаритных характеристик. В этих условиях не существует альтернативы применению новых – инновационных – технологий, использующих активное гашение. В развитие этого направления за последние 10 лет в НЦВИ ИОФ РАН выполнена серия НИОКР и получены положительные экспериментальные результаты по подавлению внешних и внутренних шумов активными методами.

Целью выполненных исследований и разработок является совместное применение активных и пассивных методов, а также средств ослабления первичных и вторичных полей МО. Уменьшение внутренних шумов улучшит условия работы и повысит боевую устойчивость личного состава. Стирание классификационных признаков обеспечит маскировку особо важных объектов и понизит вероятность их правильной классификации.

Рассмотрим некоторые из технических решений, в рамках которых разработаны алгоритмы, программное обеспечение (ПО), многоканальная аналогово-цифровая аппаратура, акустические приемные и излучающие элементы. Рабочие алгоритмы используют деструктивную интерференцию, управление импедансами гасящих преобразователей, поглощение энергии звука в электрических цепях усилителей мощности и пассивные экраны.

Для достижения поставленной задачи выполнены сборка и настройка макетов, включающие в качестве одного из важнейших этапов идентификацию моделей управляемого шума. Разработаны алгоритмы и ПО, проведены испытания САГ и установлена экспериментально реальная возможность существенного подавления низкочастотных шумов.

Применение активного гашения шумовых полей для создания «зоны тишины» в зашумленном корабельном отсеке. Для отработки методики, алгоритмов и ПО создания «зоны тишины» в зашумленном корабельном помещении был разработан макет системы активного гашения (САГ) шума с восемью связанными приемно-излучающими каналами управления. Под «зоной тишины» будем понимать ограниченную область пространства в плоскости, в которой оператор должен выполнять необходимые действия. Минимальный размер зоны около 1–2 м.

Цель эксперимента – повышение экологической безопасности и выполнение санитарно-гигиенических норм для обеспечения длительной и эффективной работы оператора в зашумленном помещении. Эксперименты проведены в гулком лабораторном помещении, в одном из углов которого установлен мощный первичный излучатель, а на расстоянии трех метров от излучателя – макет для создания «зоны тишины». Блок-схема макета и конфигурация расположения первичного излучателя, контрольных приемников и гасящих излучателей показаны на рис. 1. Круговая конфигурация выбрана как наиболее простая с точки зрения реализации алгоритма активного гашения. Расстояние между приемником и вторичным излучателем равно 0.25 м, радиус кольца приемников – около 1 м. Фотографии макета представлены на рис. 2.

Рабочую частоту сигнала первичного источника выбираем так, чтобы на этой частоте в зоне предполагаемого гашения в заданном помещении наблюдалась пучность звукового давления, т.е. – концентрация звуковой энергии из-за интерференции. Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность в зоне формируется на частоте

те 122 Гц, которая и была выбрана в качестве рабочей. Количество вторичных излучателей и контрольных приемников оказалось недостаточным для реализации алгоритма деструктивной интерференции. Кроме того, акустические элементы из-за их малого количества расположены не в объеме, а на плоскости. Это приводит к необходимости использовать дополнительные способы, в частности располагать излучатели на значительном удалении от контрольных микрофонов, чтобы достигнуть эффекта гашения не только в точках установки микрофонов, но и в заданной «зоне тишины». Такая геометрия приводит к взаимному перекрестному влиянию излучателей на соседние приемники, что в конечном итоге вынуждает сузить рабочую полосу частот САГ и ограничить величину гашения.

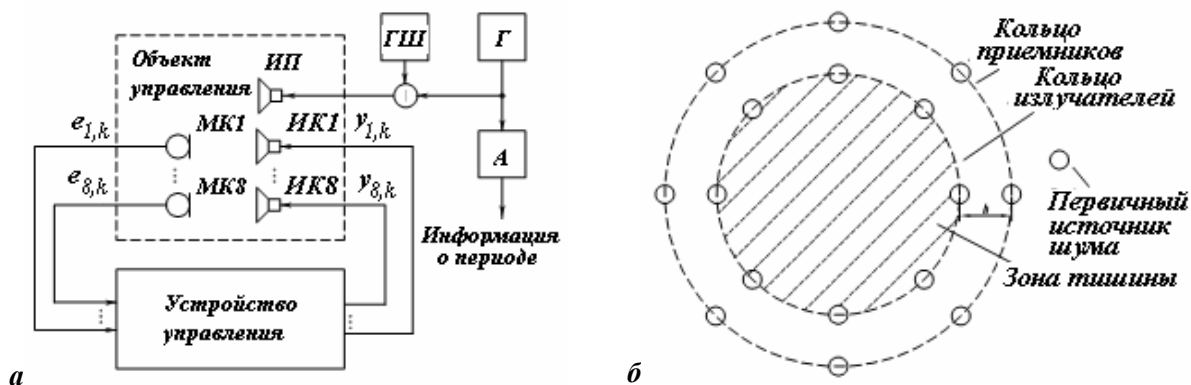


Рис. 1. Блок-схема макета (а), схема расположения излучателей и приемников (б).

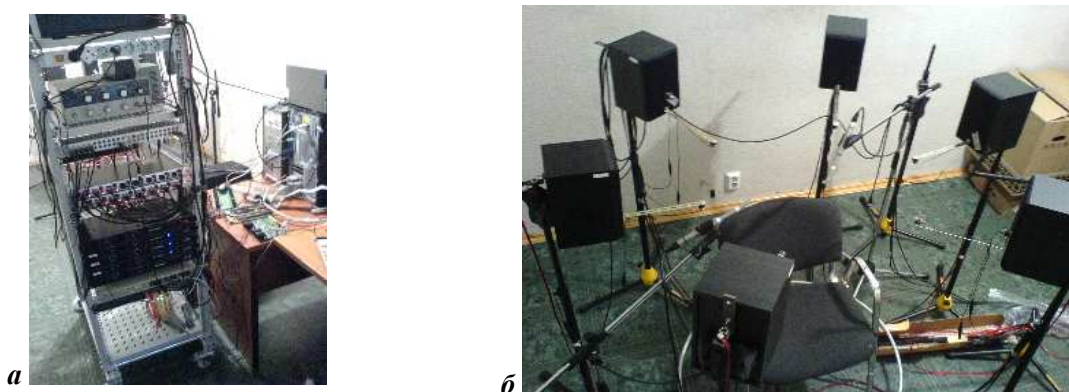


Рис. 2. Стойки с разработанными приборами (а) и комплекта смонтированных электроакустических преобразователей (б).

При выполнении экспериментов излучатель первичный **ИП** возбуждается полигармоническим генератором **Г** и генератором **ГШ**, который добавляет в спектр полигармонического сигнала широкополосную помеху в виде розового шума. Микрофоны контрольные **МК1–МК8** образуют кольцо приемников. Излучатели, компенсирующие **ИК1–ИК8**, образуют кольцо вторичных излучателей. Микрофон измерительный **МИ1** может устанавливаться в любой точке помещения и используется для контроля эффективности гашения, т.е. сравнения уровня звукового поля до и после гашения.

