

УДК 534.832:62-523 8

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ УЗКОПОЛОСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

*И. А. Королев, В. П. Лепендин, А. А. Мальцев, В. В. Черепенников*

Приводятся результаты экспериментального исследования адаптивной системы активного гашения узкополосного акустического поля в прямоугольном бассейне. Адаптивная система гашения имела один гасящий излучатель и несколько контрольных измерителей. Рассмотрено два режима работы системы. В ходе эксперимента проводилось измерение пространственной структуры поля в бассейне. При включенной системе гашения уровень поля в области гашения (за гасящим излучателем) падал на 15—20 дБ. При использовании одного гасящего излучателя с одним контрольным измерителем сигнал с контрольного измерителя при включении системы гашения уменьшался на 45—50 дБ по сравнению с сигналом от исходного поля. Исследована зависимость коэффициента подавления в точке контрольного измерителя для частотно-модулированного и узкополосного шумового акустических полей.

К настоящему времени имеется целый ряд работ, в которых экспериментально исследовались различные системы активного гашения акустических полей (см., например, [1—4]). Синтез сигналов управления гасящими излучателями в таких системах осуществляется, как правило, путем обработки сигналов специальных измерителей исходного поля или сигнала, снимаемого непосредственно с генератора, возбуждающего исходное поле. Дальнейшее развитие систем активного гашения связано с разработкой адаптивных (самонастраивающихся) устройств управления гасящими излучателями [5—10]. Адаптивные системы активного гашения автоматически моделируют реальные условия распространения волн и поэтому способны работать при нестационарных изменениях характеристик поля и параметров среды.

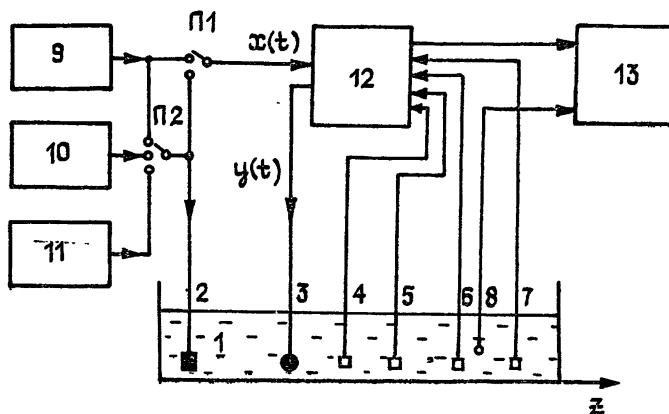


Рис. 1.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования характеристик простой адаптивной системы активного гашения узкополосного акустического поля в прямоугольном бассейне в двух режимах работы. Требуемый сигнал управления гасящим излу-

чателем в обоих случаях синтезировался с помощью изменяющегося во времени взвешенного суммирования квадратурных составляющих опорного сигнала. Причем в первом, неавтономном, режиме в качестве опорного сигнала использовался непосредственно сигнал с генератора, возбуждающего исходное поле. Во-втором, автономном, — гармонический сигнал с постоянной частотой и амплитудой от независимого генератора. В обоих режимах для управления весовыми коэффициентами применялись адаптивные градиентные алгоритмы, предложенные ранее в [7–10].

