

УДК 534.832:534.2-16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ В ВОЛНОВОДЕ С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ НАСТРОЙКИ

A. H. Малахов, A. A. Мальцев, C. Ю. Медведев, B. B. Черепенников

Рассматривается отражение гидроакустической волны от активной границы. Приводятся соотношения фаз и амплитуд колебаний границы и падающей волны, обеспечивающие требуемый коэффициент отражения. Приводятся блок-схема, методика и результаты экспериментов по активному управлению граничными условиями в волноводе. Управление осуществляется программной реализацией адаптивного поискового алгоритма минимизации СКО в реальном масштабе времени. Экспериментально реализованы граничные условия типа согласованной нагрузки, мягкой и неподатливой границ. С помощью адаптивно управляемого электроионного излучателя получена согласованная нагрузка на фоне границы с изменяющимся во времени коэффициентом отражения.

Как известно, проверка и градуировка гидроакустической аппаратуры в условиях свободного волнового поля позволяет получить наиболее полные и точные результаты [1]. В то же время создание таких условий при наличии отражений от стенок бассейна в лабораторной установке — задача непростая. Для ее решения необходимо согласовать импеданс стенок резервуара с импедансом жидкости [2]. Согласование может быть достигнуто либо применением поглощающих покрытий, либо использованием активных систем гашения отраженных волн [3–6]. В данной статье приводятся результаты экспериментов по применению активной системы гашения с поисковым алгоритмом адаптации для создания в лабораторной установке волновых полей заданной структуры.

Рассмотрим отражение от активной границы. Предположим, для простоты, нормальное падение плоской волны $P_p(x, t) = P_p \exp[i(kx + \omega t)]$ на плоскость $x=0$, где расположена граница, имеющая коэффициент пассивного отражения $R_n \exp(i\varphi_n)$. От границы как результат пассивного отражения будет распространяться волна $P_R = R_n P_p \exp[i(-kx + \omega t + \varphi_n)]$. В активном режиме в отсутствие падающей волны граница возбуждает волну $P_a \exp[i(-kx + \omega t + \varphi_a)]$. Тогда при воздействии волны $P_p(x, t)$ от границы «отражается» $P_R^* = [R_n P_p \exp(i\varphi_n) + P_a \exp(i\varphi_a)] \exp[i(-kx + \omega t)]$. Положим, что в активном режиме коэффициент пассивного отражения не меняется, тогда формально можем записать для модуля коэффициента отражения от активной границы и его фазы [2]

$$R = (R_n^2 + 2\alpha R_n \cos(\varphi_n - \varphi_a) + \alpha^2)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{R_n \sin \varphi_n + \alpha \sin \varphi_a}{R_n \cos \varphi_n + \alpha \cos \varphi_a}, \quad \alpha = \frac{P_a}{P_p}.$$

Задав значения R и φ , можем при известных R_n и φ_n [5] определить α и φ_a , реализующие границу с требуемым коэффициентом отражения:

$$\alpha = (R^2 - 2RR_n \cos(\varphi - \varphi_n) + R_n^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\varphi_a = \operatorname{arctg} \frac{\dot{R} \sin \varphi - \dot{R}_n \sin \varphi_n}{\dot{R} \cos \varphi - \dot{R}_n \cos \varphi_n}.$$

Эксперименты проводились в заполненной водой дюралюминиевой трубе длиной $L=2,2$ м, внешним диаметром $D=50$ мм, с толщиной стенок $d=6$ мм. В измерительной трубе параметры падающей и отраженной волн оказываются завязанными вследствие отражения на обоих торцах. Принципиальных трудностей в достижении заданных R и φ при этом не возникает. Однако при больших значениях коэффициентов пассивного отражения на торцах усложняется выбор опорного сигнала активной системы из-за сильной волновой обратной связи [7, 8]. В том случае, если по каким-либо причинам установка излучателя на самой границе затруднена, можно, располагая в непосредственной близости от нее односторонний электроионный излучатель, возбуждающий волну $P_a \exp[i(-kx + \omega t + \varphi_a)]$, получить требуемый коэффициент отражения [9].