Структура САГ показана на рис. 3. Отметим, что сигналы ошибок \vec{e} , сигналы управления \vec{y} и сигналы возмущения \vec{F} являются векторами размерности N (N – параметр, определяющий размерность системы). Оператор P представляет собой дискретную модель объекта управления, оператор W – модель регулятора. Сигнал возбуждения пер-

вичного источника \vec{N}_1 и сигнал помехи \vec{N}_2 – некоррелированные случайные процессы с равномерным спектром. В задачу САГ входит слежение за сигналами \vec{F} первичного поля в точках установки микрофонов контрольных (МК) с целью минимизации суммарной среднеквадратической ошибки $\sum_i M\{e_i(t)^2\}$ по всем каналам управления. Устройство

управления САГ работает в двух режимах: настройки и компенсации (рис. 3). Перед началом гашения в режиме настройки выполняется идентификация модели объекта управления. Это позволяет выполнить прогноз акустических характеристик передаточных функций.

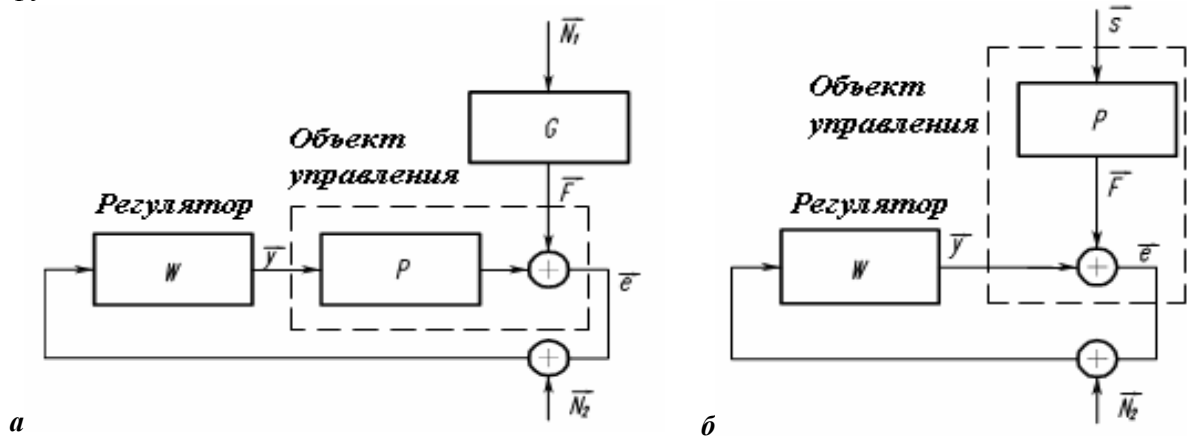


Рис. 3. Структура алгоритма САГ (а) и схема его настройки (б).

Разработан цифровой многомерный алгоритм гашения дискретных составляющих, учитывающий вероятную нестационарность задачи, т.е. предусматривающий динамическую адаптацию режима работы САГ к изменению параметров поля. Алгоритм синтезирован в предположении (как это характерно для большинства судовых механизмов), что дискретные составляющие (ДС) в спектре исходного сигнала разнесены на частотной оси. Результирующая система управления представляет собой суперпозицию автономных подсистем САГ, настроенных каждая на свою гармонику. Рассмотрим для простоты вариант многомерного алгоритма с целью подавления только одной ДС:

$$\vec{y}_n = \vec{Y}_n e^{-i\omega n T}, \vec{Y}_n = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \vec{X}_n, \vec{X}_n = \vec{X}_{n-1} - \alpha \vec{\varepsilon}_n e^{i\omega n T}, \alpha = \omega_c T, \quad (1)$$

где $i = \sqrt{-1}$; $n = 1, 2, \dots$ – номер итерации; T – интервал дискретизации; ω – круговая частота исходного сигнала; α – коэффициент сходимости; ω_c – круговая частота среза интегратора; $\vec{y}_n \equiv \{y_{n,m}\}$ – N -мерный вектор-столбец сигналов управления компенсирующими источниками ($m = 1, 2, \dots, N$ – номер компенсирующего источника); $\vec{\varepsilon}_n \equiv \{\varepsilon_{n,l}\}$ – N -мерный вектор-столбец сигналов результирующего поля, измеряемых контрольными приемниками ($l = 1, 2, \dots, N$ – номер контрольного приемника); \vec{Y}_n, \vec{X}_n – N -мерные векторы-столбцы комплексных амплитуд гармоники векторов \vec{y}_n и $\vec{\varepsilon}_n$ соответственно; $\hat{\mathbf{A}}$ – матрица размерностью $N \times N$ комплексных коэффициентов передачи объекта управления P на частоте ω .

Под объектом управления будем понимать воздушный объем в лабораторном помещении с граничными импедансами и электроакустический тракт вместе с гасящими излучателями и МК. Управление производится для гашения сигналов и создания «тишины» в ограниченной МК зоне. Описанный выше алгоритм может быть представлен гра-

фически в виде N^2 звеньев, объединенных, как показано на рис. 3 (слева), или в виде матрицы передаточных функций:

$$W(z) = \begin{pmatrix} W_{11}(z) & W_{21}(z) & \dots & W_{N1}(z) \\ W_{12}(z) & W_{22}(z) & \dots & W_{N2}(z) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{1N}(z) & W_{2N}(z) & \dots & W_{NN}(z) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Структура каждого блока $W_{l,m}$, соединяющего l -й вход с m -м выходом, представлена на рис. 4. Здесь $h_{l,m}$ есть комплексные корректирующие коэффициенты, являющиеся элементами матрицы \hat{A}^{-1} с соответствующими индексами. Коэффициент затухания γ полагается равным единице.

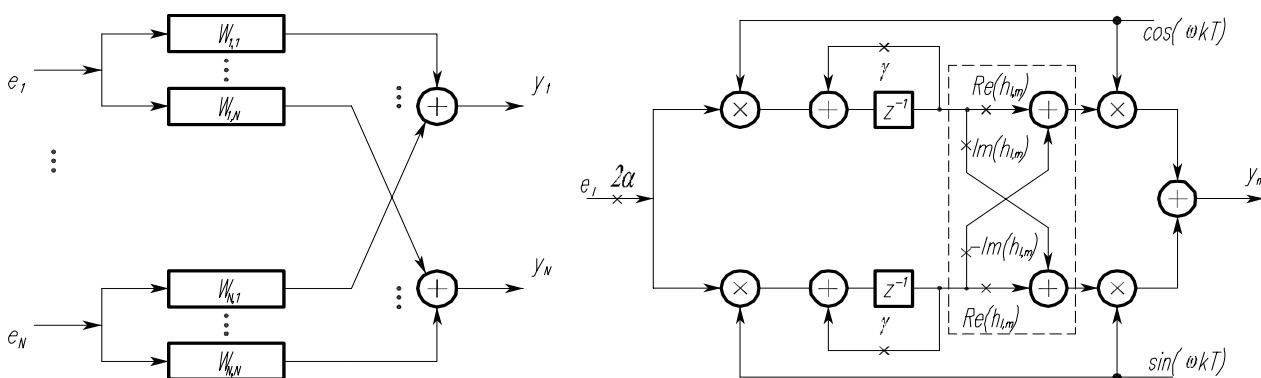


Рис. 4. Структура алгоритма гашения дискретных составляющих.

