

случае характеристика коэффициента передачи K_p представляет собой возрастающую плавную кривую (Б1). Параллельно включенная гибкость (Б4) выражается в форме утолщения канала трубы или дополнительной плоскости, сообщающейся с каналом трубы. В этом случае реализуется спадающая частотная характеристика. Параллельная (Б2) и последовательная (Б3) комбинации в параллельном корректирующем устройстве дают характеристику с максимумом (Б2) и минимумом (Б3).

Экстремум характеристики в обоих случаях приходится на резонансную частоту корректирующего контура. Введение сопротивления в корректирующий контур вызывает сглаживание частотной характеристики.

Формулы простейших корректирующих контуров, приведенные в табл. III.5.1, позволяют найти амплитудные характеристики давления и объемной скорости на выходе акустического устройства.

§ III.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Во многих технических устройствах необходимо подавить одни частоты и выделить другие. Устройства, назначение которых состоит в том, чтобы пропускать желательный диапазон и задерживать колебания нежелательных частот, называют *фильтрами*. В зависимости от природы колебательного процесса фильтры могут быть электрическими, механическими и акустическими. Наиболее развита теория электрических фильтров, поэтому механические и акустические фильтры удобно рассматривать как аналоги электрических фильтров. Идеальные электрические фильтры, т. е. фильтры, не вносящие потерь, состоят только из реактивных сопротивлений-реактансов. Их типичная схема представляет определенное включение параллельного и последовательного корректирующих контуров. Иначе говоря, П- или Т-образная цепочка, включенная в линию, обладает свойством пропускать тот или иной диапазон частот (рис. III.6.1).

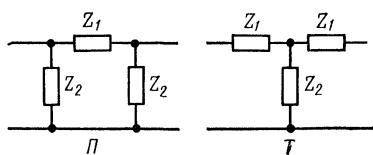


Рис. III.6.1

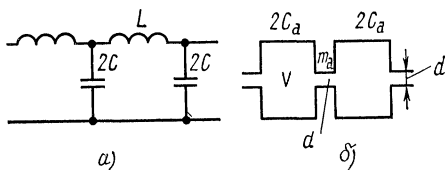


Рис. III.6.2

В теории электрических фильтров показано, что П-образная цепочка способна пропускать те или иные частоты, если отношение последовательного и параллельного импедансов удовлетворяет условию

$$0 \geq \frac{Z_1}{Z_2} \geq -4. \quad (\text{III.6.1})$$

В зависимости от вида реактансов фильтр способен пропускать тот или иной диапазон частот. В этой связи возможны четыре типа простейших фильтров: нижних частот (полоса пропускания $0 \leq \omega \leq \omega_{2p}$), верхних частот ($\omega_{2p} \leq \omega$), полосовой ($\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$) и режекторный ($0 \leq \omega \leq \omega_1$; $\omega_2 \leq \omega \leq \infty$; $\omega_1 \leq \omega_2$).

Основные свойства фильтра определяют характеристикой коэффициента передачи и граничными частотами. Остановимся подробно на примерах расчета граничных частот для простейших идеальных фильтров. При этом будем пользоваться терминами электротехники.

Фильтры нижних частот. На рис. III.6.2, *a* приведены схема и эквивалентное акустическое устройство фильтра нижних частот (*б*). В фильтрах нижних частот импеданс Z_1 имеет индуктивный характер, а шунтирующий импеданс Z_2 — емкостный. В простейшем фильтре нижних частот $Z_1 = j\omega L$, $Z_2 = 1/(j\omega C)$.

Используя условие, пропуская полосы частот (III.6.1), записанное для определения граничных частот в виде двух уравнений $Z_1(\omega) = 0$, $Z_1(\omega) + 4Z_2(\omega) = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} Z_1(\omega) = j\omega L = 0, \quad \omega_1 = 0, \\ j\omega L + 4 \frac{1}{j\omega C} = 0, \quad \omega_2 = \frac{2}{\sqrt{LC}}. \end{aligned}$$

В акустическом фильтре акустические масса и гибкость аналогичны индуктивности и емкости:

$$m_a = \frac{\rho(l + 0,25\pi d)}{S}, \quad c_a = \frac{V}{\rho c^2}.$$

Отсюда формула граничной частоты акустического фильтра нижних частот имеет вид

$$\omega_2 = \frac{2l\sqrt{S}}{\sqrt{V(l + 0,25\pi d)}}. \quad (\text{III.6.2})$$

Граничная частота фильтра нижних частот тем меньше, чем больше объем V .

