

УДК 504.6:534.83

Разработка системы активного гашения шума методом активного поглощения

05, май 2012

Сазонов Д. В., Громоздин А. В.

*Научный руководитель: Комкин А. И.,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Борьба с шумом является одним из основных направлений современной акустики. Одним из способов борьбы с шумом, не требующим значительных пространственных затрат и работающим в широкой области частот, является применение активных методов гашения звуковых и вибрационных полей. Суть активных методов гашения заключается в управляемом изменении поля в некоторой области пространства с помощью дополнительных излучателей звука.

Задачей настоящей работы является исследование акустического резонатора монопольного типа, а также разработка активного метода управления резонатором, позволяющего увеличить частотную полосу его эффективной работы.

Система активного гашения шума должна обеспечить коэффициент поглощения падающей волны не менее 40% в диапазоне частот 200-500 Гц.

Общее решение задачи активного поглотителя

Рассмотрим общий случай взаимодействия резонатора со звуковым полем. Резонатор находится во внешнем звуковом поле. Со стороны поля на резонатор действует обобщенная сила F_0 . Со стороны блока управления на резонатор действует дополнительная сила F_a . Помимо механического импеданса Z_m резонатор обладает комплексным сопротивлением излучению Z_r . Движение мембраны резонатора характеризуется комплексной амплитудой обобщенной скорости излучателя V .

Согласно 2-му закону Ньютона можно записать уравнение движения резонатора

$$Z_m V + Z_r V = F_0 + F_a \quad (1)$$

или

$$Z_m + Z_r - F_a/V = F_0/Z \quad (2)$$

Под величиной Z следует понимать полный импеданс резонатора, включающий в себя механическую Z_m , активную $Z_a = F_a/V$ составляющие, а также сопротивление излучению Z_r .

Очевидно, что максимальное значение поглощаемой мощности достигается в случае комплексного сопряжения полного импеданса резонатора Z с сопротивлением излучению Z_r , т.е.

$$Z = Z_r^* \\ \operatorname{Re} Z = \operatorname{Re} Z_r, \operatorname{Im}(Z + Z_r) = 0. \quad (3)$$

Расположим вблизи резонатора приемник, фиксирующий звуковое поле, которое является суммой внешнего поля Q_0 и собственного поля резонатора Q_1 . Сила,

действующая на резонатор со стороны внешнего поля, должна быть пропорциональная величине поля, т.е. $Q_0 = T_0 F_0$,

где T_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий только от свойств приемника и резонатора.

Собственное поле резонатора пропорционально его скорости, поэтому поле в точке расположения приемника можно выразить через скорость резонатора

$$Q_1 = T_1 V,$$

где коэффициент пропорциональности T_1 описывает акустическую связь между приемником и резонатором и зависит от их взаимного расположения. Назовем коэффициент T_1 коэффициентом акустической связи приемника и резонатора.

Таким образом, показания приемника записываются в следующем виде

$$Q = T_0 F_0 + T_1 V \quad (4)$$

По измеренной величине поля Q формируется дополнительная сила F_a . Связь F_a и Q линейна:

$$QK = F_a, \quad (5)$$

где K – управляющая функция, по сути, являющаяся коэффициентом обратной связи между приемником и резонатором.

Подставляя (5) в (4), а (4) в (2) получим

$$\begin{aligned} F_a &= KT_0 F_0 + KT_1 V \\ (Z_m + Z_r)V &= F_0 + KT_0 F_0 + KT_1 V \\ \frac{F_0}{V} &= \frac{Z_m + Z_r - KT_1}{1 + KT_0} \end{aligned}$$

Z_m – является величиной неизменной, и ее значение зависит от параметров резонатора

Z – является регулируемой величиной и зависит от значения коэффициента обратной связи.

Подбором зависимости коэффициента обратной связи от частоты $K=K(\omega)$ (а значит и частотной зависимости импеданса резонатора $Z=Z(\omega)$), можно добиться выполнения условий (4) в широком диапазоне частот.

Найдем оптимальное значение коэффициента обратной связи для поглощающего режима работы резонатора

$$\tilde{K} = \frac{Z_m + Z_r - \tilde{Z}}{\tilde{Z}T_0 + T_1}, \quad (6)$$

где $\tilde{K}$ - оптимальное значение коэффициента обратной связи,

$\tilde{Z}$ - оптимальное значение полного импеданса резонатора.

