АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXII 1976 Вып. 5

УДК 534.286

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГАШЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОДНОМОДОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

А. А. Мазаников, В. В. Тютекин

Приводятся описание и результаты экспериментального исследования двух автономных активных систем гашения звука (узкополосной и широкополосной), работающих в условиях одномодовых волноводов. Информация об исходном поле принимается однонаправленными приемниками, а затем через усилитель-фазовращатель (для узкополосной системы) и электронную линию задержки с заданной передаточной функцией (для широкополосной системы) подается на однонаправленные излучатели. Первая система работает на отдельных частотах из диапазона 7–15 *кгц*, вторая – в диапазоне частот 1,5–4,5 *кгц*. Обе системы в указанных диапазонах частот создают максимальную величину звукоизоляции порядка 20–30 *дб*; при этом исходное поле перед системами практически не искажается. Приведенная оценка показывает, что предельная ширина полосы второй системы может составлять не более декады (около трех октав).

В ряде измерительных и технических задач акустики требуется применение устройств для уменьшения уровней акустических полей. Так, например, для создания звукоизоляции применяются различные перегородки, для поглощения звука, падающего на стенку,— звукопоглотители и т. д. Наряду с пассивными устройствами для этих целей могут применяться так называемые активные системы, принцип действия которых основан на том, что исходное звуковое поле гасится путем наложения на него другого звукового поля, создаваемого системой специальных излучателей.

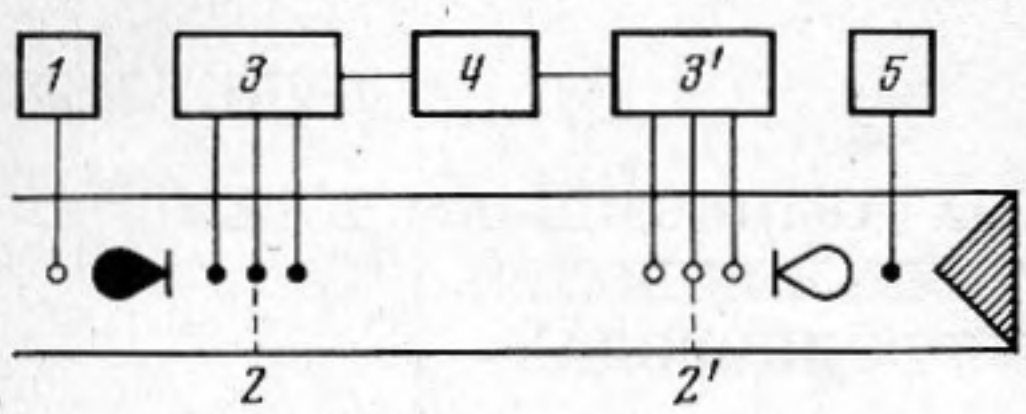
Хотя проблема разработки и применения активных методов для уменьшения уровней звуковых полей исследуется сравнительно давно, но до последнего времени ее решение не имело своего теоретического обоснования. Наиболее полное и исчерпывающее обоснование задачи об активных методах гашения акустических полей было получено Г. Д. Малюжинцем. Результаты его исследований изложены в работах [1—3]. Близкие по смыслу результаты независимо были получены также Жесселем (например, [4]). В указанных работах была впервые теоретически показана принципиальная возможность полного гашения исходного поля произвольного вида внутри (или вне) замкнутой поверхности, путем создания вокруг нее приемной и излучающей систем (поверхностей Гюйгенса — Френеля), состоящих из элементов монопольного и дипольного типов.

В настоящее время появилось много экспериментальных работ, посвященных исследованию активных систем, построенных по этому принципу, для наиболее простого одномерного случая, реализуемого путем применения в качестве акустической «среды» одномодовых волноводов [5—7]. В этих работах исследовались активные системы, в которых были использованы только излучающие поверхности, а «питание» их осуществлялось не от приемных поверхностей, а от того же источника, который создавал и исходное поле в волноводе. (Такие системы мы в дальнейшем будем на-

зывать неавтономными в отличие от автономных систем, в которых информация об исходном поле поступает на излучатели с приемников.)

Приведем сперва результаты исследования автономной активной системы гашения монохроматических волн, разработанной нами и описанной в работе [8].