Для реализации алгоритма управления на компьютере удобно записать алгоритм управления в виде уравнений в переменных пространства состояний: $\bar{x} = A\bar{x} + B\bar{e}$, $\bar{y} = C\bar{x}$. Передаточная функция $W_{l,m}(z)$ из матрицы (2) может быть описана

системой разностных уравнений первого порядка с матрицами $A = \begin{pmatrix} 2\gamma\cos(\omega T) & -\gamma^2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$,

$B = \begin{pmatrix} \alpha \\ 0 \end{pmatrix}$ и $C_{l,m} = |h_{l,m}| \begin{pmatrix} -\cos(\omega T + \arg h_{l,m}) & \gamma\cos(\arg h_{l,m}) \end{pmatrix}$. Для многомерной системы с N^2 звеньями можно получить эти матрицы путем блочного расширения:

$$A' = \begin{pmatrix} A & 0_{2 \times 2} & \dots & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & A & \dots & 0_{2 \times 2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & \dots & A \end{pmatrix}, B' = \begin{pmatrix} B & 0_{1 \times 2} & \dots & 0_{1 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} & B & \dots & 0_{1 \times 2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} & \dots & B \end{pmatrix}, C' = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{N1} & C_{N2} & \dots & C_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

В результате испытаний САГ с использованием (1)–(3) установлено, что непосредственно в точках управления (координаты управляющих микрофонов) наблюдается снижение сигнала до уровня фона естественных шумовых помех в помещении. При этом эффективность (разница между уровнями до и после гашения) составила 30–40 дБ и более. Эффективность гашения в «зоне тишины» оценивалась по 25 точкам, заданным на плоскости в полярных координатах с началом координат в центре кольца. Точки располагались на окружностях радиусом 10, 25 и 35 см с шагом по углу 45° .

На рис. 5 показано распределение эффективности гашения (в дБ) для шести- и семиканальной САГ. Средняя эффективность снижения сигнала по области внутри кольца приемников для обоих вариантов различается незначительно и составила около 15–20 дБ. Следует отметить, что кроме подавления звуковых сигналов в «зоне тишины» наблюдалось ослабление на 3–4 дБ и вне этой зоны – во всем помещении. Это свидетельствует о том, что ослабление звука в «зоне тишины» определяется не только перераспределением акустической энергии по пространству, но и общим затуханием звуковой энергии, производимой в закрытом помещении первичным излучателем.

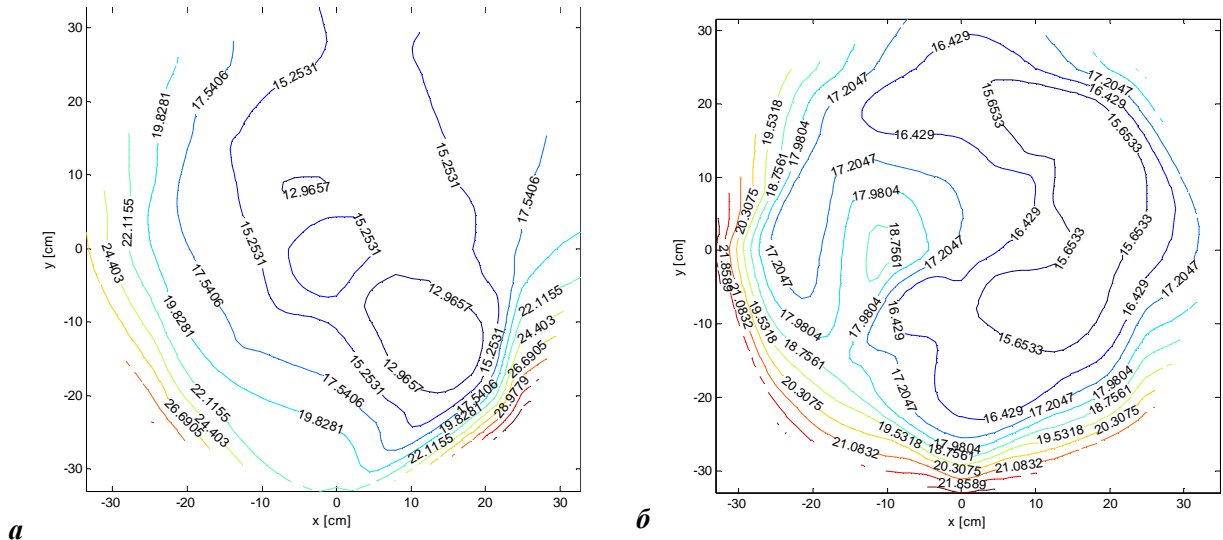


Рис. 5. Эффективность гашения в плоскости приемников на частоте 122 Гц для шести (а) и семи (б) каналов.

По оси x и y отложено расстояние от центра кольца приемников.

Для оценки возможности адаптации к нестационарности сигнала и проверки динамических характеристик САГ исследован переходной процесс на микрофоне МК1 семиканальной системы. Как видно из графика на рис. 6, с момента включения первичного излучателя до момента, когда он с использованием САГ был ослаблен, прошло около 0.8 с. ИП включалось при уже работающей САГ.

Очевидно, что за интервал времени порядка секунды реальные технические средства не успевают изменить свои характеристики. Эти изменения характеризуются постоянной времени – десятки секунд и минуты. Следовательно, САГ в заданной модификации обладает адаптационными способностями и может реально учитывать динамические эффекты.

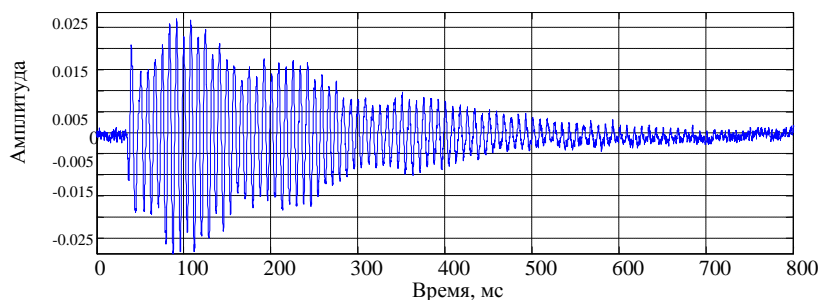


Рис. 6. Переходной процесс САГ при включении первичного источника (сигнал наблюдался на контрольном приемнике).