Общая блок-схема установки, используемой в эксперименте, приведена на рис. 1. Бассейн 1 был сделан из оргстекла с боковыми стенками толщиной 11 мм, дном 30 мм и имел внутренние размеры  $118 \times 30 \times 29$  см<sup>3</sup>. Глубина водного слоя составляла 16 см. В нем по оси вблизи дна были размещены пьезокерамические излучатели и измерители: 2 — излучатель внешнего поля (диск  $\varnothing = 100$  мм), 3 — гасящий излучатель (сфера  $\varnothing = 50$  мм), 4, 5, 6, 7 — контрольные измерители остаточного поля (цилиндры  $\varnothing = 30$  мм, высотой  $h = 25$  мм), 8 — пробный гидрофон для измерения пространственной структуры поля в бассейне (цилиндр  $\varnothing = 5$  мм,  $h = 7$  мм). Режим работы адаптивной системы гашения (опорный сигнал  $x(t)$ ) выбирался с помощью переключателя П 1. Излучатель внешнего поля мог возбуждаться: генератором опорного гармонического сигнала 9, генератором узкополосного шума 10, генератором частотно-модулированного сигнала 11. Подключение нужного генератора к излучателю внешнего поля осуществлялось переключателем П 2. Сигнал управления гасящим излучателем  $y(t)$  синтезировался в блоке адаптивного управления 12. В состав регистрирующей аппаратуры 13 входили приборы: селективный микровольтметр, измеритель разности фаз, анализатор спектра, частотомер и самописец.

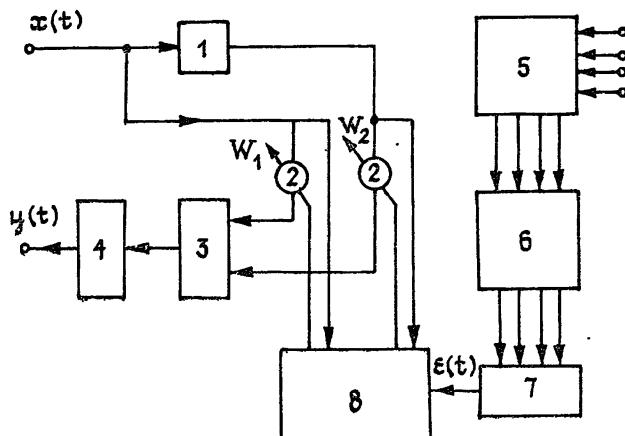


Рис. 2.

На рис. 2 отдельно показана структурная схема блока адаптивного управления. В состав блока входили следующие элементы: 1 — фазосдвигающая цепочка на  $\pi/2$ , служащая для образования квадратурной составляющей опорного сигнала  $x(t)$ , 2 — регулируемые усилены с коэффициентами усиления (весовыми коэффициентами)  $W_1$ ,  $W_2$ , 3 — сумматор взвешенных квадратурных составляющих опорного сигнала, 4 — усилитель мощности сигнала управления гасящим излучателем, 5 — четырехканальный предусилитель сигналов контрольных измерителей остаточного поля, 6 — корректирующие фильтры, 7 — сумматор, 8 — адаптивный процессор, управляющий весовыми коэффициентами  $W_1$ ,  $W_2$  и состоящий из двух идентичных цепочек корреляционных обратных связей [11].

В ходе эксперимента при работе с гармоническим сигналом ( $f_0 = 7,21$  кГц) проводилось исследование пространственной структуры

поля в бассейне. На рис. 3 представлены результаты измерения амплитуды давления вдоль оси бассейна на глубине 14 см: 1 — исходное поле, 2 — остаточное поле при использовании одного (ближайшего к правой стенке бассейна) контрольного измерителя, 3 — остаточное поле при использовании всех четырех контрольных измерителей. Расположение излучателей и контрольных измерителей по оси  $z$  показано на рисунке схематически. Из приведенных графиков видно, что при включенной системе гашения уровень поля в области гашения (за гасящим измерителем) резко падает (на 15—20 дБ); амплитуда стоячей волны в области между внешним и гасящим измерителями изменяется мало, но смещаются ее нули и максимумы; вблизи гасящего излучателя появляется глубокий минимум остаточного поля. Наблюдаемое изменение пространственной фазовой структуры стоячей волны в области между излучателями позволяет интерпретировать в данном эксперименте гасящий излучатель — монополь — как некую эквивалентную «мягкую» стенку. Из сравнения кривых 2 и 3 можно заключить, что увеличение числа используемых контрольных измерителей (от одного до четырех) при одном гасящем излучателе сглаживает и несколько уменьшает остаточное поле. В целом следует отметить, что использование нескольких контрольных измерителей остаточного поля, расположенных в различных точках области гашения, позволяло увеличить устойчивость работы адаптивной системы активного гашения и делало ее практически нечувствительной к расположению контрольных измерителей. В противоположность этому в случае использования одного контрольного измерителя, например при его специальном размещении вблизи точки минимума стоячей волны исходного поля, степень подавления поля в области гашения существенно падала из-за уменьшения величины коэффициента корреляционной обратной связи и ухудшения отношения сигнал/шум. Заметим также, что форма излучателей и измерителей практически не влияла на результаты этих экспериментов.