Схема такой системы приведена на фиг. 1. Исследования проводились в одномодовом волноводе, описанном в работе [9], на дискретных частотах от 7 до 15 *кгц*. Возбуждение исходного поля производилось излучателем, питаемым от звукового генератора *1*. При этом для обеспечения режима бегущей волны концы волновода были заглушены звукопоглощающими клиньями, конструкция которых приведена в работе [10]. Прием исходного и излучение вторичного поля осуществляются идентичными триполями (комбинация монополя и диполя), имеющими кардиоидную характеристику направленности и, следовательно, обладающими в одномерном случае свойством однонаправленности. Такие триполи реализуют соответственно приемную *2* и излучающую *2'* поверхности Гюйгенса — Френеля. При этом поскольку триполи обращены друг к другу «нулями» характеристик направленности, то акустическая обратная связь между ними отсутствует, и поэтому приемный триполь принимает только исходное (падающее) поле, а вся система не подвержена самовозбуждению. Однонаправленность приемного и излучающего триполей осуществляется путем их настройки с помощью двух трехканальных усилителей-фазовращателей *3* и *3'*, способных изменять амплитуду и фазу каждого из трех монополей, образующих триполь. Такая схема позволяет получать степень однонаправленности каждого из триполей на уровне 20—25 *дб*. Выход приемного триполя связан со входом излучающего триполя через одноканальный усилитель — фазовращатель *4*, предназначенный для регулирования амплитуды и фазы вторичного (гасящего) поля. Это регулирование производится в соответствии с показаниями контрольного приемника *5*, размещаемого за системой и способного перемещаться вдоль волновода; при этом возможно с его помощью измерять поле и перед системой.



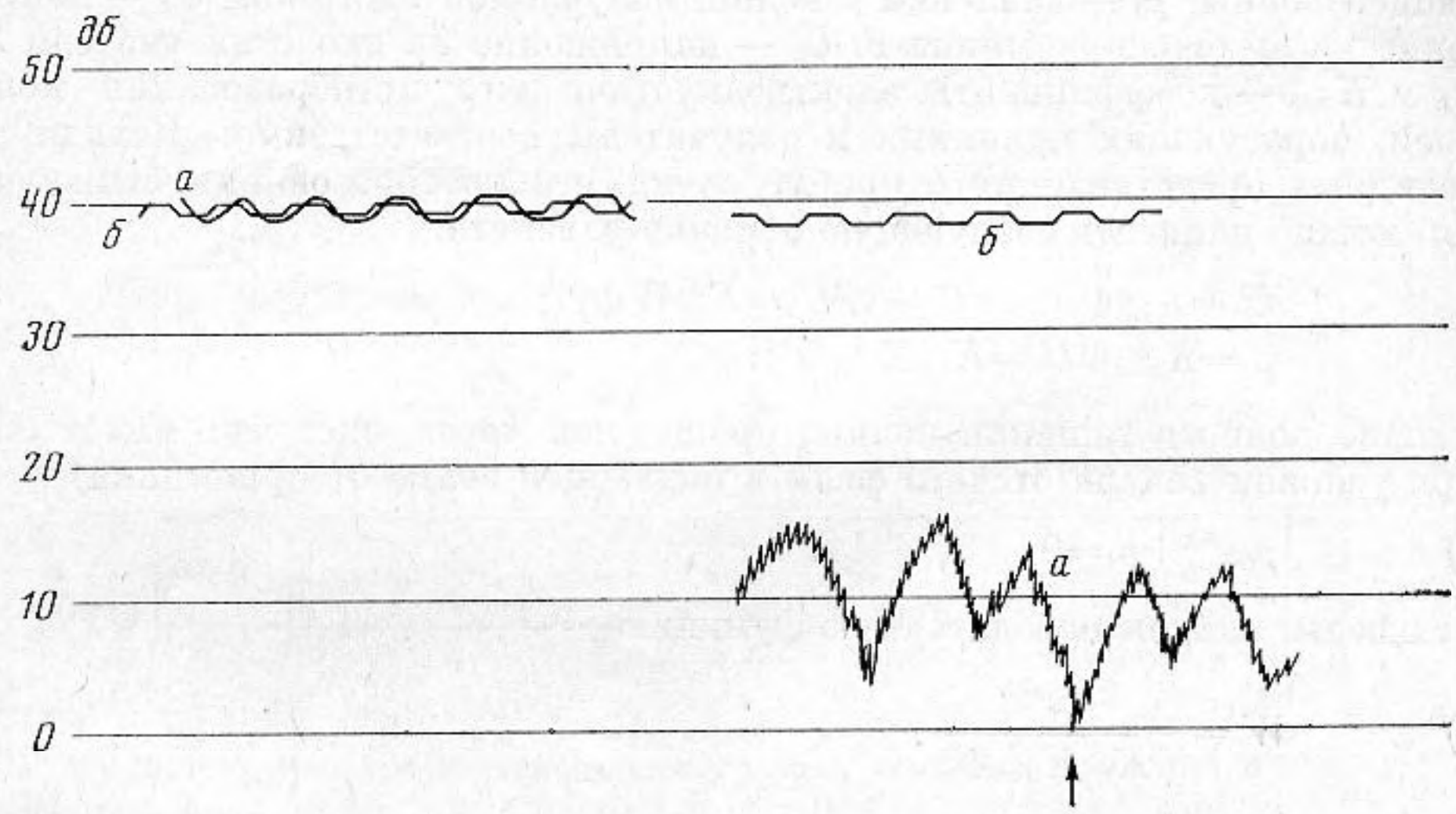
Фиг. 1. Блок-схема узкополосной гасящей системы