При известных и постоянных параметрах лабораторной установки: коэффициентах пассивного отражения стенок бассейна и геометрии расположения измерителей и излучателей активной системы гашения— нетрудно, рассчитав в соответствии с (2) и точно задав a и φ_a , реализовать необходимые граничные условия. Однако неполнота знания параметров или возможность их изменения в ходе эксперимента не позволяют применить такую методику настройки системы управления. В этом случае приходится применять аддитивные системы управления активным отражением [10]. Описание установки, методика и результаты экспериментов по применению подобной системы приведены ниже.

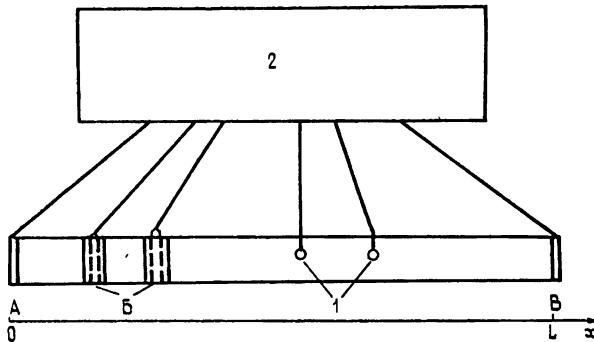


Рис. 1. Схема и расположение элементов экспериментальной установки:

A — пьезокерамический излучатель, *B* — ячейки электроионного излучателя, *1* — измерительные гидрофоны, *V* — пьезокерамический излучатель, *2* — измерительно-управляющий комплекс.

На рис. 1 даны расположение элементов и схема экспериментальной установки. Измерительно-управляющий комплекс содержал устройства аппаратной цифровой обработки сигналов, микроЭВМ «Электроника К1-20», управляемые линии задержки, генераторы синусоидальных и тактовых сигналов, усилители измерительных гидрофонов, усилители для возбуждения пьезокерамических и электроионных излучателей, регистрирующие устройства.

Результатом аппаратной цифровой обработки сигналов измерительных гидрофонов являлось выделение сигналов падающей (распространяющейся справа-налево) $P_p(t)$ и отраженной $P_R(t)$ волн [11]. Так же аппаратно формировались сигналы возбуждения гасящих излучателей.

Электроионные излучатели гидроизолировались от пресной воды, залитой в трубу, мембранными из полистирола толщиной 0,1 мм. Такие мембранны не нарушили акустической прозрачности электроионных излу-

чателей в использованном диапазоне частот. Образованные таким образом ячейки, содержащие сетки электроионных излучателей, заполнились 0,1 М раствором NaCl, в котором и происходило возбуждение гидроакустических волн [12].

На всех этапах эксперимента излучатель *B* возбуждался синусоидальным сигналом частотой 1460 Гц и являлся источником падающей волны. На первом этапе эксперимента определялись параметры активного и пассивного коэффициентов отражения от левого торца трубы. При этом излучатель *A* возбуждался сигналом генератора, питавшего излучатель *B*, но прошедшим через аттенюатор и линию задержки с переменным *t*, что обеспечивало его медленную, линейную фазовую модуляцию. МикроЭВМ при этом работала в режиме расчета параметров коэффициента отражения. Результаты расчета выводились на самописец и приведены на рис. 2. Как можно видеть, при $\alpha=0,65$, $\varphi_a=197^\circ$ коэффициент активного отражения имеет модуль $R \approx 0$ и фазу $\varphi \approx 0$; таким образом, на левом торце трубы реализуется согласованная нагрузка. При $\alpha=0,35$ и $\varphi_a=327^\circ$ активное отражение имеет параметры $R=1$, $\varphi=0$, что отвечает условиям отражения на неподатливой границе. Требуя выполнения соотношений (2) для экспериментальных значений $R \approx 0$, $\varphi \approx 0$ при $\alpha=0,65$, $\varphi_a=197^\circ$, получим параметры коэффициента пассивного отражения на левом торце трубы: $R_n=0,7$, $\varphi_n=17^\circ$ [6]. Рассчитанные для этих R_n , φ_n в соответствии с (1) R и φ удовлетворительно совпадают с экспериментальными во всем диапазоне изменений α и φ_a .