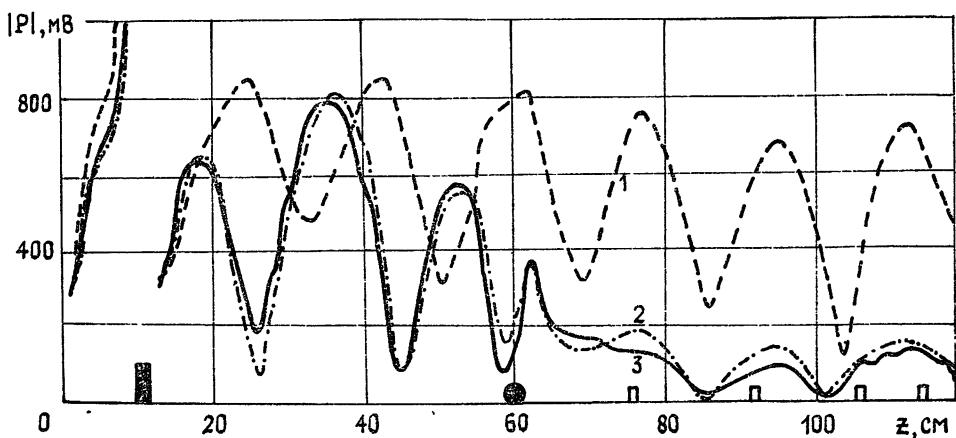
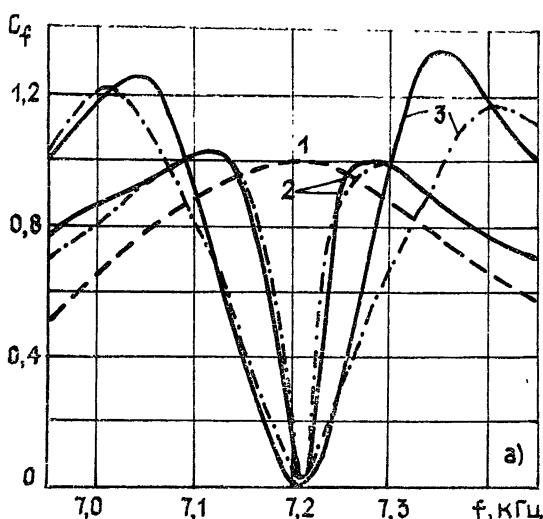


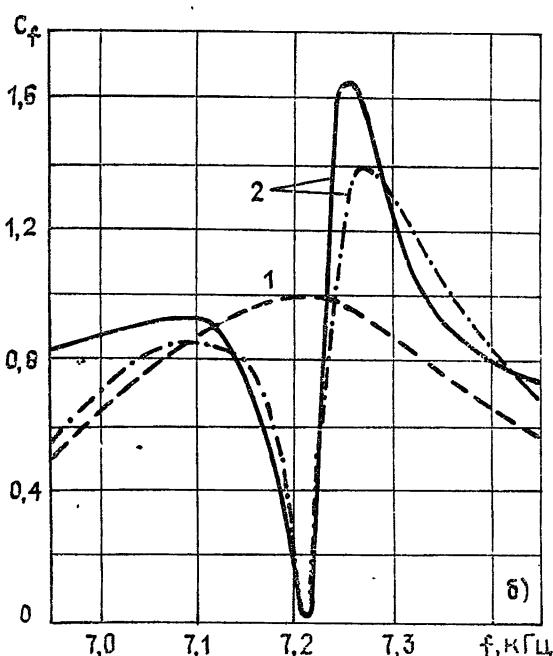
Рис. 3.

