

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ГАСИТЕЛИ С АКТИВНЫМИ ВОЛНОВЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

2007 А. Н. Головин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Показаны принципы расчета параметров элементов несимметричных акустических гасителей колебаний при выполнении которых волновые сопротивления становятся активными. Формулируются условия реализации активных волновых сопротивлений на фиксированной частоте и в заданном диапазоне частот.

Известно [1], что для уменьшения пульсаций давления в трубопроводных топливных и гидравлических системах целесообразно использовать несимметричные гасители, имеющие с одной из сторон активное волновое сопротивление. Такие устройства по сравнению с устройствами, у которых волновые сопротивления не регламентируются, имеют ряд преимуществ. Если гаситель проектируется для конкретного источника колебаний или для конкретной системы по характеристикам волнового сопротивления гасителя, которое является противоположным активному волновому сопротивлению, то он будет эффективно работать, соответственно, в любой системе или системе с любым источником колебаний. Следовательно, такой гаситель является инвариантным к характеристикам участка системы, в сторону которого обращено активное волновое сопротивление устройства.

Рассмотрим гасители, изображенные на рис. 1.

Схема гасителя на рис. 1,а является акустическим фильтром низких частот (“АФНЧ”) с проточной полостью. Упругие свойства полости управляются дросселем 3, имеющим сопротивление R . Следующие две схемы гасителей отличаются от первой тем, что их структуры содержат резонансные контуры. Резонансный контур в каждой схеме образован инерционностью “горла” 4 и упругостью полости 1. Упругие свойства полостей у обеих схем гасителей, как и у схемы на рис. 1,а, регулируются сопротивлениями дросселей 3. Причем при определенных соотношениях между параметрами реактивных

элементов и сопротивления R волновые сопротивления гасителей со стороны дросселей 3 становятся активными.

Рассмотрим условия формирования активных волновых сопротивлений у исследуемых схем.

При сосредоточенности параметров в элементах гасителей зависимости для коэффициентов передачи устройств как акустических четырехполюсников имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + \frac{\bar{X}_1 \bar{X}_L}{\bar{X}_c (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + 1}, \\ B &= R^* \frac{\bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_L + (\bar{X}_1 + \bar{X}_2)}{\bar{X}_c (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + 1}, \\ C &= \frac{1}{R^*} \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_L}{\bar{X}_c (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + 1}, \\ D &= 1 + \frac{\bar{X}_2 \bar{X}_L}{\bar{X}_c (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + 1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Обозначения в (1):

$$\left. \begin{aligned} R^* &= \sqrt{\frac{L}{C_{np}}}; \\ \bar{X}_L &= X_L \sqrt{\frac{C_{np}}{L}}; \\ \bar{X}_c &= \bar{X}_{c,np} \sqrt{\frac{C_{np}}{L}}; \\ \bar{X}_i &= X_i \sqrt{\frac{C_{np}}{L}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

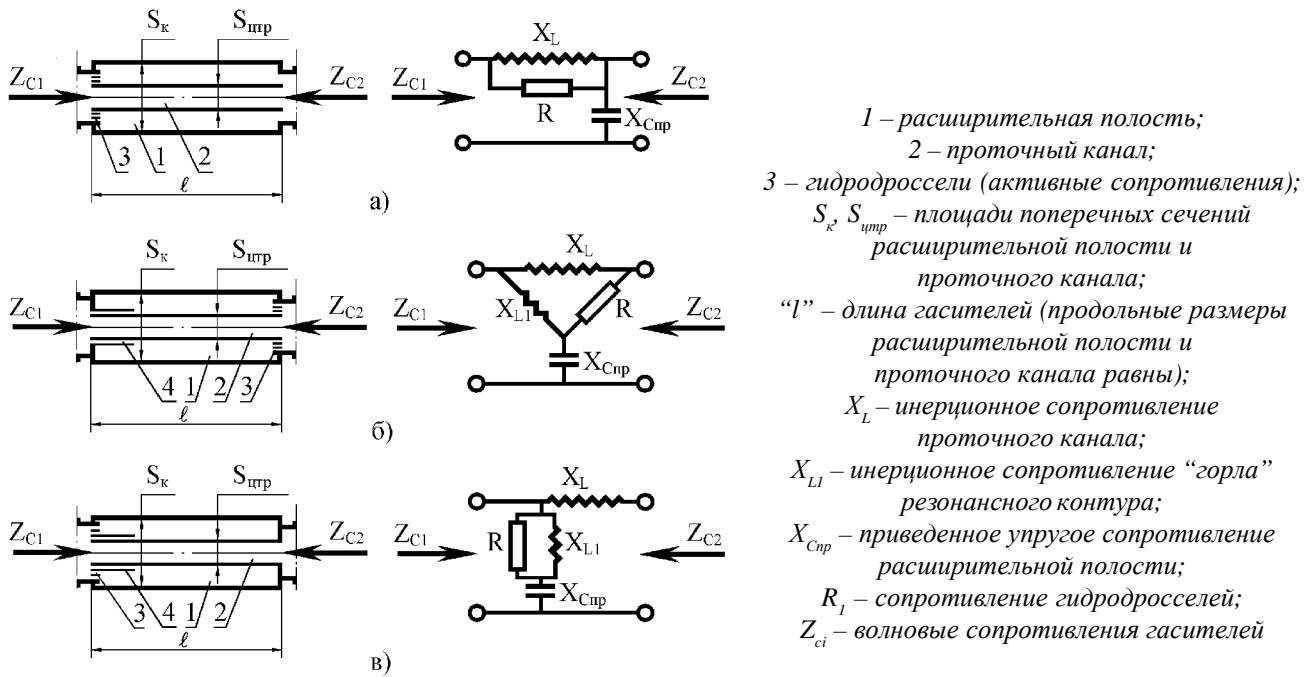


Рис. 1. Принципиальные гидравлические схемы несимметричных гасителей и их электрические аналоги