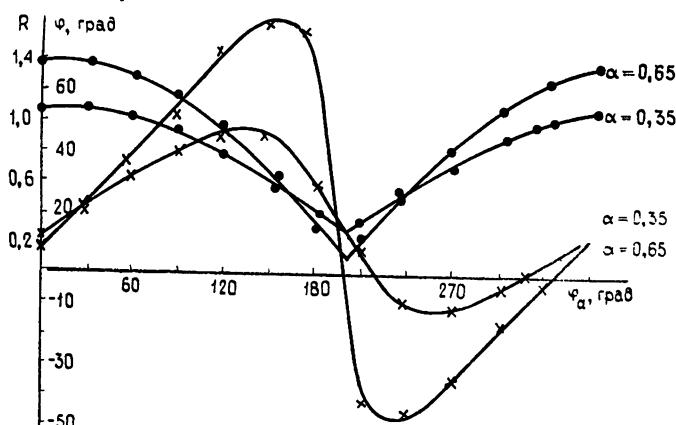


Рис. 2. Зависимость параметров «отражения» R и φ от амплитуды и фазы колебаний излучателя *A*; ● — значения R , × — значения φ , найденные из (1) при $R_n=0,7$, $\varphi_n=17^\circ$. Сплошные линии — соответствующие экспериментальные кривые.

Электроионный излучатель на этом этапе эксперимента был пассивен и, соответственно, акустически прозрачен.

На следующих этапах эксперимента осуществлялась адаптивная реализация заданных параметров отражения. Контроль достижения задаваемых граничных условий производился по измерениям сигналов выделенных падающей $P_p(t)$ и отраженной волн $P_R^*(t)$. Регистрация осуществлялась фотосъемкой осциллограмм $P_p(t)$ и $P_R^*(t)$ с экрана двухлучевого осциллографа.

Первоначально активное управление коэффициентом отражения производилось с помощью излучателя *A*, электроионный излучатель *B* и в этом случае был пассивен. Излучатель *A* запитывался управляющим сигналом, сформированным из выделенного сигнала падающей волны. Параметры амплитудного и фазового формирования управляющего сигнала рассчитывались микроЭВМ «Электроника К1-20», работавшей в режиме программной реализации поискового алгоритма минимизации среднеквадратичной ошибки, в реальном масштабе вре-

Мени. В том случае, если в качестве минимизируемого параметра введена амплитуда отраженной волны и сформированный сигнал управления подается на излучатель A , на левом торце автоматически реализуется согласованная нагрузка. Осцилограммы падающей и отраженной волн в процессе адаптации приведены на рис. 3. Фотоснимок содержит следующие фрагменты: $0 \leq t \leq t_1 - P_p(t)$ и $P_R^*(t)$ при исходных граничных условиях (пассивное отражение), $t_1 \leq t \leq t_2$ — процесс адаптации, $t_2 \leq t$ — реализация заданных граничных условий. На снимке видно, как в результате процесса адаптации минимизируется отражение и достигается режим бегущей волны. Амплитуда бегущей волны по отношению к амплитуде исходной падающей уменьшается, что свидетельствует о значительном пассивном отражении и на правом торце трубы.