На фиг. 2 представлена типичная картина записи звукового поля в волноводе при перемещении звукоприемника вдоль него. Видно, что на участке волновода перед системой поля́, соответствующие кривым *а* и *б*, практически совпадают, при этом стоячая волна обусловлена неполным поглощением звука на конце волновода (сама система в этой части волновода искажений в исходное поле практически не вносит). За системой при ее включении средний уровень прошедшего поля резко падает (на 25—30 *дб*); на кривой *а* стрелкой отмечено место расположения контрольного гидрофона в момент настройки системы. Видно, что для этой точки ее эффективность составляет около 40 *дб*, в то время как в других точках волновода она ниже на 10—15 *дб*, что обусловлено прежде всего влиянием стенок волновода. Отметим, что аналогичные результаты были получены и для неавтономных активных систем [6, 7], размещаемых в трубах, заполненных воздухом.

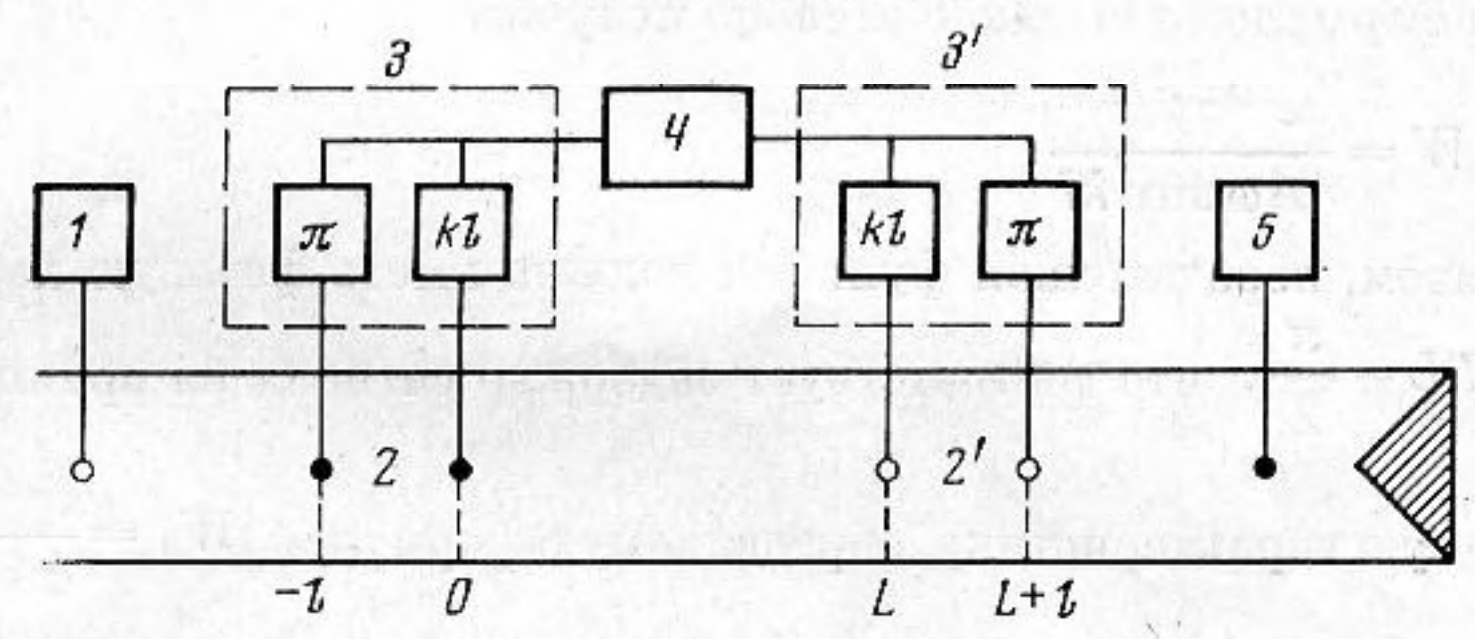
Приведенные результаты относятся к автономной системе, способной работать только на какой-либо одной частоте из заданного частотного диапазона. Ниже приводятся некоторые результаты наших исследований широкополосной автономной системы, работающей в диапазоне частот около 1,5 октав. Отметим, что теоретическое исследование аналогичной системы приведено в работе [11].