Частное решение для торцевого поглотителя

Получив решение в общем виде, рассмотрим частный случай торцевого поглотителя.

Пусть в полубесконечной трубе распространяется звуковая волна. Поле давления в трубе описывается законом

$$p = Ae^{-ikx}e^{-i\omega t},$$

где A – амплитуда волны, $k=\omega/c$ – волновое число, x – координата, ω – частота звуковой волны, c – скорость звука в среде, t – время.

Для упрощения выкладок множитель $e^{-i\omega t}$ в дальнейшем будем опускать.

В торце трубы установлен активный резонатор (рис.1). Задача состоит в гашении отраженной от торца трубы волны Be^{ikx} , что равносильно поглощению падающей волны.

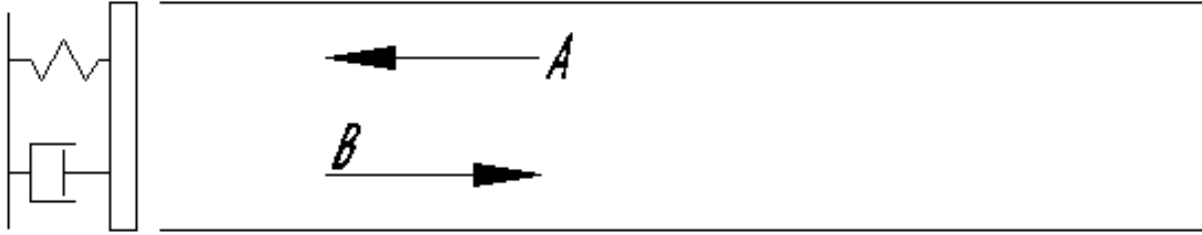


Рис.1. Торец трубы с активным резонатором

Резонатор представляет собой поршень, перекрывающий сечение трубы и закрепленный на пружине и демпфере.

Механический импеданс резонатора можно записать в виде

$$Z_m = -i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega},$$

где m – масса поршня, χ – упругость пружины, γ – трение демпфера.

В данной постановке резонатор является монопольным.

В качестве обобщенной силы, действующей на резонатор, выберем силу

$$F_0 = -AS,$$

где S – площадь поперечного сечения трубы.

Сопротивление излучения поршня в трубе вещественно и равно

$$Z_r = \rho c S,$$

где ρ – плотность среды.

При отсутствии активного управления резонатором падающая волна полностью поглощается на резонансной частоте

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

Поместим датчик звукового давления перед поршнем внутри трубы. Давление в падающей волне в точке расположения приемника равно

$$Q_0 = A$$

Отсюда находим

$$T_0 = -\frac{1}{S}$$

В отсутствии падающего поля резонатор, движущийся со скоростью V , излучает волну с амплитудой

$$B = \rho c V$$

Поскольку $Q_1 = B$, то $T_0 = \rho c$

Подставляя полученные значения Z_r , T_0 и T_1 в (6), находим значение коэффициента обратной связи активного резонатора для полного поглощения падающей волны.

$$\tilde{K} = -\frac{Z_m}{2\rho c} \quad (7)$$

Из (7) следует, что частотная зависимость коэффициента обратной связи имеет следующий вид

$$\tilde{K} = -A_0 \left(-i\omega a + b + \frac{c}{-i\omega} \right) \quad (8)$$

где A_0 , a , b , c – постоянные положительные коэффициенты.

Из (8) следует, что коэффициент обратной связи является суммой продифференцированного (умножение на $-i\omega$), проинтегрированного (деление на $-i\omega$) и прямого сигнала. На основании проведенных вычислений обратная связь активного резонатора может быть реализована в виде аналогового фильтра, являющегося комбинацией дифференцирующих, интегрирующих и усиливающих звеньев.