Испытания макета многосвязной САГ показали работоспособность системы и возможность ее использования в различных технических средствах для активного гашения низкочастотного шума, например в работах по созданию «зон тишины» в моторных от-

секах, внутри судовых рабочих помещений, а также для подавления воздушной компоненты интегрального внешнего шума морских объектов. Последнее также представляет интерес в основном на низких частотах, так как даже толстая корабельная броня для низкочастотных сигналов не дает полной изоляции.

Из изложенного выше следует, что применение САГ может обеспечивать экологическую безопасность операторов.

Активное гашение шумов мощной судовой энергетической установки. Шум дизельных агрегатов является наиболее интенсивным по сравнению с шумом, излучаемым другими типами двигателей внутреннего сгорания. Скачкообразное увеличение давления в цилиндре формирует широкополосный дискретно-сплошной спектр, простирающийся до высоких частот. Это требует использования пассивных средств совместно с активными средствами гашения шума. В соответствии с этим подавление шумов дизель-генератора на средних и высоких частотах (300–3000 Гц) производилось с применением стационарного (пассивного) «кожуха», в который дизель-генератор был размещен. Низкочастотные компоненты предполагалось подавить с использованием САГ.

Установлено, что САГ позволяет добиться существенного снижения уровня звукового давления на низких частотах (до 300 Гц). При этом в отличие от пассивных поглотителей САГ имеет способность адаптивной подстройки режима работы с сохранением оптимального режима в случае изменения частоты оборотов двигателя, граничных условий, температуры воздуха или других параметров, влияющих на структуру звукового поля.

Относительное схематическое расположение элементов САГ, кожуха, источника шума, динамиков и контрольных и измерительных микрофонов показано на рис. 7.

Источником шума являлся дизель-генератор с номинальной частотой вращения вала 25 Гц и мощностью 105 кВт. Агрегат установлен на амортизаторах на массивном бетонном полу и находился в замкнутом гулком помещении площадью 100 м².

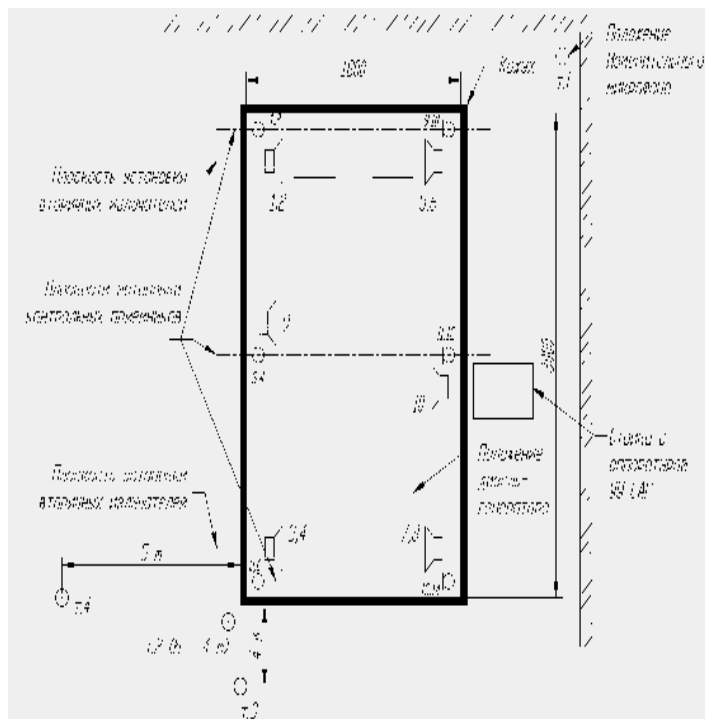


Рис. 7. Схематическое расположение источника шума, элементов САГ и точек измерения (показаны кружками).

тунном гулком помещении площадью 100 м². Кожух образовывал звукоизолирующую поверхность с узким поперечным вырезом шириной 300 мм в верхней части. Изнутри кожух отделан звукопоглощающим материалом. Акустические элементы САГ установлены внутри кожуха.

На рис. 8 прерывистой линией показан среднеквадратичский уровень спектральной плотности звукового давления шума дизель-генератора, измеренный в присутствии элементов САГ, до гашения, сплошной линией – после гашения. Частоты ДС 37.5; 50; 75 Гц связаны с частотой f вращения вала двигателя как $f_1 = \frac{1}{2}f$, $f_2 = 2f$, $f_3 = 3f$. Вклад этих ДС в общий интегральный уровень шума в слышимом диапазоне частот составляет около

80 %, т.е. является доминирующим. Существенно, что амплитудные значения звукового давления на МК внутри кожуха достигали 126 дБ, что предъявляет требования к мощности звукового поля от вторичных электродинамиков и динамическому диапазону приемного тракта.

Шум агрегата проникает в помещение в основном посредством переизлучения звука стенками кожуха и напрямую через щель сверху. Стенки кожуха жестко закреплены краями на раме и имеют основную резонансную частоту ниже 10 Гц. Отсюда следует, что излучение кожуха как объемного излучателя определяется распределением поля звукового давления на его внутренней поверхности. Равномерно распределенные по границам кожуха контрольные приемники (см. рис. 7) позволяют измерить распределение акустической энергии по отдельным модам и рассчитать [13] модальную структуру акустического поля внутреннего объема, образованную модами с номерами 0–11.

На основе расчетов структуры поля вторичные излучатели размещены таким образом, чтобы была возможность управлять амплитудами и фазами младших мод и свести к минимуму возбуждение старших высокочастотных мод. Количество излучателей M должно быть меньше или равно числу приемников $M \leq N$. В нашем случае $N = 12$, $M = 10$.

Амплитуды мод в воздушном объеме запишем через давление на отдельных приемниках: $A = UP$, где U – ортогональная матрица преобразования, P – вектор комплексных амплитуд давлений [13].

На рис. 9 (слева) представлены амплитуды мод, возбуждаемых при работе дизель-генератора на четырех рабочих частотах. На частоте 37.5 Гц распределение поля определяется в основном двумя первыми модами (№ 0, 1). На рис. 9 (справа) для примера представлено объемное распределение уровней звукового давления в кожухе на частоте 50 Гц, которая близка к критической частоте моды № 1 (56 Гц). Видно, что распределение поля близко по форме к моде № 1, имеющей узловую плоскость в середине кожуха.

При использовании алгоритма гашения узкополосных шумов применение модальных фильтров на входе и выходе дает определенные преимущества [14]. Во-первых, возможно уменьшить число излучателей. Их должно быть больше, чем число значимых мод, но может быть меньше, чем число приемников ($M < N$). Во-вторых, размерность K системы управления становится независимой от количества приемников и излучателей и снижается до числа мод, требующих гашения. Например, в нашем случае доминирующими являются первые четыре возбуждаемые моды для всех четырех рабочих частот (рис. 9). В-третьих, повышается устойчивость САГ, что позволяет оптимизировать обратные связи.