Фильтры верхних частот. Если последовательный импеданс Z_1 имеет емкостный характер, а шунтирующий Z_2 — индуктивный, то фильтр пропускает все верхние частоты, начиная от некоторой граничной. Если, например, $Z_1 = 1/(j\omega C)$, $Z_2 = j\omega L$, то уравнения граничных частот записываются в виде:

$$\omega_1 = \infty, \quad \omega_2 = 1/(2\sqrt{LC}).$$

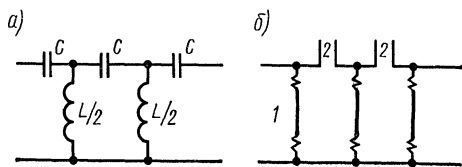


Рис. III.6.3

Электрическая схема фильтра верхних частот (рис. III.6.3, *a*) содержит последовательно соединенные емкости C , шунтированные индуктивностями $L/2$. Акустический аналог (рис. III.6.3, *б*) этой схемы представляет собой трубу l , разделенную мембранами на участки с ответвлениями 2.

Для акустического фильтра верхних частот акустические массу и гибкость выражают формулами

$$m_a = \frac{\rho(l + 0,25\pi d)}{S_1}, \quad c_a = c_m S^2,$$

где l, d, S_1 — длина, диаметр, площадь поперечного сечения ответвлений; c_m — механическая податливость мембран; S — площадь мембраны.

Граничная частота для акустического фильтра верхних частот определяется формулой

$$\omega_2 = 1/2 \sqrt{m_{a1} c_a} = \frac{1}{2V \rho S^2 c_m (l + 0,25\pi d) / S_1}, \quad (\text{III.6.3})$$

где S_1 — площадь поперечного сечения ответвления.

Полосовой фильтр. Если в последовательной цепи находятся последовательно соединенные индуктивность и емкость, а шунтирующим элементом является индуктивность, то имеем фильтр, пропускающий полосу частот от ω_1 до ω_2 . Граничные частоты этой полосы определяют из общих уравнений граничных частот, если принять

$$Z_1 = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \quad Z_2 = j\omega L, \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C} \quad \text{или} \quad Z_2 = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}.$$

Для упрощения считаем, что индуктивность L и емкость C везде одинаковы. Если шунтирование осуществлено индуктивностью, то $Z_2 = j\omega L$, а граничные частоты определяют формулами

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{5LC}}.$$

При емкостном шунте $Z_2 = 1/j\omega C$ полоса прозрачности фильтра иная:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{5}{LC}}. \quad (\text{III.6.4})$$

Если шунтирование осуществить LC -контуром, т. е.

$$Z_2 = \frac{L_2 \omega L / (\omega C)}{j\omega L + 1/(j\omega C)} = \frac{L/C}{j[\omega L - 1/(\omega C)]},$$

то при $Z_1 = j\omega L + 1/(j\omega C)$ граничные частоты имеют значения

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_2 = 0,41 \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (\text{III.6.5})$$

Акустические полосовые фильтры различных типов показаны на рис. III.6.4.

Акустические импедансы z_{a1} и z_{a2} для полосовых фильтров выражают следующими формулами:

$$z_{a1} = j \left(\omega m_{a1} - \frac{1}{\omega c_{a1}} \right), \quad z_{a2} = \frac{1}{j\omega c_{a2}}$$

(рис. III.6.4, а; c_{a1} — акустическая податливость мембраны; m_{a1} и m_{a2} — акустические массы ответвлений; рис. III.6.4, б; c_{a1} — акустическая податливость мембраны; c_{a2} — акустическая податливость объема в ответвлении);

$$z_{a_1} = j \left(\omega m_{a_1} - \frac{1}{j \omega c_{a_2}} \right), \quad z_{a_2} = j \frac{\omega^2 c_{a_2} m_{a_2} - 1}{\omega m_{a_2}}$$

(рис. III.6.4, в; m_{a_2} и c_{a_2} — акустические масса и податливость ответвления; c_{a_1} — акустическая податливость мембраны).

Из уравнений $z_{a_1}(\omega) = 0$, $z_{a_1}(\omega) + 4z_{a_2}(\omega) = 0$ находим граничные частоты для этих фильтров:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{\sqrt{c_{a_1} m_{a_1}}}, \\ \omega_2 &= \frac{1}{\sqrt{c_{a_1} m_{a_1} + 4c_{a_1} m_{a_1}}}; \\ \omega_1 &= \frac{1}{\sqrt{c_{a_1} m_{a_1}}}, \\ \omega_2 &= \frac{1}{\sqrt{m_{a_1} \frac{m_{a_1} c_{a_1} c_{a_2}}{4c_{a_1} + 2c_{a_2}}}}; \\ \omega_1 &= \frac{1}{\sqrt{c_{a_1} m_{a_1}}}, \\ \omega_2 &= \sqrt{\frac{1}{m_{a_1} c_{a_2}} + \frac{1}{m_{a_1} c_{a_1}}} \pm \\ &\quad \pm \frac{1}{\sqrt{m_{a_1} c_{a_2}}}. \end{aligned}$$

Режекторные фильтры. Если составить цепочки, в которых последовательный импеданс \bar{Z}_1 представляет собой LC -контур, а шунтирующий состоит из комбинации индуктивности и емкости, то получаем электрический фильтр, способный задерживать некоторую полосу частот. Такие фильтры называют *режекторными*. На рис. III.6.5 представлены схемы режекторных электрических (а) и акустических (б) фильтров, составленных из однородных элементов. На рис. III.6.5, в показан общий вид акустического фильтра. В акустическом фильтре c_{a_2} и m_{a_2} — акустические гибкость мембраны и масса трубки, соединенные в узел; c_{a_1} и m_{a_1} — акустические гибкость объема и масса ответвления, соединенные в цепочку.