Схема разработанной нами широкополосной системы приведена на

фиг. 3. В отличие от системы фиг. 1 здесь используются приемники и излучатели *2* и *2'*, каждый из которых представляет собой два монополя; в электрический сигнал одного из монополей с помощью электронных устройств *3* и *3'* вводится сдвиг фаз $\varphi_1=\pi$, а другого $\varphi_2=kl$, где k — волновое число нормальной волны в волноводе, l — расстояние между монополями, что соответствует введению задержки сигнала на время $\tau=l/c$, где c — групповая скорость нормальной волны. В качестве приемных и излучающих монополей использовались тонкостенные сферические элементы



Фиг. 2. Уровни звукового давления в волноводе: *а* — при включенной, *б* — при выключенной системе



Фиг. 3. Блок-схема широкополосной гасящей системы

из титаната бария диаметром 3 *см*. Соответственные устройства *3* и *3'*, производящие обработку сигнала, были выполнены на основе активных *RC*-линий задержки. Расчет показывает, что относительная чувствительность приемников и излучателей при такой обработке сигналов (см., например, [12]) будет

$$\Phi=2i\sin kl. \tag{1}$$

Приемник и излучатель описанной конструкции располагаются на оси волновода (трубы с жесткими стенками с внутренним диаметром $d=0{,}15$ *м*) на фиксированном расстоянии $L\geqslant 2d$ друг от друга с тем, чтобы исключить влияние излучателя на приемник через нераспространяющиеся нормальные волны высоких номеров. Выход приемного устройства *3* связан со входом излучающего устройства *3'* через электрический преобразователь *4* (линию задержки), назначение которого состоит в обеспечении необходимых значений амплитуды и фазы волны, создаваемой излучателем *2'* системы, одновременно на каждой частоте из заданного диапазона

частот. Наконец, возбуждение поля производится излучателем, располагаемым перед системой и питаемого от задающего генератора *1*, а контроль и подстройка системы осуществляются звукоприемником *5*, располагаемым неподвижно в конце волновода (за системой), который, как и в предыдущем случае, заглушен звукопоглощающими клиньями.

Проведем расчет передаточной функции $W(\omega)$ электрического преобразователя *4*, исходя из условия, что прошедшая через систему волна полностью гасится последней. Введем обозначения: p_0 — амплитуда падающей волны, p_1 — давление в волне, излучаемой системой, U_1 — напряжение на выходе приемника *2*, U_2 — напряжение на входе излучателя *2'*, $K_{пр}$ и $K_{изл}$ — коэффициенты электроакустического преобразования монополей, образующих приемник и излучатель соответственно. Исходя из очевидных представлений о приеме звука, его преобразовании и излучении, можно написать следующую цепочку равенств:

$$U_1=K_{пр}\Phi p_0; \quad U_2=WU_1=K_{пр}W\Phi p_0;$$
$$p_1=K_{изл}\Phi U_2=K_{пр}K_{изл}\Phi^2 W p_0.$$