При использовании одного гасящего излучателя с одним контрольным измерителем адаптивная система гашения очень хорошо подавляет поле в точке расположения контрольного измерителя. Так, сигнал с контрольного измерителя, размещенного вблизи максимума исходного поля, при включении системы гашения уменьшался на 45—50 дБ по сравнению с сигналом от исходного поля. Была исследована зависимость коэффициента подавления в точке контрольного измерителя от частоты и параметров адаптивной системы для частотно-модулированного и узкополосного шумового акустических полей при автономном и неавтономном режимах работы.

В автономном режиме (с гармоническим опорным сигналом  $f_0 = 7,21$  кГц) адаптивная система гашения эффективно подавляла поле



a)



б)

Рис. 4. Нормированные спектры исходного и остаточного полей для частотно-модулированного сигнала в автономном режиме гашения с гармоническим опорным сигналом при различных значениях параметров адаптивной системы:

а)  $\Delta\phi=0$ ,  $A=2,7 \cdot 10^3$ ; 1 — спектр исходного поля, 2 — спектр остаточного поля при  $T_{\text{эфф}}=4,21 \text{ мс}$ , 3 — спектр остаточного поля при  $T_{\text{эфф}}=1,25 \text{ мс}$ , б)  $\Delta\phi=30^\circ$ ,  $A=2,7 \cdot 10^3$ ; 1 — спектр исходного поля, 2 — спектр остаточного поля при  $T_{\text{эфф}}=4,21 \text{ мс}$ ,

в относительно узкой полосе частот вблизи частоты опорного сигнала. При этом полоса и глубина подавления определялись параметрами системы. Из результатов работы [10] следует, что для рассматриваемой адаптивной системы гашения, состоящей из одного гасящего излучателя и одного контрольного измерителя, теоретическое значение коэффициента подавления  $H(i\omega)$  в точке контрольного измерителя будет равно

$$H(i\omega) = \frac{(1/A) + i(\omega - \omega_0)T_{\text{эфф}}}{(1/A) + i(\omega - \omega_0)T_{\text{эфф}} + \exp\{-i[(\omega - \omega_0)\tau + \Delta\phi]\}}, \quad (1)$$

где  $A$  — эффективный коэффициент усиления в цепи корреляционной обратной связи,  $T_{\text{эфф}}$  — эффективное время настройки адаптивной системы,  $\tau$  — наклон фазовой характеристики коэффициента передачи от гасящего излучателя к контрольному измерителю вблизи частоты опорного сигнала  $\omega_0 = 2\pi f_0$  (для свободного пространства  $\tau$  равно времени распространения сигнала от гасящего излучателя до контрольного измерителя),  $\Delta\phi$  — ошибка в настройке фазы сигнала на выходе корректирующего фильтра. Для всех описываемых ниже экспериментов  $\tau = 0,85$  мс. На рис. 4 представлены экспериментально полученные нормированные (на значение спектра исходного поля на центральной частоте моды) спектры  $C_f$  исходного поля и остаточного поля в точке контрольного измерителя при разных значениях  $T_{\text{эфф}}$  и  $\Delta\phi$ . На излучатель внешнего поля при этом подавался сигнал с линейной частотной модуляцией с полосой 500 Гц. Штрихпунктирными линиями показаны теоретические зависимости спектров остаточного поля, которые определялись с использованием формулы (1). Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что в автономном режиме работы с гармоническим опорным сигналом адаптивная система гашения эффективно ослабляет исходное поле только вблизи частоты опорного сигнала  $f_0$ , которая бралась равной центральной частоте возбуждаемой в бассейне моды.