Предельные частоты определяются уравнениями

$$\frac{z_1(\omega_1)}{z_2(\omega_1)} = 0, \quad \frac{z_1(\omega_2)}{z_2(\omega_2)} + 4 = 0. \quad (\text{III.6.6})$$

В этом случае последовательный z_{a_1} и шунтирующий акустические импедансы z_{a_2} выражаются формулами

$$z_{a_1} = \frac{j \omega m_{a_1}}{1 - \omega^2 m_{a_1} c_{a_1}}, \quad z_{a_2} = j \left(\omega m_{a_2} - \frac{1}{\omega c_{a_2}} \right) = j \frac{\omega^2 m_{a_2} c_{a_2} - 1}{\omega c_{a_2}}. \quad (\text{III.6.7})$$

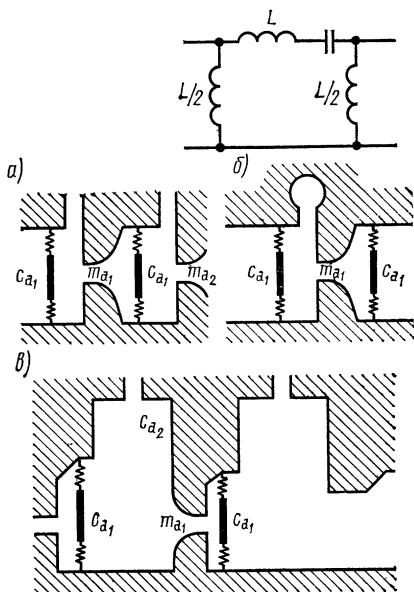


Рис. III.6.4

Первое из уравнений (III.6.6) с учетом (III.6.7) дает

$$\frac{\omega^2 m_{a_2} c_{a_2}}{(\omega^2 m_{a_2} c_{a_2} - 1)(1 - \omega^2 m_{a_1} c_{a_1})} = 0,$$

откуда $\omega_1 = 0$, $\omega_4 = \infty$.

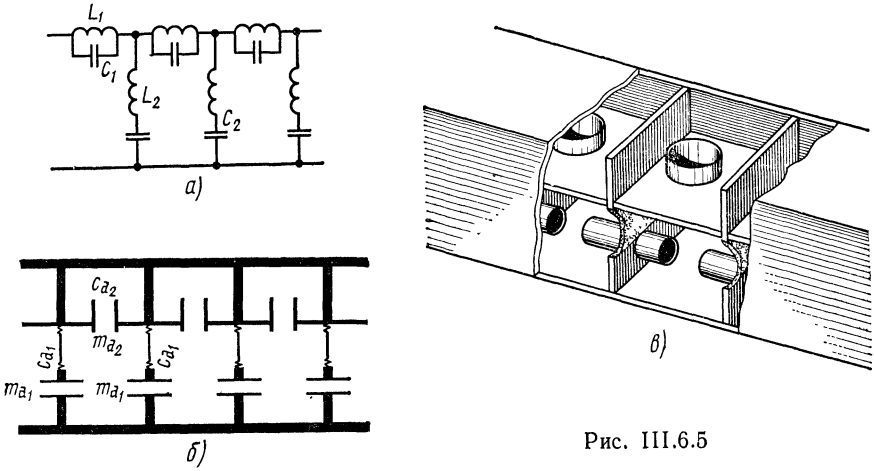


Рис. III.6.5

Второе из уравнений (III.6.6) приводит к

$$\frac{(\omega/\omega_0)^2 c_{a_2} m_{a_1} \omega_0^2}{[(\omega/\omega_0)^2 - 1]^2} - 4 = 0, \quad (III.6.8)$$

где $\omega_0 = \sqrt{1/(m_{a_1} c_{a_1})} = \sqrt{1/(m_{a_1} c_{a_2})}$.

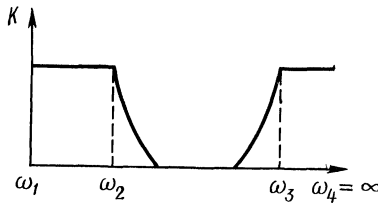


Рис. III.6.6

Решая (III.6.8), получаем выражения для граничных частот режекторного фильтра:

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{m_{a_1} c_{a_2} - 16 m_{a_1} c_{a_1}} + \sqrt{m_{a_1} c_{a_2}}}{4 m_{a_1} c_{a_1}},$$

$$\omega_3 = \frac{\sqrt{m_{a_1} c_{a_2} + 16 m_{a_1} c_{a_1}} + \sqrt{m_{a_1} c_{a_2}}}{4 m_{a_1} c_{a_1}}.$$

На рис. III.6.6 изображена типичная частотная характеристика коэффициентов передачи этих фильтров.