Условие полного гашения волны, прошедшей через систему, имеет вид (при условии начала отсчета фазы в падающей волне от приемника)

$$p_0 e^{ikL}+p_1=0. \tag{2}$$

Отсюда мы найдем передаточную функцию

$$W=-\frac{e^{ikL}}{K_{пр}K_{изл}\Phi^2}. \tag{3}$$

Учитывая, что для примененных нами приемников и излучателей $K_{пр}K_{изл}=-i\omega A$, где A — постоянная величина порядка 10^{-8} *сек*, а Φ определяется формулой (1), окончательно получим

$$W=\frac{e^{i(kL-\pi/2)}}{4A\omega\sin^2 kl}. \tag{4}$$

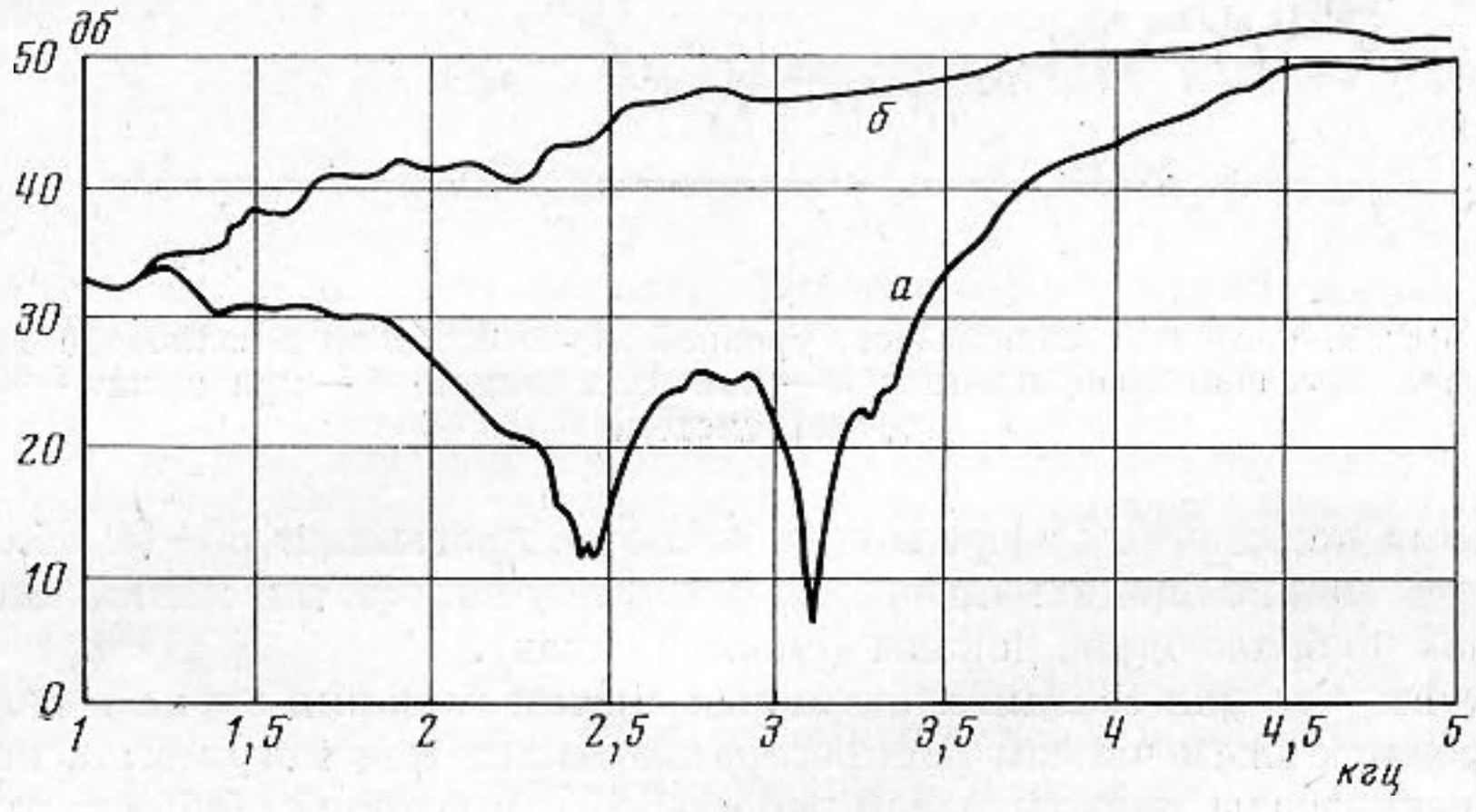
Таким образом, передаточная функция должна иметь фазовую характеристику $\varphi=kL-\frac{\pi}{2}$, что соответствует задержке сигнала на время $\tau=\frac{l}{c}$, и амплитудную характеристику, определяемую формулой $|W|=\frac{1}{4A\omega\sin^2 kl}$.