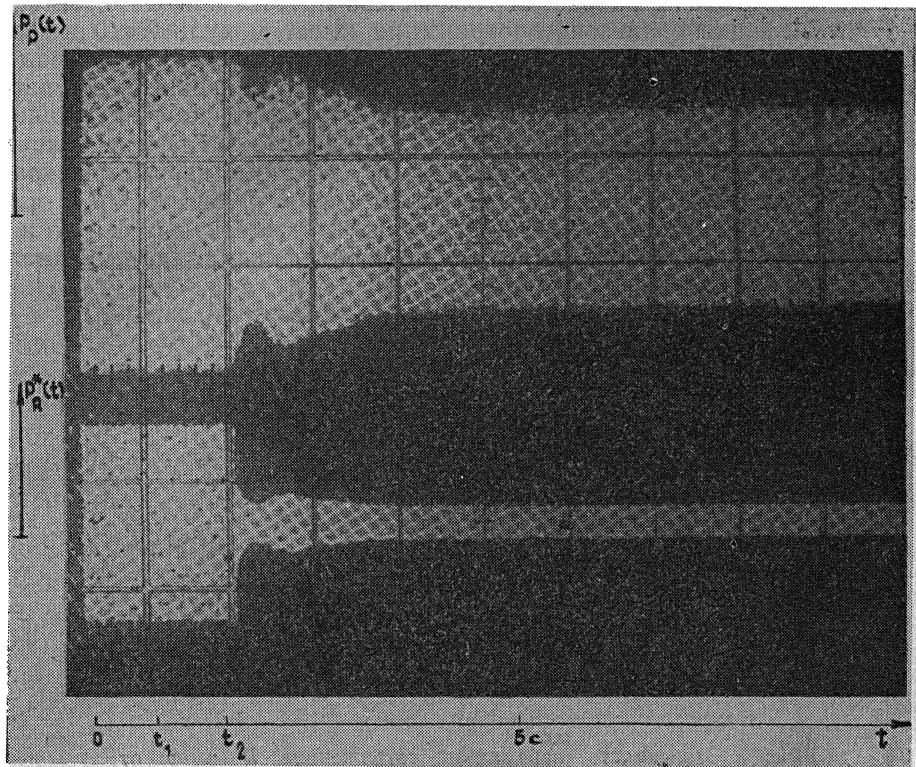


Рис. 3.

Для реализации неподатливой границы необходимо соответственно выбрать минимизируемый параметр. Нетрудно показать, что если минимизировать $P_p(t) - P_R^*(t + \tau)$, где τ — задержка, компенсирующая пространственный фазовый набег между падающей и отраженной волнами, то результатом адаптивной настройки и управления будет реализация неподатливой границы рис. 4. В результате адаптивной настройки амплитуды падающей и отраженной волн выравниваются. Фаза коэффициента активного отражения при этом стремится к нулю. Условие $R=1$, $\varphi=0$ соответствует отражению на неподатливой границе. Структура гидроакустического поля соответствует стоячей волне в трубе с неподатливыми торцами.

Аналогично можно показать, что выполнение условия $P_p(t) + P_R^*(t + \tau) = 0$ реализует активное отражение от мягкой границы (рис. 5). В этом случае также выравниваются амплитуды падающей и отраженной волн, но фаза коэффициента активного отражения принимает значение, равное 180° . В трубе образуется стоячая волна.

Используя адаптивно управляемый односторонний электронный излучатель, удалось реализовать согласованную нагрузку