В результате эксперимента с САГ на основе алгоритма [15] с модальными фильтрами [14] было получено снижение интегрального уровня шума при гашении одновременно трех дискретных составляющих как внутри, так и снаружи кожуха. По среднеквадратической оценке в четырех точках (т.1–4) снижение интегрального уровня поля в широкой полосе частот (до 1000 Гц) составило 8.5 дБ. Уменьшение средних значений

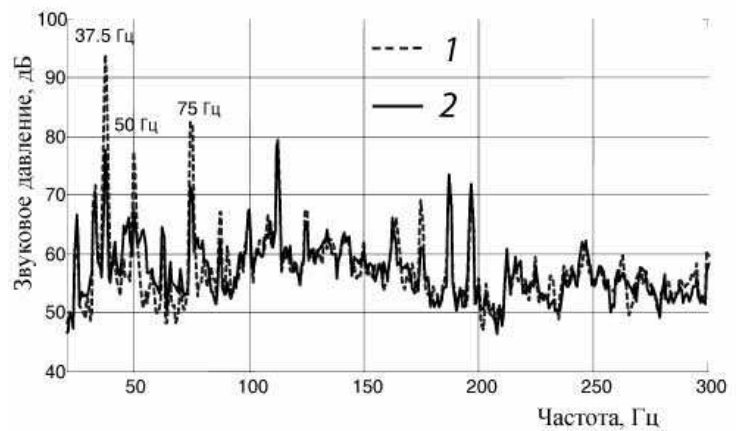


Рис. 8. Спектры уровней звукового давления шума дизель-генератора снаружи кожуха до (1) и после (2) включения САГ.

дискретных компонент составило от 12 до 18 дБ. Суммарная электрическая мощность управления десятью излучателями на трех частотах составила около 100 Вт. При этом 60 % всей мощности приходится на управление сигналом на частоте 37.5 Гц.

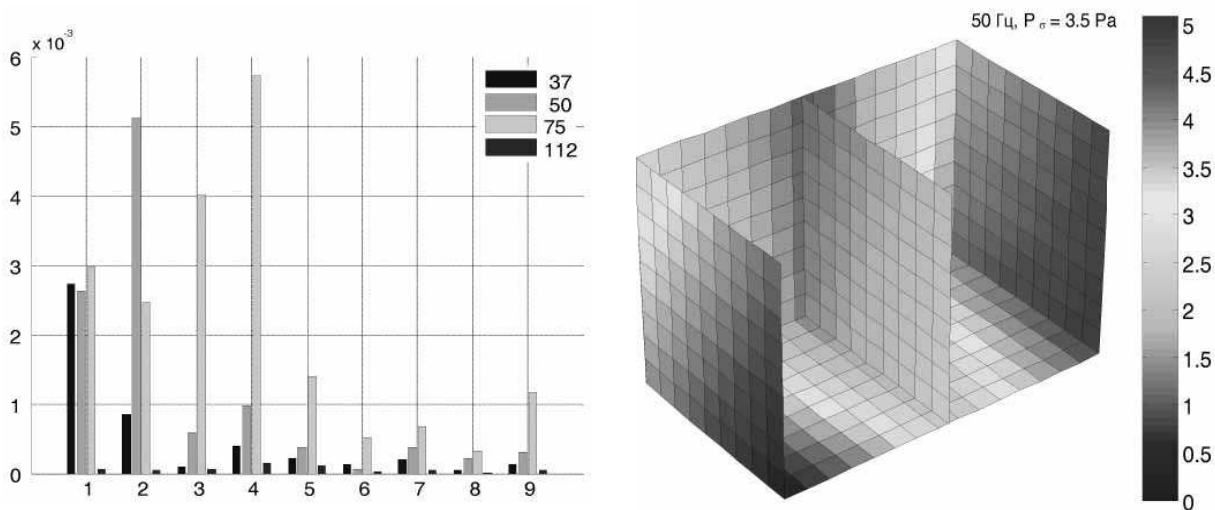


Рис. 9. Амплитуды мод (слева), возбуждаемых шумом дизель-генератора, с номерами 0–9. Распределение уровней звукового давления внутри кожуха на частоте 50 Гц (справа).

Активное гашение широкополосных шумов в водных трубопроводах. Конструкция морских объектов предусматривает использование различных водных трубопроводов, которые предназначены для забора и выброса морской воды с целью охлаждения различных механизмов. Эти трубопроводы соединены упругими связями с различными механизмами, по которым вибрации передаются на стенки трубопроводов и формируют пульсации звукового давления в водном объеме, заполняющем трубопровод. Эти возмущения могут формировать сигналы, которые излучаются в морскую среду. В результате не только увеличивается шумность, но и передается классификационная информация, например, о частоте оборотов вала, частоте вращения различных роторных механизмов. Отсюда следует необходимость подавлять эти вибрации и пульсации. Поскольку классификационная информация передается на низких частотах, то и подавление этих возмущений необходимо осуществлять с применением методов активного гашения.

Испытания в водном трубопроводе проводились с целью исследования возможности создания и оценки эффективности САГ, предназначенной для снижения пульсаций давления в трубопроводе без протока воды.

Испытания САГ проводились при высоте столба воды 4.3 м и глубине погружения опорного гидрофона и компенсирующего широкополосного излучателя 2 м. Контрольный гидрофон располагался на глубине 0.5 м. Первичный низкочастотный электродинамический излучатель устанавливался на дне трубопровода.

Для управления САГ использовался алгоритм гашения с обратной связью (без опорного приемника). Управление компенсирующим излучателем позволило минимизировать среднеквадратический уровень звукового давления на приемнике САГ, которое определяется разностью давлений от двух излучателей (первичного и компенсирующего).

Контрольный приемник САГ и компенсирующий излучатель подключались с помощью АЦП и ЦАП к устройству управления, выполненному на базе двухпроцессорного вычислителя, работающего под управлением операционной системы реального времени QNX 6.3.2. Блок-схема испытаний приведена на рис. 10.