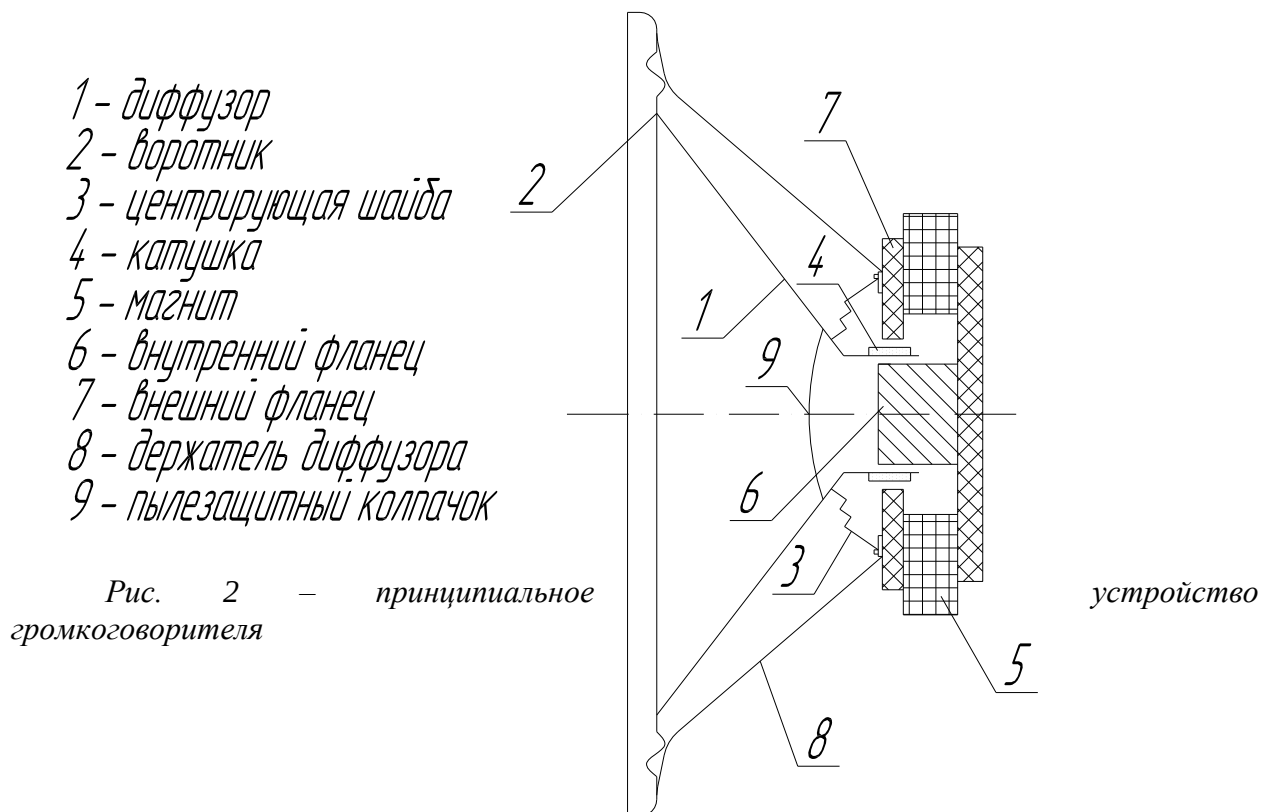
Теоретическое выражение для импеданса резонатора

Для реализации аналогового фильтра, обеспечивающего оптимальный коэффициент обратной связи, в первую очередь нужно определить значения коэффициентов A_0 , a , b и c в формуле (8).

Если сопоставить формулы (8) и (7), станет ясно, что эти коэффициенты зависят от механических характеристик динамика: массы m , упругости χ и трения γ .

Определим теоретическую зависимость механического импеданса резонатора Z_m от указанных характеристик.

Громкоговоритель можно рассматривать как совокупность активного сопротивления R_0 и реактивного сопротивления L (см. рис. 3).



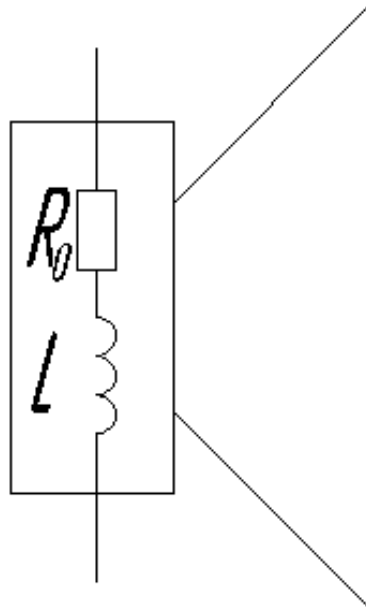


Рис. 3 Громкоговоритель

Полное сопротивление в таком случае равно

$$R = R_0 - i\omega L$$

Согласно закону Ампера, на проводник с током I длиной l со стороны магнитного поля, действует сила равная

$$F = BLI \quad (9)$$

где B – магнитная индукция.