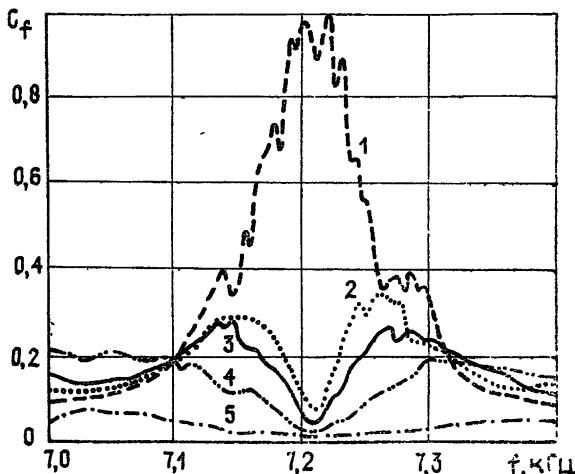


Рис. 5. Нормированные спектры исходного и остаточного полей для узкополосного шумового сигнала в автономном режиме гашения с гармоническим опорным сигналом при  $\Delta\phi=0$  и различных значениях  $T_{\text{эфф}}$ :

1 — спектр исходного поля, 2, 3, 4, 5 — спектры остаточных полей при  $T_{\text{эфф}} = 4,21; 2,35; 1,25; 0,5$  мс соответственно.

С уменьшением постоянной времени настройки системы  $T_{\text{эфф}}$  (см. рис. 4а) полоса подавления по частоте увеличивается, но одновременно происходит и усиление спектральных составляющих исходного поля вне этой полосы. Ошибка в настройке фазы на выходе корректирую-

щего фильтра (см. рис. 4б) приводит к несимметричной деформации коэффициента подавления. Эти искажения возрастают с ростом  $\Delta\phi$  и при  $\Delta\phi \approx \pi/2$  система теряет устойчивость. На рис. 5 представлены аналогичные результаты по гашению узкополосного (с полосой  $\sim 70$  Гц по уровню 3 дБ) шумового акустического поля при различных  $T_{\text{эфф}}$  и  $\Delta\phi = 0$ . Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения адаптивных систем гашения с гармоническим опорными сигналами для подавления достаточно узкополосных акустических полей.

Как следует из (1), модуль коэффициента подавления на частоте опорного сигнала  $\omega_0 = 2\pi f_0$  при  $A \gg 1$  не зависит от  $T_{\text{эфф}}$  и  $\Delta\phi$  и приближенно равен

$$|H(i\omega_0)| \approx A^{-1}. \quad (2)$$

Практически коэффициент подавления на частоте опорного сигнала ограничивался уровнем собственных шумов системы. На рис. 6 представлена экспериментально снятая зависимость модуля коэффициента подавления  $|H(i\omega_0)|$  от величины эффективного коэффициента усиления в цепи обратной связи  $A$ . Видно, что при  $A \geq 10^3$  коэффициент подавления выходит на постоянный уровень, определяемый в основном уровнем собственных шумов системы. Теоретическая зависимость коэффициента подавления построена с использованием формул (1), (2) без учета собственных шумов. Заметим, что возрастание  $|H(i\omega_0)|$  при очень больших коэффициентах усиления ( $A \geq 10^4$ ) связано с потерей устойчивости в системе гашения (при  $A \approx 2.5 \cdot 10^4$ ).