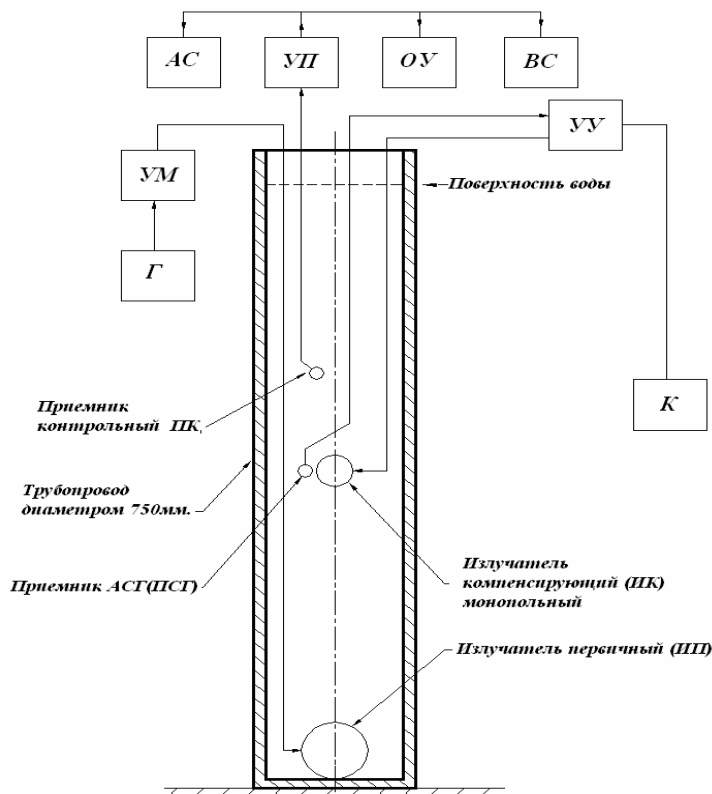


Рис. 10. Блок-схема испытаний САГ.

АС – анализатор спектра; УП – усилитель предварительный; ОУ – осциллограф универсальный; Г – генератор сигнала; УМ – усилитель мощности первичного излучателя; УУ – устройство управления в реальном времени; К – компьютер для диагностики, настройки и отображения.

них условий во время эксперимента в водном объеме размещался резонатор Гельмгольца. Испытания САГ совместно с резонатором Гельмгольца, имеющим резонансную частоту в рабочем диапазоне частот, подтвердили устойчивость работы САГ.

На рис. 11 приведены спектрограммы сигнала на приемнике САГ до и после гашения при излучении первичным излучателем сигналов в полосе частот от 20 до 250 Гц. Верхняя частота на спектрограммах 2000 Гц. По вертикали отложен уровень звукового давления (в дБ). Одно деление равно 10 дБ. На рис. 12 показана осциллограмма сигнала на приемниках давления в момент выключения и включения САГ. Вначале САГ включена. Момент выключения 53.5 с, момент повторного включения 57.3 с.

Испытания показали работоспособность САГ при подавлении шумов в широкой полосе частот. Эффективность гашения составила более 10 дБ в полосе 30–300 Гц. На отдельных частотах наблюдается эффективность гашения до 20 дБ. Для проверки устойчивости САГ к изменению внешних

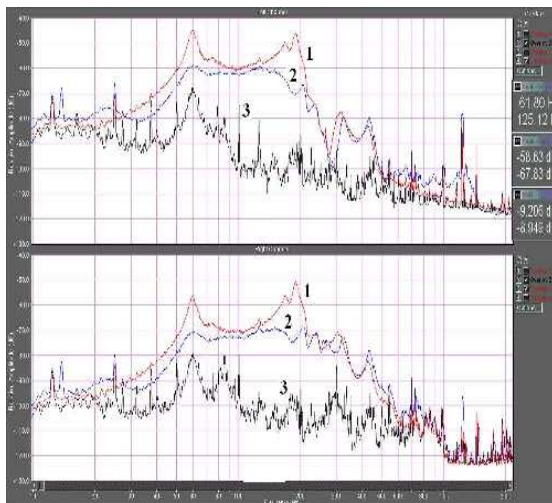


Рис. 11. Спектрограммы сигнала на опорном приемнике (вверху) и контрольном приемнике (внизу) до (1) и после (2) гашения, спектр (3) показывает уровень помех.

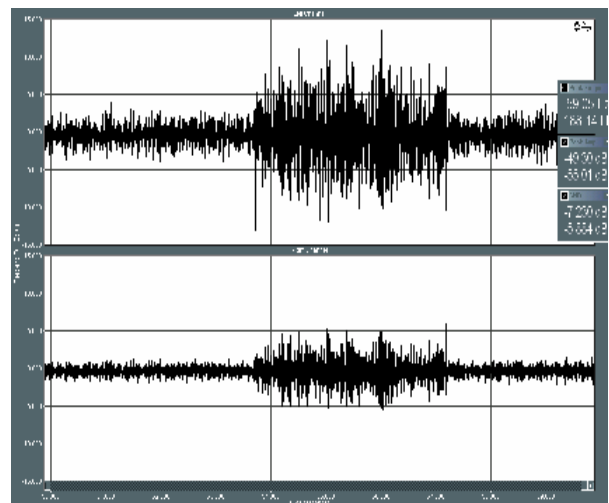


Рис. 12. Осциллограмма сигнала на приемнике САГ (вверху) и контрольном приемнике (внизу) в момент выключения и включения САГ.

О возможности искажения спектральных признаков шумов морских объектов. Морские объекты являются сложным двигательно-движительным комплексом, содержащим источники шумов и вибраций и вспомогательные дизель-генераторы, турбогенераторы или компрессоры. Для выбора технологических характеристик САГ необходимо учитывать частотно-пространственно-временную структуру первичных полей МО, полученных как в ближней, так и в дальней зоне. Однако это дорого и сложно. Определенное представление о характеристиках полей можно получить из анализа спектров шумов отдельных судовых энергетических установок, которые используются в МО различного назначения.

На рис. 13 представлены результаты измерения шума судового компрессора (кривая 2), выполненные в свободном пространстве на расстоянии 25 м от него. Интегральный уровень акустического шума на указанном расстоянии составил 80–85 дБ. Видно, что дискретные составляющие существенно превышают сплошную часть спектра.

На рис. 13 (кривая 1) и рис. 14 представлены спектры шума судового дизель-генератора, зарегистрированного в закрытом гулком помещении на расстояниях 1 и 5 м от дизель-генератора при двух режимах его работы. Наблюдаются мощный дискретный звукоряд, а также подъем сплошной части спектра в области частот до 1 кГц.

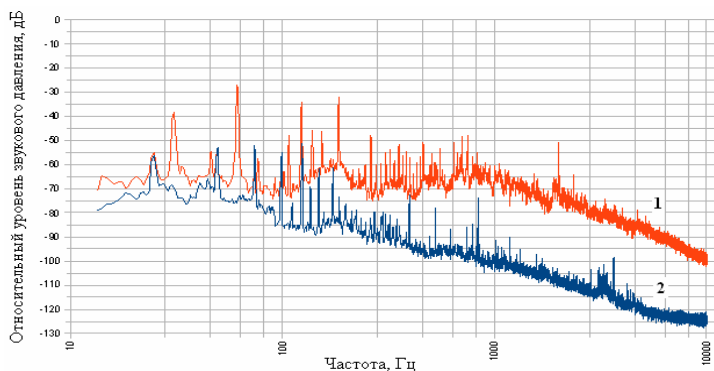


Рис. 13. Спектры шума компрессора (2) и дизель-генератора в режиме холостого хода (1).