Напряжение U на такой системе можно записать как

$$U = RI + Bl\dot{\xi} \quad (10)$$

где ξ – бесконечное малое перемещение проводника, а $\dot{\xi}$, соответственно, его скорость.

Из (10) получаем

$$I = \frac{U - Bl\dot{\xi}}{R} \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9), получим

$$\begin{aligned} F &= Bl \cdot \frac{U - Bl\dot{\xi}}{R} \\ F &= \frac{BlU}{R} - \frac{(Bl)^2}{R} \dot{\xi} \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно 2-му закону Ньютона,

$$F = ma$$

где m – масса тела, a – ускорение.

Для поршня с трением и упругостью этот закон можно записать как

$$F = m\ddot{\xi} + \gamma\dot{\xi} + \chi\xi \quad (13)$$

Как и все функции перемещение поршня подчиняется закону $\xi = \xi_0 e^{-i\omega t}$, поэтому выражение (13) записывается в виде

$$F = -i\omega m\dot{\xi} + \gamma\dot{\xi} + \frac{\chi}{-i\omega} \dot{\xi} \quad (14)$$

Приравняем (12) и (14).

$$\left(-i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega}\right) \dot{\xi} = \frac{BlU}{R} - \frac{(Bl)^2}{R} \dot{\xi}$$

Отсюда

$$\dot{\xi} = \frac{BlU}{R} \cdot \frac{1}{-i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega} + \frac{(Bl)^2}{R}} \quad (15)$$

Подставим выражение (21) в (16).

$$I = \frac{U}{R} - \frac{Bl}{R} \cdot \frac{BlU}{R} \cdot \frac{1}{-i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega} + \frac{(Bl)^2}{R}}$$

$$I = \frac{U}{R} \left[1 - \frac{(Bl)^2}{R} \cdot \frac{1}{-i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega} + \frac{(Bl)^2}{R}} \right] \quad (16)$$

Электрический импеданс громкоговорителя определим по формуле $Z = \frac{U}{I}$, или, учитывая приведенные вычисления,

$$Z = \frac{R}{1 - \frac{(Bl)^2}{R} \cdot \frac{1}{-i\omega m + \gamma + \frac{\chi}{-i\omega} + \frac{(Bl)^2}{R}}} \quad (17)$$

Распишем полностью выражение для импеданса, учитывая, что $R = R_0 - i\omega L$, а коэффициент упругости $\chi = m\omega_0^2$, где ω_0 – резонансная частота.

$$Z = \frac{R_0 - i\omega L}{1 - \frac{(Bl)^2}{R} \cdot \frac{1}{-i\omega m + \gamma + \frac{m\omega_0^2}{-i\omega} + \frac{(Bl)^2}{R_0 - i\omega L}}} \quad (18)$$

Из выражения (24) видно, что функция $Z(\omega)$ включает в себя 6 постоянных коэффициентов, характеризующих механику резонатора:

$$Z = f(Bl, R_0, L, \omega_0, \gamma, m)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