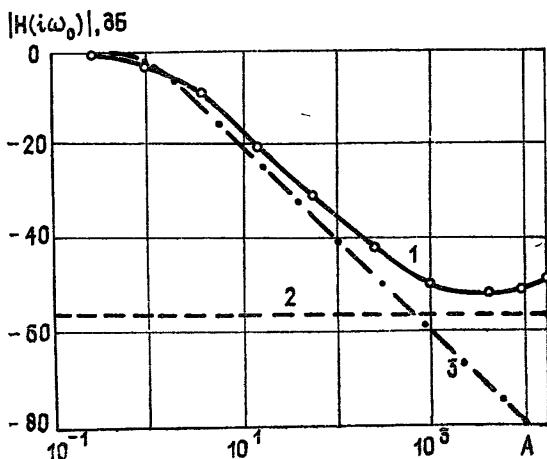


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления на частоте опорного сигнала от эффективного коэффициента усиления в цепи обратной связи:

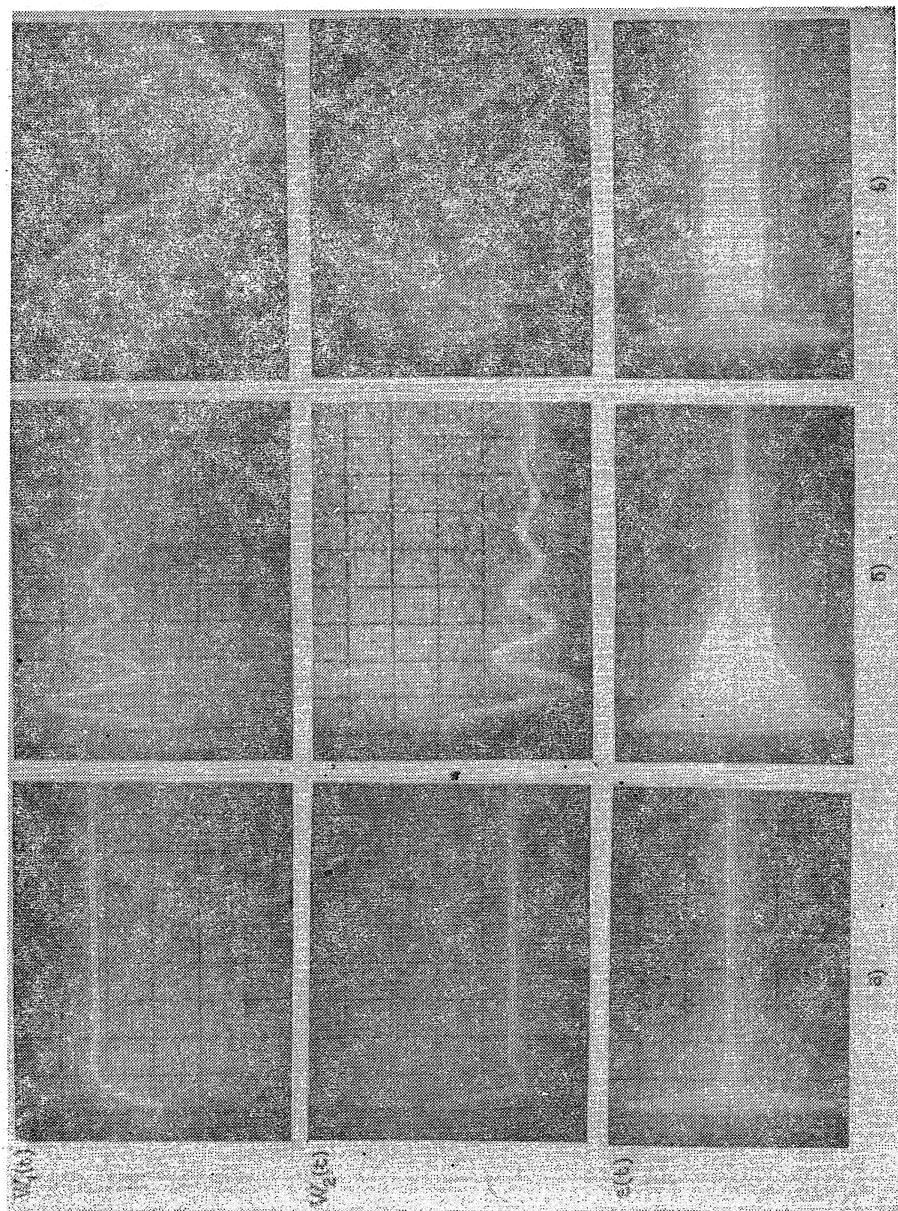
1 — экспериментальная кривая, 2 — уровень собственных шумов, 3 — теоретическая кривая.