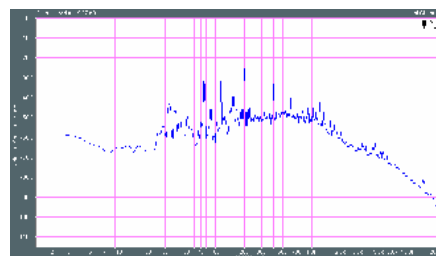


Рис. 14. Спектр шума дизель-генератора в полосе частот до 2.5 кГц. По оси ординат отложен относительный уровень (в дБ), одна клетка – 10 дБ.

Из анализа спектральных характеристик этих источников следует, что, несмотря на мощную случайную компоненту и наличие сплошной части спектра, основное шумоизлучение формируется набором дискретных компонент, превышающих спектральную плотность сплошной части спектра на величину 10–20 дБ. Число таких узкополосных компонент в зависимости от типа источника может достигать 5–10. Диапазон частот, в котором наблюдаются дискретные составляющие, начинается преимущественно от 20 Гц и может достигать до 300–1000 Гц. При гашении на различных частотах можно варьировать глубину обратной связи, т.е. производить искажение спектров. Возможно изменение соотношения уровней ДС или подмешивание в спектры нехарактерных гармоник.

В ИЦВИ ИОФ РАН разработаны макеты, алгоритмы и ПО для излучения внешних шумов, содержащих ДС на частотах, аналогичных шумам дизель-генератора или компрессора. Кроме подавления уровней ДС производится искажение формы спектра.

На рис. 15 представлены фотографии макета и аппаратного блока, на рис. 16 – схема расположения первичного источника (в центре), вторичных источников и контрольных управляющих приемников (по окружности). Измерительные приемники установлены в дальней зоне на расстояниях 3–5 м от макета.

Первичный излучатель, подключенный к генератору и усилителю мощности, создает звуковое поле в центре между двумя жесткими пассивными экранами. МК располагаются между первичным и вторичными источниками излучения, выполняющими гашение. Это

обеспечивает «принцип причинности», необходимый для эффективной настройки и устойчивости алгоритмов гашения. Компьютер (ПК), работающий в ОС QNX 6.3.2, обеспечивает групповую обработку и служит для настройки, запуска САГ и диагностики режима самовозбуждения. Настройка и диагностика выполняются в нереальном времени.

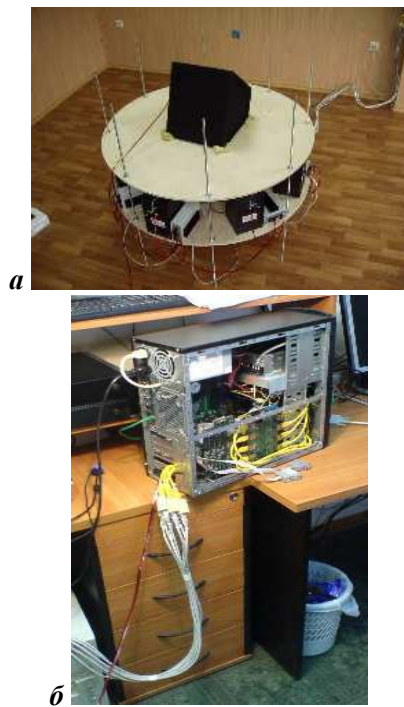


Рис. 15. Макет САГ с первичным излучателем, акустическими элементами САГ и блоками аппаратуры САГ и блоками аппаратуры (а), внешний вид устройства управления САГ, встроенного в компьютер (б).

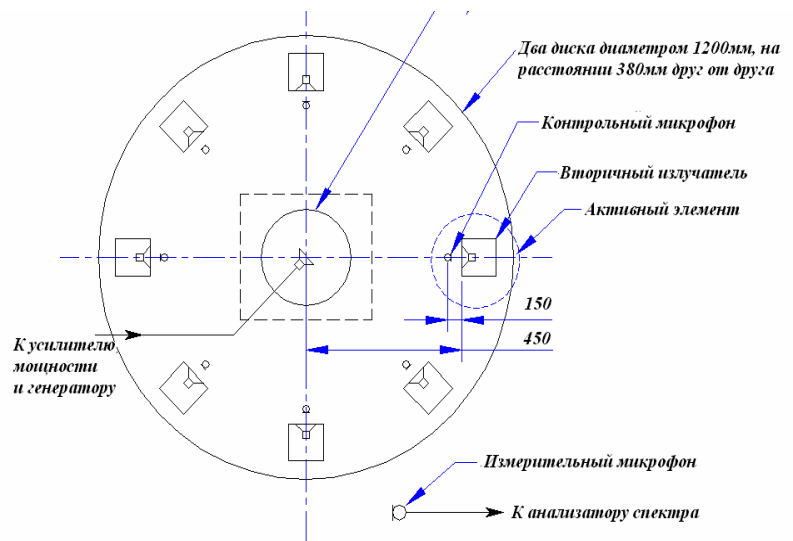


Рис. 16. Схема размещения акустических элементов при испытаниях САГ.

Поле от первичного излучателя, сформированное между двумя параллельными плоскостями, обладает цилиндрической симметрией. При расположении вторичных излучателей на поверхности цилиндрической формы образуются конформные звуковые поля. При формировании вторичного поля в реальном времени в противофазе к первичному и при равенстве амплитуд происходит вычитание вторичного поля из первичного.

На рис. 17 представлен исходный спектр сигнала от первичного излучателя. По горизонтальной оси отложена частота от 50 до 250 Гц, по вертикальной – относительный уровень, дБ (одно деление – 10 дБ). На рис. 18 изображены спектры в различных точках пространства на расстояниях более 3 м от источника при работе САГ в двух режимах. На рис. 17, 18, где представлены кривые спектров до гашения и после, видно, что, несмотря на интерференцию сигналов в гулком помещении, при включении системы происходит не только уменьшение уровня дис-

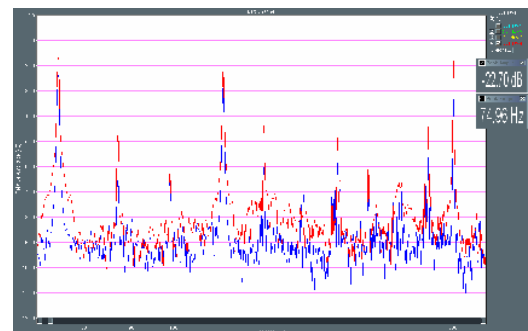


Рис. 17. Спектр сигнала первичного излучателя на расстоянии 1 м.

кретных компонент, но и в зависимости от режима работы САГ изменение соотношения величин дискретных составляющих, т. е. искажается форма спектра.