Кроме того, поскольку на частотах, выше первой критической частоты волновода (когда появляется следующая нормальная волна), приемник *2* и излучатель *2'* не обладают свойством однонаправленности, то в системе возникает акустическая обратная связь, которая может привести к ее самовозбуждению. Чтобы избежать этого, необходимо обеспечить достаточно крутой спад амплитудной характеристики $|W|$ вне рабочего диапазона частот.

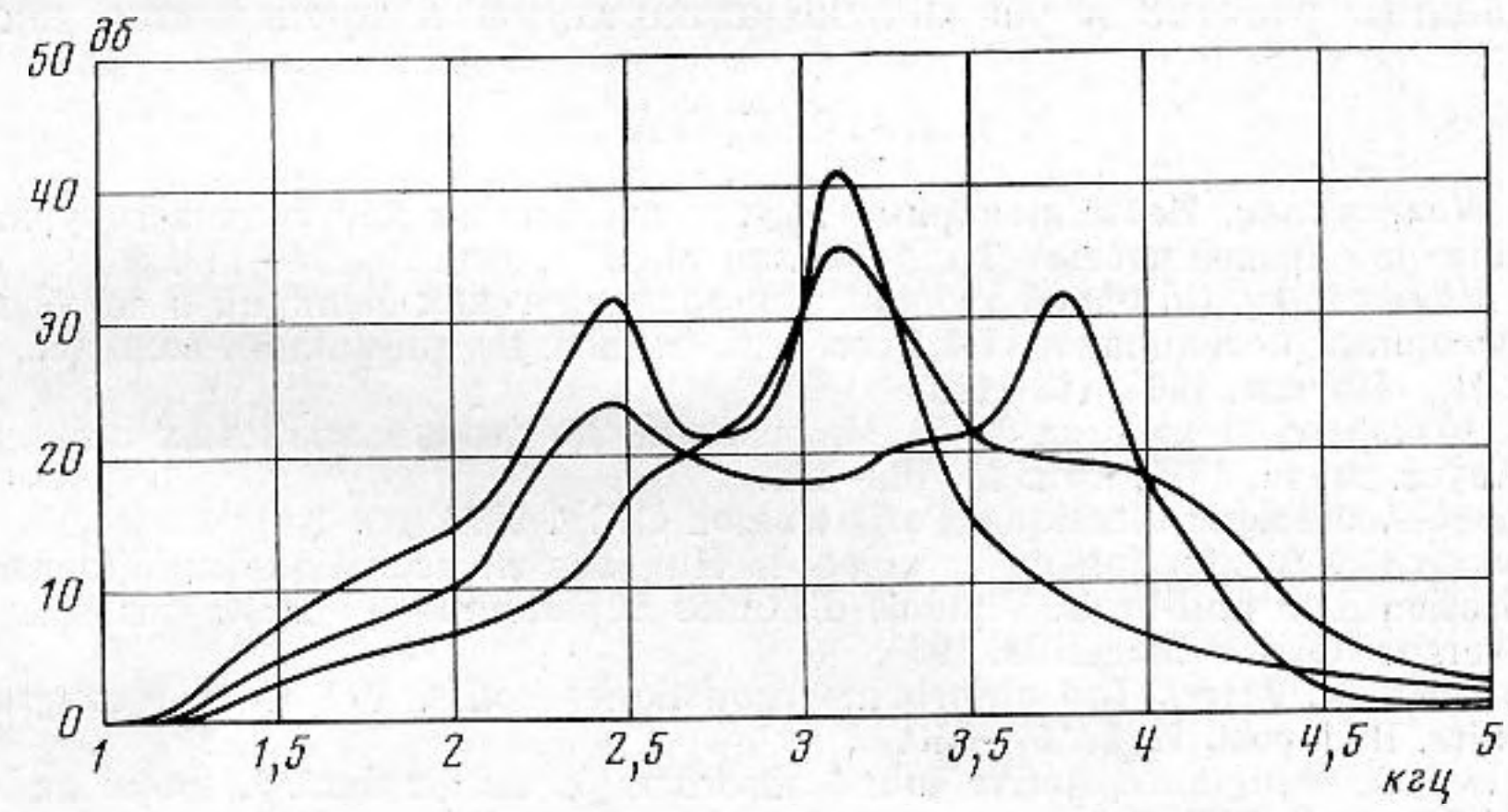
Устройство, реализующее описанную передаточную функцию, было выполнено в виде активного *RC*-фильтра низких частот с амплитудным и фазовым корректором.