В неавтономном режиме работы адаптивной системы гашения коэффициент подавления поля в точке контрольного измерителя зависел от вида сигнала и параметров системы. При подаче на излучатель внешнего поля сигнала с медленной частотной модуляцией весовые коэффициенты  $W_1, W_2$  блока адаптивного управления (см. рис. 2), несмотря на изменения исходного поля, «успевают» устанавливать нужную амплитуду и фазу сигнала гашения. При этом во всей полосе работы системы ( $f \approx 6,95 \div 7,45$  кГц) наблюдается высокая степень подавления (45 — 50 дБ), равная по величине коэффициенту подавления на частоте опорного сигнала  $|H(i\omega_0)|$  при автономном режиме работы системы (см. рис. 4). При подаче шумового гауссова сигнала (с полосой около 70 Гц) блок адаптивного управления устанавливает

Рис. 7. Осциллограммы установления весовых коэффициентов  $W_1$ ,  $W_2$  и остаточного поля  $\varepsilon(t)$  при скачкообразном включении внешнего гармонического поля:

- неавтономный режим с  $\Delta\Phi = 0$ ,
- неавтономный режим с  $\Delta\Phi = 30^\circ$ ,
- автономный режим с  $\Delta\Phi = 0$ .

Параметры системы:  $A = 2,7 \cdot 10^3$ ,  $T_{\text{эфф}} = 2,35$  мс.



некоторые средние значения весовых коэффициентов  $W_1$ ,  $W_2$ . Зависимость коэффициента подавления от частоты в этом случае определялась в основном близостью коэффициентов передачи от излучателя исходного поля и от гасящего излучателя к контрольному измерителю и составляла  $15 - 20$  дБ в полосе частот  $f \approx 6,95 \div 7,45$  кГц.

Для иллюстрации переходных процессов настройки адаптивной системы гашения в различных режимах работы на рис. 7 представлены осциллограммы установления весовых коэффициентов  $W_1$ ,  $W_2$  и остаточного поля  $e(t)$  (сигнала с используемого контрольного измерителя) при скачкообразном включении внешнего гармонического поля. При выключенном внешнем поле блок адаптивного управления в любом режиме работы автоматически выставляет нулевые значения весовых коэффициентов. Из сравнения осциллограмм процессов установления в неавтономном режиме работы (см. рис. 7а, б) видно, что наличие нескорректированного фазового сдвига ( $\Delta\phi \neq 0$ ) в цепи корреляционной обратной связи приводит к осцилляторному характеру установления весовых коэффициентов  $W_1$ ,  $W_2$  и увеличению времени настройки системы гашения. При этом стационарные значения весовых коэффициентов и установившаяся величина остаточного поля сохраняются неизменными. На рис. 7в показаны процессы установления в автономном режиме работы адаптивной системы при частоте внешнего гармонического поля ( $f_{\text{вн}} = 7202$  Гц), не равной частоте опорного сигнала ( $f_0 = -7212$  Гц). Видно, что в этом случае блок адаптивного управления вырабатывает периодически изменяющиеся весовые коэффициенты  $W_1$ ,  $W_2$ , которые «отслеживают» разность между частотой опорного сигнала и частотой внешнего поля ( $f_0 - f_{\text{вн}} = 10$  Гц). Таким образом синтезируется нужный сигнал гашения  $y(t)$  (см. рис. 2) с частотой, равной частоте внешнего поля. Однако из-за инерционности схемы фаза сигнала гашения отстает от фазы внешнего поля и установившаяся амплитуда остаточного поля при этом оказывается несколько большей. С ростом расстройки частоты внешнего поля от частоты опорного сигнала амплитуда остаточного поля увеличивается (см. рис. 4).