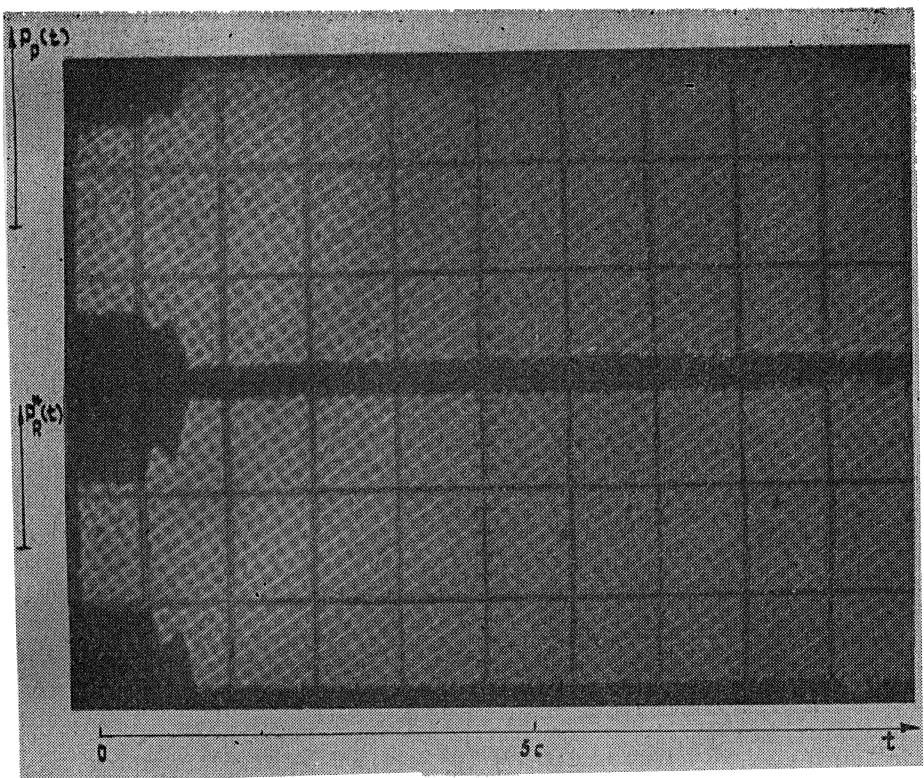


Рис. 4.

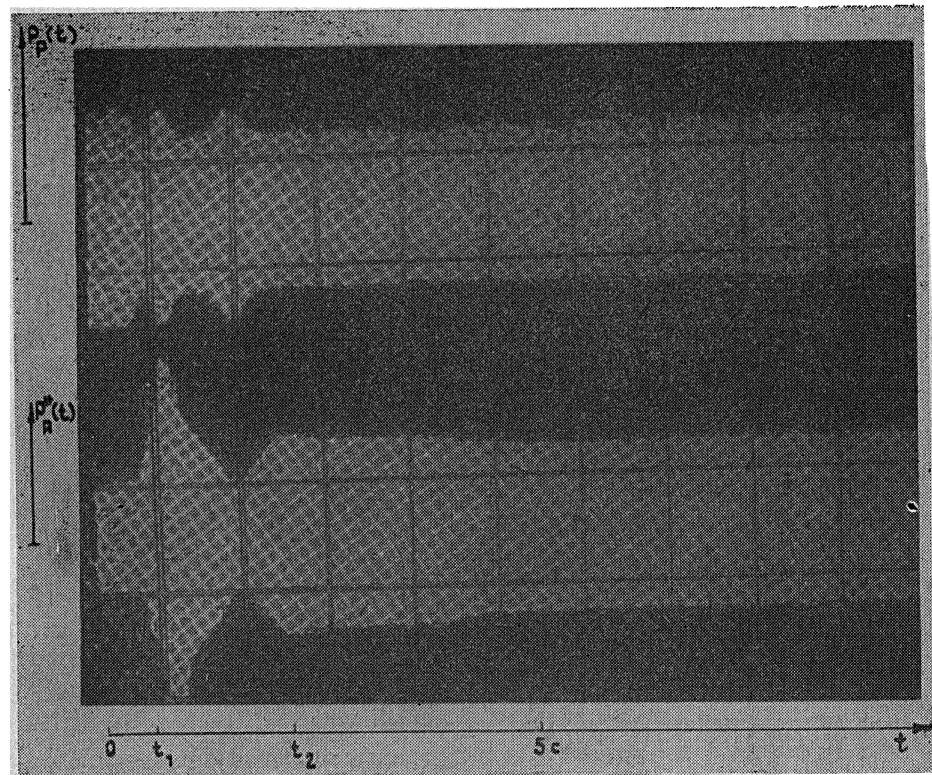


Рис. 5.