На фиг. 4—6 представлены некоторые результаты исследования степени гашения нулевой нормальной волны в диапазоне частот от 1,5 до 4,5 *кгц*. На фиг. 4 представлены частотные зависимости величины звукового давления (в *дб*) в месте расположения контрольного приемника *5*. Систему можно было подстраивать на любой частоте в пределах диапазона, при этом достигалась степень гашения в диапазоне частот 15—20 *дб*, а на частоте настройки — 35—40 *дб*. На фиг. 5 представлены частотные характеристики степени гашения (в *дб*) для различных условий подстройки системы по частоте.

Данные фиг. 4 и 5 относятся к работе задающего генератора в режиме «воющего тона». Поскольку гасящая система достаточно широкополосна, возможно гашение и нестационарного сигнала. На фиг. 6 приведены характеристики гашения «белого» шума, пропущенного предварительно через фильтр нижних частот с частотой среза 5 *кгц*. По оси ординат отложена спектральная плотность шума (в *дб*), измеряемая с помощью «скользящего» фильтра с шириной полосы 150 *гц*. Из приведенных данных видно, что степень гашения для нестационарных полей лишь ненамного ниже, чем для стационарных.



Фиг. 4. Частотная зависимость уровней звукового давления в волноводе: *а* — при включенной, *б* — при выключенной системе