В настоящей работе не ставилась задача создания максимально широкополосной адаптивной системы активного гашения звука. Для обработки опорного сигнала использовалась узкополосная схема с двумя весовыми коэффициентами в квадратурных каналах, которая, естественно, могла автоматически подбирать амплитуду и фазу сигнала гасящего излучателя лишь для одной частоты спектра исходного поля. Заметим, что широкополосность такой простой адаптивной системы может быть несколько увеличена путем введения специальных частотно-зависимых корректирующих фильтров с постоянными параметрами в канал обработки опорного сигнала (аналогично [2, 3]) и в цепь обратной связи. В общем случае для построения широкополосных систем активного гашения необходимо использовать более сложные схемы синтеза сигналов управления, например на базе многозвездных адаптивных трансверсальных фильтров [9, 11].

В заключение авторы выражают признательность А. Н. Малахову за интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jessel M. — J. Sound Vibration, 1972, 23, № 3, p. 383.
2. Мазаников А. А., Тютекин В. В. — Акуст. журн., 1976, 22, № 5, с. 729.
3. Клинов С. П., Мазаников А. А., Тютекин В. В. — Акуст. журн., 1984, 30, № 5, с. 653.
4. Ross C. F. — J. Sound Vibration, 1982, 74, № 3, p. 411.
5. Аинфингентов В. И., Любашевский Г. С., Тартаковский Б. Д., Филиппов В. Е., Чони Ю. И. — Акуст. журн., 1980, 26, № 4, с. 611.
6. Burgess J. C. — J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70, № 3, p. 715.
7. Арзамасов С. Н., Мальцев А. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 6, с. 657.
8. Арзамасов С. Н., Малахов А. Н., Мальцев А. А. — Акуст. журн., 1982, 28, № 5, с. 583.

9. Арзамасов С. Н., Мальцев А. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, 28, № 8, с. 1008.
10. Арзамасов С. Н., Мальцев А. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1986, 29, № 6, с. 697.
11. Королев И. А., Мальцев А. А. — Радиотехника и электроника, 1981, 26, № 10, с. 2133.

Горьковский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
7 мая 1985 г.,  
после доработки  
20 февраля 1986 г.

## INVESTIGATION OF AN ADAPTIVE SYSTEM FOR ACTIVE CANCELLATION OF THE NARROWBAND ACOUSTIC FIELD IN A RECTANGULAR POOL

*I. A. Korolev, V. P. Lependin, A. A. Mal'tsev, V. V. Cherepennikov*

An experimental investigation of an adaptive system for active cancellation of the narrowband acoustic field in a rectangular pool is described. The adaptive system has one suppression (secondary) source and several control receivers. The spatial structure of the field in the pool was studied. With an adaptive system switched on the field level in attenuation domain falls down to 15—20 dB and the control receiver signal drops to 45—50 dB below the initial field level. An attenuation coefficient in the point of the control receiver for frequency-modulated and narrowband random fields is investigated.

### Аннотации депонированных статей

УДК 537.874.6

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ Е-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЭКРАНЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

*З. Т. Назарчук, З. М. Хмиль*

Разработан алгоритм численного решения интегрального уравнения задачи дифракции  $E$ -волны на цилиндрическом экране произвольного кусочно-гладкого профиля. Контур поперечного сечения рассматривается как предельный случай гладких дуг, имеющих общие точки, а плотность тока на экране ищется в виде интерполяционного многочлена, своего для каждой дуги. На примере открытого цилиндрического резонатора эллиптического и прямоугольного сечения показано, что учет поведения решения интегрального уравнения в окрестности точек стыка дуг несущественно влияет на точность определения даже ближнего дифракционного поля. Рассмотрена возможность использования данного подхода к решению задачи дифракции в более высокочастотной области спектра.

*Статья депонирована в ВИНТИ,  
регистр. № 8034-В 86. Деп. от 26 ноября 1986 г.*