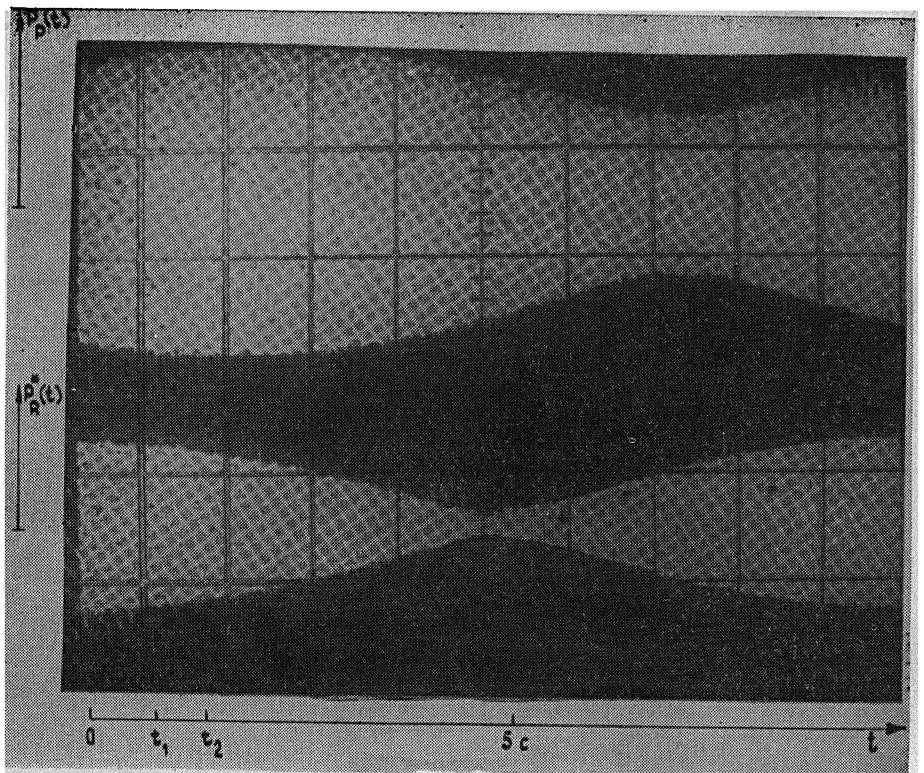


Рис. 6.