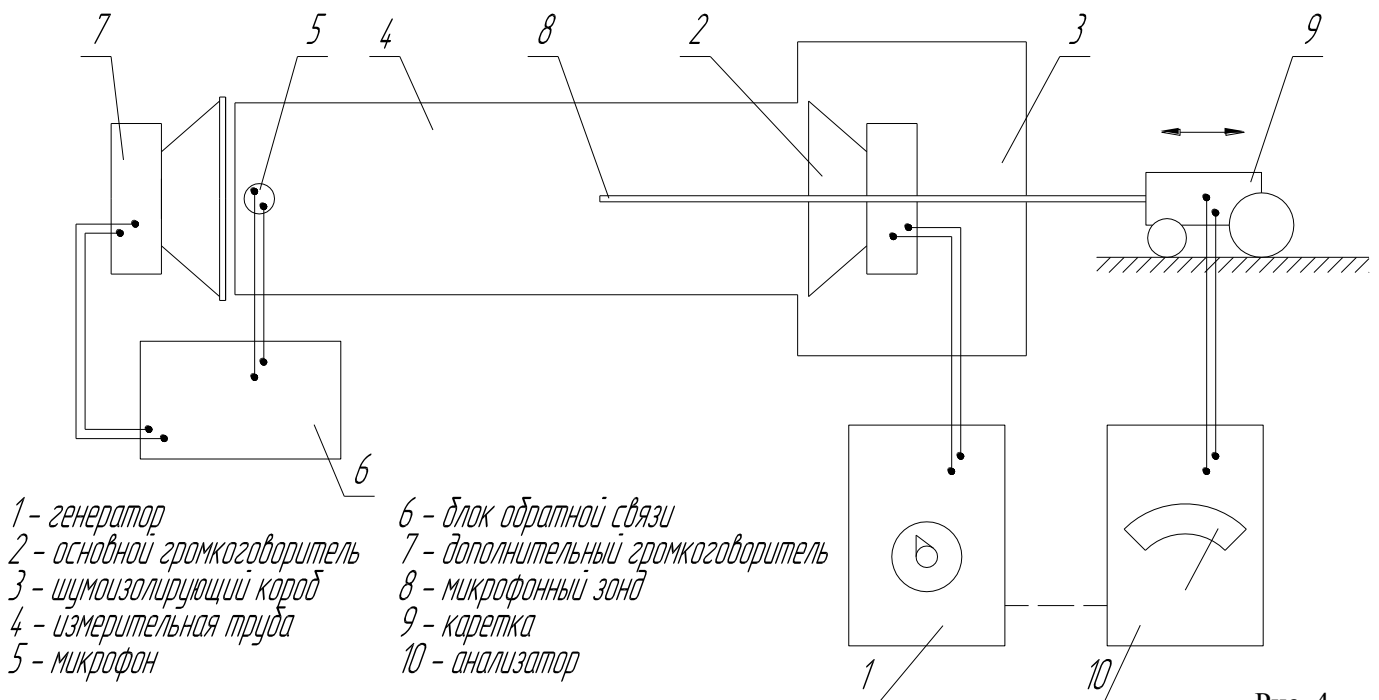


Схема экспериментальной установки

Рис. 4.

Генератор шума 1 генерирует сигнал заданной частоты. Звуковая волна распространяется по измерительной трубе 4, достигает ее конца, закрытого дополнительным громкоговорителем 7. Волна частью поглощается, а частью отражается от резонатора. В результате в трубе образуется стоячая волна. Микрофонный зонд 8 выполнен в виде тонкой металлической трубки. Один конец зонда находится в каретке 9 с размещенным в ней микрофоном, сигнал с которого подается на анализатор 10. Другой конец зонда, пропущенный через специальное отверстие в сердечнике динамика, располагается внутри трубы интерферометра. Таким образом, перемещая микрофонный зонд вместе с кареткой по направляющей рейке, можно измерять звуковое давление в различных точках внутри измерительной трубы. Измеряя максимум и минимум амплитуды стоячей волны, можно определить коэффициент поглощения резонатора.