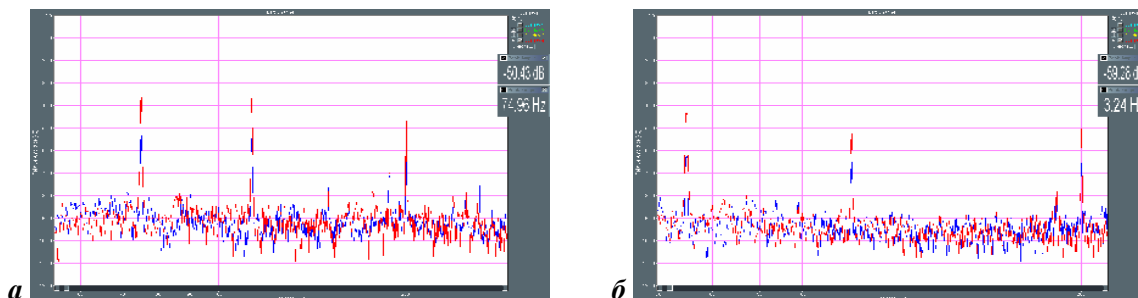


Рис. 18. Спектры сигналов на измерительном приемнике (а) с отличающимся режимом работы САГ (б).

Эффективность САГ на частотах 75, 113 и 200 Гц в различных точках помещения составила в среднем от 10 до 20 дБ. Уменьшение уровня излучаемой звуковой энергии будет способствовать повышению скрытности и боевой устойчивости против средств подводного наблюдения. Варьирование формы спектров должно уменьшить вероятность правильной классификации по спектральным признакам.

Создание новой технологической базы, новых типов приемных и излучающих элементов обеспечивает новые методические и алгоритмические возможности обработки информации. С появлением «интеллектуальных покрытий», или «сонопанелей», на основе активного гашения звуковых полей и вибраций открываются принципиально новые и ранее недостижимые возможности управления скрытностью и искажения классификационных признаков.

Анализ показывает, что созданные и рекомендуемые различными фирмами США сонопанели представляют собой распределенные на плоскости, обеспечивающие однонаправленность приема векторно-скалярные приемники, совмещенные с актюаторами, – по существу, излучателями звука или элементами, управляющими упругостью слоя сонопанелей. Непрерывная поверхность, образованная из последних, способна управлять комплексным импедансом поверхности и подавлять отраженные сигналы или собственные шумы.

Анализ показывает, что сонопанели в рекламируемой модификации способны управлять распределением звуковых колебаний на поверхности корпуса на средних и высоких частотах. Однако в случае увеличения толщины актюаторов и их эластичности частоты, на которых может быть произведено активное гашение, существенно понизятся.

Потенциал «сонопанелей» является достаточным для подавления «слабых» отраженных сигналов или излучаемых поверхностью корпуса среднечастотных малых звуковых колебаний, но не обеспечивает активное гашение достаточно мощных низкочастотных шумов, пульсаций давления и вибраций непосредственно в источниках. Для подавления более мощных пульсаций давления и вибраций авторы разработали и испытали более адекватные поставленной задаче излучающие средства.

При разработке САГ впервые в России созданы аналогово-цифровые блоки с разделением модулей, работающих в реальном и нереальном времени. Разработано многофункциональное, адаптирующееся к объекту гашения многоканальное программное обеспечение с разделением блоков ПО, работающих в реальном режиме сбора информации и управления гашением, и нереальном времени – для настройки (идентификации моделей), диагностики и контроля динамической устойчивости.

Разработаны и испытаны действующие макеты САГ, на которых экспериментально показано, что является реальным создание:

- «зоны тишины» в зашумленном корабельном отсеке с подавлением уровня ДС на 15–20 дБ;
- активно-пассивных средств, обеспечивающих активное гашение полигармонических и шумовых сигналов с подавлением уровней на 10–15 дБ в полосе рабочих частот, начиная от 25–30 Гц;
- активно-пассивных систем для подавления низкочастотных пульсаций звукового давления в водных трубопроводах на 10–15 дБ, в том числе в низкочастотном диапазоне (ниже 300 Гц);
- систем подавления уровней и искажения спектров низкочастотных звукорядов с использованием активного управления весовыми коэффициентами обратных связей не только для снижения заметности, но и искажения классификационных признаков и маскировки особо важных морских объектов.

Полученные результаты позволяют наметить пути совершенствования САГ: повышение эффективности ослабления сигналов и уменьшение весогабаритов акустических элементов; разработка теории совместного динамического управления звуком и вибрациями с введением глубоких обратных связей; обеспечение устойчивости управления, упрощения блоков цифровых вычислителей и управляющих устройств; обеспечение электромагнитной и акустической совместимости одновременно действующих каналов гашения.

Авторы выражают уверенность в необходимости скорейшего внедрения методов и средств активного управления звуком и вибрациями для улучшения акустических характеристик морских объектов, а также выражают признательность СПП РАН, ЦКБ «Рубин» и СПМБМ «Малахит» за поддержку выполненных исследований и внимание к выполненной работе.

Литература

1. Forward...from the Sea // US Naval Institute Proceedings. 1994. December. P.46–49.
2. Военно-морские силы США – курс в 21-й век. (Разработка концептуальных основ применения ВМС в новых условиях) // Зарубежное военное обозрение. 1999. № 8. С.44–51.
3. Hamblen W. Next Generation Stealth Submarines // Sea Technology. 1998. N 1. P.59–62.
4. Gentilman R.L., Bowen L.J., Fiore D.F., Pham H.T., Serwatka W.J. Injection molded 1–3 piezocomposite velocity sensors // Sea Technology. 1998. N 1. P.312–318.
5. Corsaro R.D., Klunder J.D. Co-formed accelerometer array for integrated sensor/actuator application // Int. Symp. on Active Noise Control. 1999. Dec. 2–4. P.320–323.
6. Riddle L.R., Murray J.J., Lease S.A. Active noise control architecture for the smart sleeve demonstration // Int. Symp. on Active Noise Control. 1999. Dec. 2–4. P.338–342.
7. Малюжинец Г.Д. Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью // Тр. АКИН. 1971. Вып.15. С.124–139.
8. Попков В.И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. Л.: Судостроение, 1974. 123 с.
9. Бобровницкий Ю.И. Анализ волнового взаимодействия между механическими системами с помощью обобщенных импедансов и его применение в проектировании составных конструкций // Акуст.журн. 1994. Т.40, № 6. С.34–43.
10. Ионов А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах. СПб: ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова, 2000. 350 с.
11. Borodin V.V., Lychagin A.K. Numerical Simulation of Active Damping of Acoustic Fields // Physics of Vibrations. 2000. V.8, N 4. P.242–259.
12. Бойко А.И., Тютюкин В.В. Система активного гашения звуковых полей, основанная на методе выделения пространственных гармоник // Акуст.журн. 1999. Т.45, № 4. С.454–460.
13. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 318 с.
14. Любашевский Г.С., Орлов А.И., Тартаковский Б.Д. Адаптивная компенсация дискретных компонент шума и вибрации // Акуст.журн. 1992. Т.38, вып.3. С.48–53.
15. Lau S.K., Tanga S.K. Sound fields in a rectangular enclosure under active sound transmission control // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V.110, N 2. P.212–217.

Статья поступила в редакцию 27.05.2011 г.