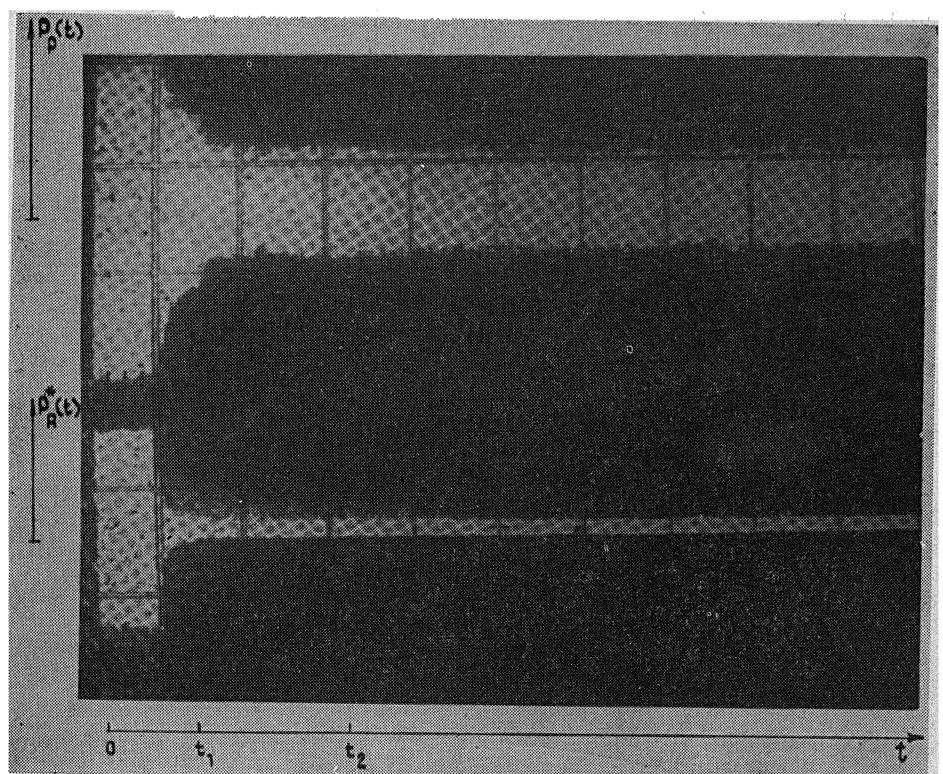


Рис. 7.

на фоне границы с изменяющимся во времени коэффициентом отражения. Излучатель *A* при этом, обеспечивая отражающую границу с переменным коэффициентом отражения, возбуждался, так же как и на первом этапе экспериментов, сигналом с медленной линейной фазовой модуляцией. Осциллограммы падающей и отраженной волн в отсутствие управления приведены на рис. 6. На рис. 7 приведены соответствующие осциллограммы в процессе адаптации. Однонаправленность электроионного излучателя обеспечивалась введением необходимых фазовых соотношений между сигналами управления ячейками излучателя *B*.

В задачи эксперимента не входило достижение высокой точности и быстродействия адаптации. Полученная в экспериментах точность составляла 20—25 дБ по отношению к исходному уровню минимизируемого параметра, что объясняется малой разрядностью примененных АЦП и высоким уровнем вибрационных шумов. Время адаптации составляло 0,5—1,5 с.

Таким образом, применение подобной системы управления структурой гидроакустического поля в специально сконструированном измерительном волноводе, на наш взгляд, позволяет просто и эффективно получать требуемые для проводимого эксперимента граничные условия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюкин И. И., Колесников А. Е. Акустические измерения в судостроении.—Л.: Судостроение, 1966, с. 120.
2. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана.—Л.: Гидрометеоиздат, 1982.—264 с.
3. Вяльшев А. И., Тартаковский Б. Д.—В сб.: Колебания, излучение и демпфирование упругих структур.—М.: Наука, 1973, с. 27.
4. Мазаников А. А., Тютекин В. В.—Акуст. журн., 1974, 20, № 5, с. 807.
5. Клинов С. П. Диссертация. М., Акустический ин-т, 1980.
6. Тютекин В. В., Бовк А. Е., Клинов С. П. Авторское свидетельство № 602 988.—Бюл. изобрет., 1978 г., № 14 197.
7. Мазаников А. А., Тютекин В. В.—Акуст. журн., 1978, 24, № 5, с. 788.
8. Мальцев А. А., Арзамасов С. Н.—Изв. вузов—Радиофизика, 1982, 25, № 6, с. 657.
9. Малахов А. Н., Черепенников В. В.—Акуст. журн., 1986, 32, № 3, с. 463.
10. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах.—М.: Наука, 1968.—348 с.
11. US Patents. 3,346,067, 10/1967 / Manfred R, Schroeder, Gillette. 181.—5
12. Малахов А. Н., Черепенников В. В.—Изв. вузов—Радиофизика, 1984, 27, № 10, с. 1349.

Горьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
4 июня 1986 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SYSTEM OF ACTIVE CONTROL BOUNDARY CONDITIONS IN THE WAVEGUIDE WITH ADAPTIVE TUNING ALGORITHM

A. N. Malakhov, A. A. Mal'tsev, S. Yu. Medvedev, V. V. Cherepennikov

Acoustic wave reflection by an active boundary is discussed. The relation between oscillation phase and amplitude of boundary and an incident wave is given. It provides the necessary radiant reflection. Block-diagram, methods and results of the experiment on boundary condition active control in the waveguide are given. The control is realized by the adaptive search algorithm of minimization (LMS) in real time. Boundary conditions of matched load type of free rigid boundary are realized experimentally. Matched load on the background of boundary with reflection coefficient changing in time is found by means of controlled adaptive electroion transmitter.