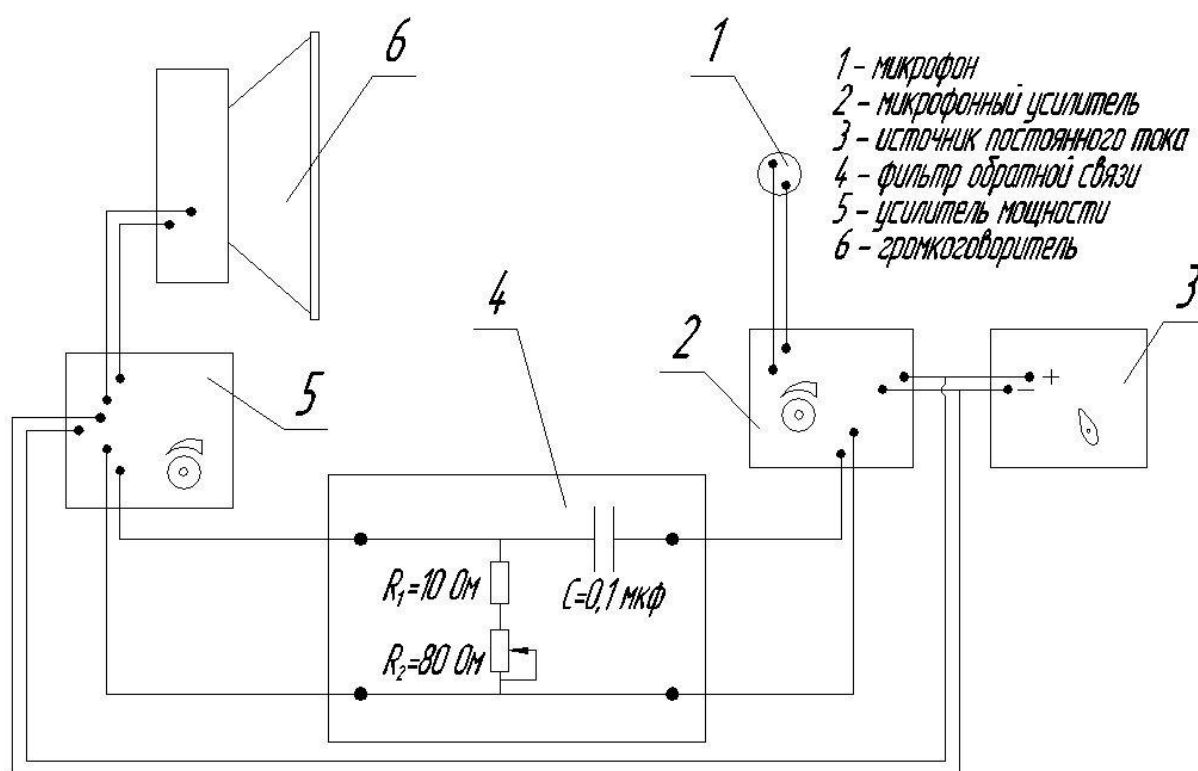


Рис. 5. Устройство обратной связи

Схема резонатора приведена на рисунке 9. Активный резонатор включает в себя микрофон 1, микрофонный предусилитель 2, корректирующий фильтр 4, усилитель мощности 5 и дополнительный громкоговоритель 6. Устройство элементов позволяет регулировать на

2,
мощности
изменять
фильтра 4.