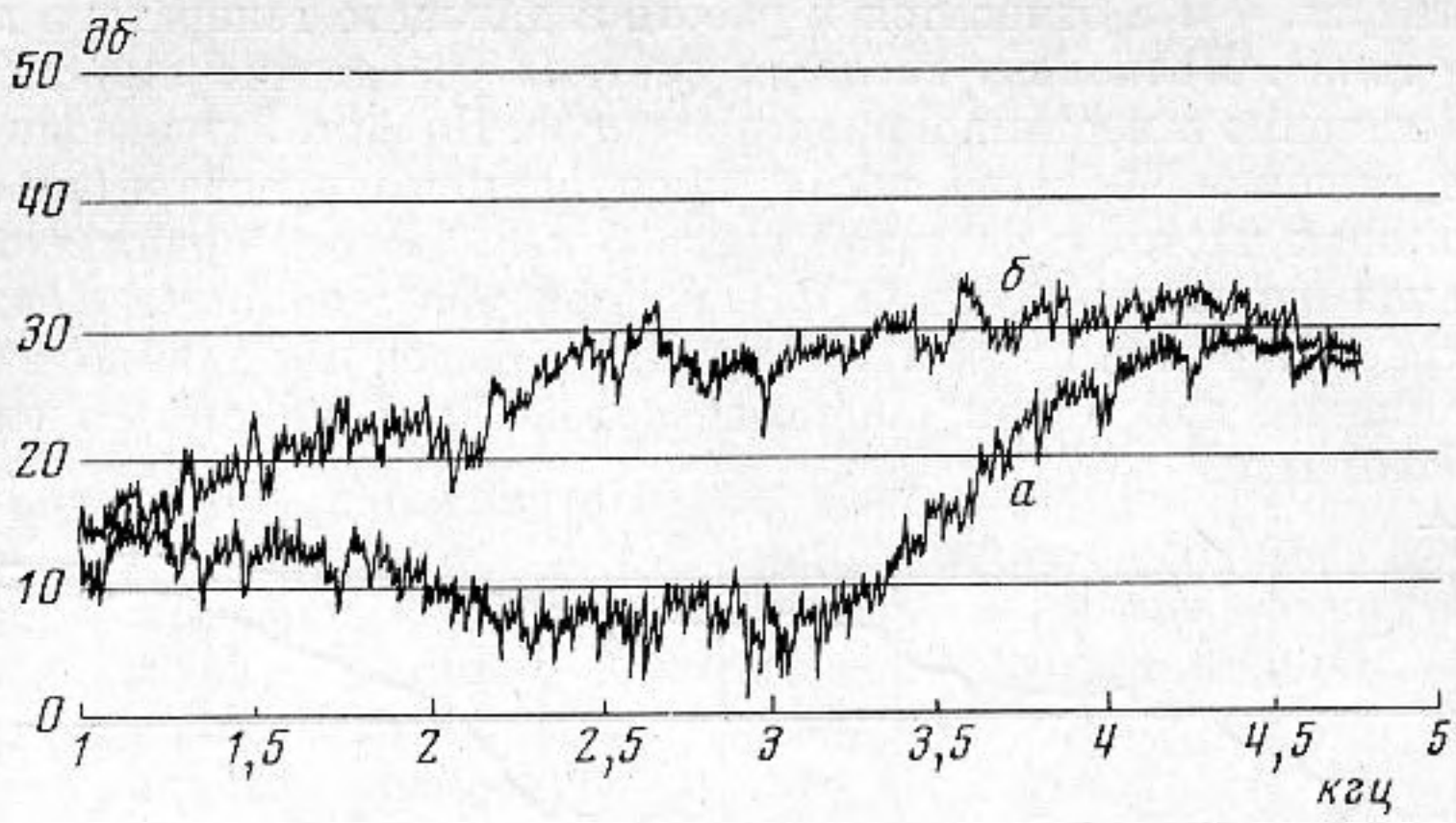


Фиг. 5. Частотная зависимость эффективности гашения звукового поля в волноводе

Увеличение верхней граничной частоты рабочего диапазона описанной системы возможно до первой критической частоты волновода * (5,9 *кгц*), однако для обеспечения устойчивой работы системы необходимо обеспечить достаточно крутой спад амплитудной характеристики на этой критической частоте; при этом, однако, трудно обеспечить линейность фазовой характеристики φ. Расширение частотного диапазона системы в сторону низких частот затрудняется тем, что модуль передаточной функции $|W|$ быстро возрастает с понижением частоты ($|W| \sim \omega^{-3}$), а динамический диапазон для активных радиотехнических цепей (от уровня шумов до воз-

---

* Некоторое увеличение рабочей частоты можно получить путем соответствующего расположения приемников и излучателей [11].



Фиг. 6. Частотная зависимость уровней звукового поля в волноводе при шумовом возбуждении: *а* — при включенной, *б* — при выключенной системе

никновения нелинейных эффектов) обычно не превышает 50—60 *дб*. Исходя из этого, можно оценить предельную ширину полосы описанной системы величиной не более одной декады (около 3 октав).

Отметим, что для создания активных систем гашения звука в волноводах с произвольным числом распространяющихся мод могут быть использованы результаты теоретической работы [13], в которой общие принципы построения активных систем применяются для волноводов.

В заключение авторы благодарят С. П. Климова и Д. В. Степанова, принимавших участие в разработке аппаратуры и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Г. Д. Малюжинец.* Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью. Тр. Акуст. ин-та, 1971, вып. 15, 124—139.
2. *Г. Д. Малюжинец.* Об одной теореме для аналитических функций и ее обобщении для волновых потенциалов. III Всесоюзн. симпоз. по дифракции волн (сб. докладов). М., «Наука», 1964, 113—116.
3. *М. В. Федорюк.* О работах Г. Д. Малюжинца по теории волновых потенциалов. Тр. Акуст. ин-та, 1971, вып. 15, 169—179.
4. *M. Jessel.* Acoustique theorique. Paris Masson et Cie, 1973.
5. *G. Mangiante.* Application du principe de Huygens en acoustique unidimensionelle. Realisation d'un anti-bruit. Diplôme d'Etudes Superieures — Faculte des Sciences de l'Universite d'Aix — Marseille, 1968.
6. *G. Canevet, M. Jessel.* Les absorbeurs acoustiques actifs. VII Intern. congress on acoustics. Budapest, 1971, 337—340.
7. *M. Jessel, G. Mangiante.* Active sound absorbers in an air duct. J. sound and vibration, 1972, *23*, 3, 383—390.
8. *А. А. Мазаников, В. В. Тютекин.* Экспериментальное исследование активной системы гашения акустических полей. Акуст. ж., 1975, *20*, 5, 807—808.
9. *Р. Н. Викторова, В. В. Тютекин.* Метод измерения угловых характеристик коэффициента отражения материалов в гидроакустике. Акуст. ж., 1973, *19*, 4, 498—504.
10. *E. Meyer, K. Tamm.* Breitbandabsorber für Flüssigkeitsshall. Acustica. 1952, 2, Beih. 2 AB91.
11. *M. A. Swinbanks.* The active control of sound propagation in long duct. J. sound and vibration, 1973, *27*, 3, 411—436.
12. *А. Е. Вовк, С. П. Климов, В. В. Тютекин.* Измерение коэффициента отражения звука с помощью однонаправленного приема. VIII Всесоюзн. акуст. конф. Ж. Шу-7. М., 1973, 96—99.
13. *М. В. Федорюк.* О гашении звука в волноводах активным методом. Акуст. ж., 1975, *21*, 2, 281—285.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
4 мая 1976 г.