уровень сигнала
микрофонном
предусилителе
усилителе
6, а также
сопротивление

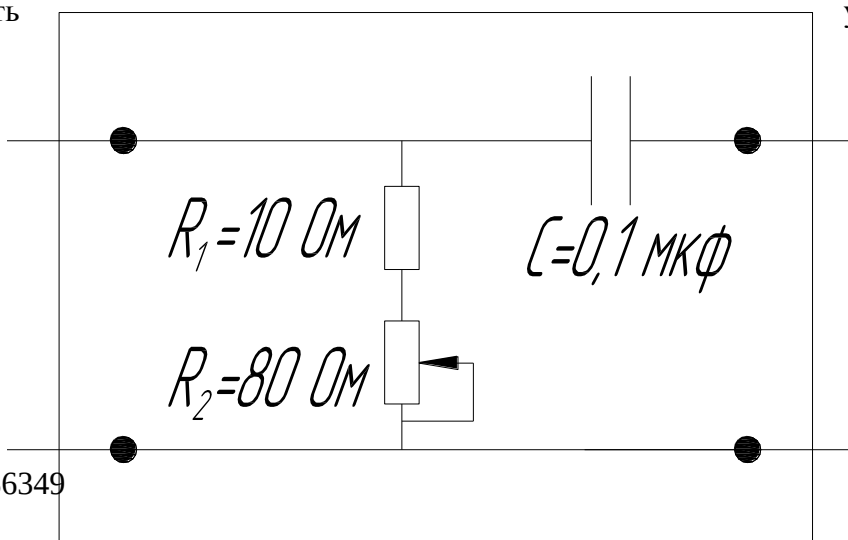


Рис. 6.
R-C цепочка

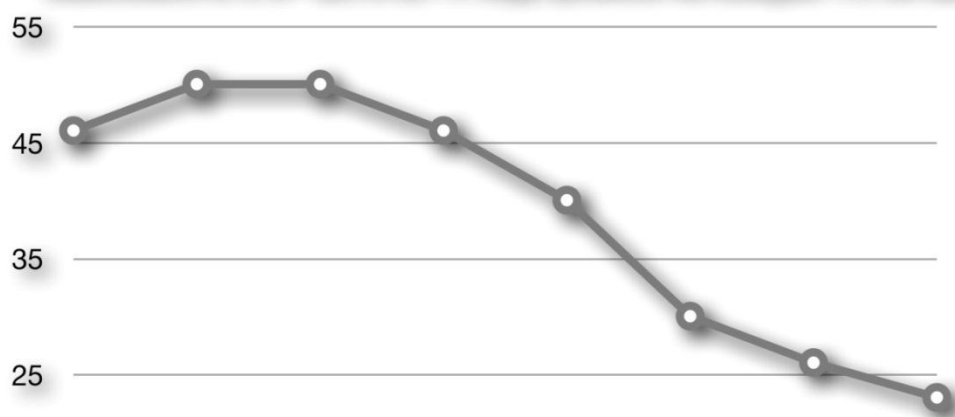
Передаточная функция такого фильтра записывается в виде

$$K = \frac{-i\omega RC}{1 - i\omega RC}$$

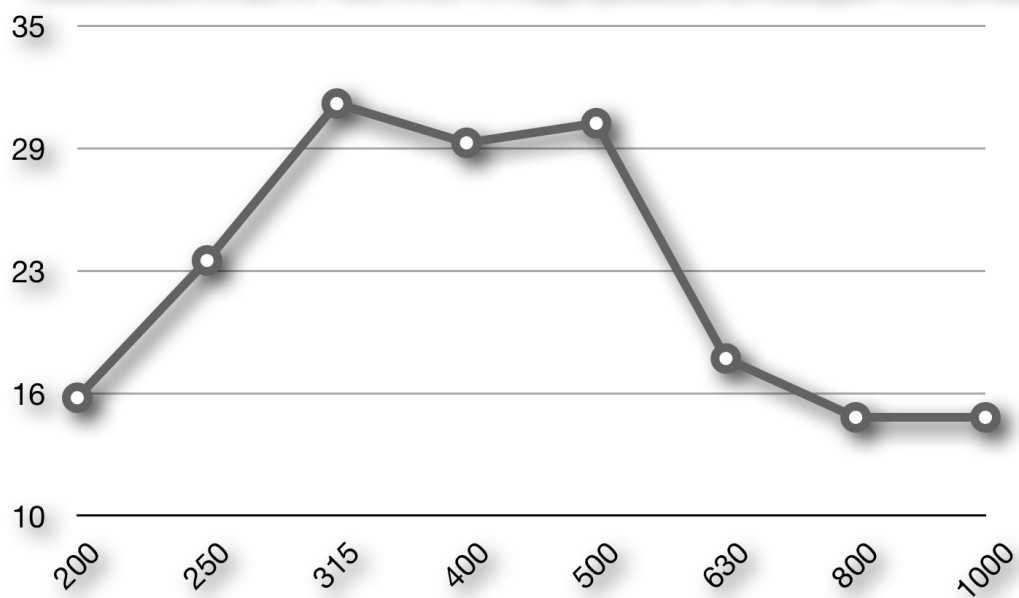
где R – сопротивление резистора, C – емкость конденсатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зависимость α от частоты f с подстройкой на каждой 1/3 октаве



Зависимость $\Delta\alpha$ от частоты f с подстройкой на каждой 1/3 октаве



ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов показывают, что был достигнут желаемый коэффициент звукопоглощения, равный 40% и более на частотах от 200 до 500 Гц.

Системы активного гашения шума могут использоваться для снижения уровня звука на низких частотах, что было исследовано и подтверждено на экспериментальных установках.

САГ являются перспективным методом снижения уровня звука на низких частотах, так как можно осуществить автоматическую подстройку САГ под звуковую волну.

Была создана установка, которая позволяет осуществлять эксперименты по активному поглощению шума, как в научных целях, так и в целях проведения лабораторных работ.

Литература

1. Комкин А.И. Активное гашение шума. Проблемы и перспективы // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 4. С. 12-18.
2. Алексеев Г.В., Комаров Е.Г. Об активном гашении звуковых полей в слоисто-неоднородных волноводах // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 1. С. 5–12.
3. Канев Н.Г., Миронов М.А. Монопольно-дипольный резонансный поглотитель в узком волноводе // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 111-116.