где L – инерционность проточного канала 2 гасителей; C_{np} – скорректированная упругость, равная суммарной упругости рабочей жидкости, заполняющей объемы расширительной полости и проточного канала [1],

$$\text{т. е. } C_{np} = \frac{(V_k + V_u)}{ra^2}, \quad V_k, V_u - \text{соответственно}$$

объемы полости гасителя и проточного канала. При цилиндрической полости и цилиндрическом проточном канале гасителя сопротивление \bar{X}_i вычисляется по формуле

$$\bar{X}_i = \frac{X_i \sqrt{S_v + 1}}{Z_{вц}}, \quad (3)$$

где $S_v = V_k/V_u$.

В (1) параметрами \bar{X}_i ($i = 1, 2$) обозначены комплексные сопротивления элементов, установленные на входе и выходе расширительной полости. Сопротивление \bar{X}_1 стоит на входе в расширительную полость, т. е. со стороны волнового сопротивления Z_{c1} . Сопротивление \bar{X}_2 включено на выходе из расширительной полости, т. е. со стороны волно-

вого сопротивления Z_{c2} . Для схемы гасителя на рис. 1,а: $\bar{X}_1 = R$; $\bar{X}_2 = 0$. У схемы гасителя на рис. 1,б: $\bar{X}_1 = X_{L1}$; $\bar{X}_2 = R$. На схеме рис. 1,в сопротивление \bar{X}_1 составлено параллельным соединением инерционного X_{L1} и активного R сопротивлений; $\bar{X}_2 = \infty$.

Рассмотрим гаситель, схема которого приведена на рис. 1,а. Для этого устройства зависимости волновых сопротивлений имеют следующий вид:

$$\bar{Z}_{c1} = \sqrt{\frac{(\bar{R}^2 - \bar{w} \cdot \bar{R}^2)(\bar{R}^2 - \bar{w}^2) + 2\bar{w}^2 \cdot \bar{R}^2 + j\bar{w} \cdot \bar{R}(2\bar{w} \cdot \bar{R}^2 - \bar{w}^2 - \bar{R}^2)}{(\bar{R}^2 + \bar{w}^2)^2}}; \quad (4)$$

$$\bar{Z}_{c2} = \sqrt{\frac{\bar{R}^2(1 - \bar{w}^2) - j\bar{w} \cdot \bar{R}}{\bar{R}^2(1 - \bar{w}^2)^2 + \bar{w}^2}}; \quad (5)$$

где $j = \sqrt{-1}$; $\bar{w} = w \sqrt{LC_{np}}$.

Из (4), (5) следует, что у исследуемого гасителя активным может быть только волновое сопротивление \bar{Z}_{c1} при условии

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{\bar{w}^{-2}}{2\bar{w}^{-2} - 1}}. \quad (6)$$

Равенство (6) позволяет привести выражения (4), (5) соответственно к виду:

$$\bar{Z}_{c1a} = \sqrt{0,5}; \quad (7)$$

$$|\bar{Z}_{c2}| = \frac{1}{\bar{w}}. \quad (8)$$

Таким образом, у гасителя при выполнении (6) волновое сопротивление \bar{Z}_{c1} становится активным и “не зависящим” от частоты колебаний.

Исследуем характеристики гасителя, изображенного на рис. 1,б. Выражения для коэффициентов передачи устройства получим из соотношений (1), принято в них $\bar{R}_1 = \infty$, $\bar{R}_2 = \bar{R}$. После соответствующих преобразований формулы для расчета волновых сопротивлений примут вид:

$$\bar{Z}_{c1} = \sqrt{\mu \frac{\bar{R}\bar{\omega}_p(1-\bar{\omega}_p^{-2})(1-\bar{\omega}_p^{-2}+2\mu) + j\sqrt{\mu}[\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu-\bar{\omega}_p^{-2}) - \bar{R}^2(\bar{\omega}_p^{-2}-1)^2]}{\bar{R}\bar{\omega}_p(1+\mu)(2\mu-\bar{\omega}_p^{-2}-\mu\bar{\omega}_p^{-2}) + j\sqrt{\mu}[\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu)^2 + \bar{R}^2(\bar{\omega}_p^{-2} + \mu\bar{\omega}_p^{-2} - \mu)]}}; \quad (9)$$

$$\bar{Z}_{c2} = \sqrt{\frac{\bar{R}\bar{\omega}_p\sqrt{\mu}[(1+2\mu)-2\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu)] + j\sqrt{\mu}\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu) + \bar{R}^2(1-\bar{\omega}_p^{-2})[\bar{\omega}_p^{-2} + \mu(\bar{\omega}_p^{-2}-1)]}{\bar{R}\bar{\omega}_p\sqrt{\mu}[2(1+\mu)-\bar{\omega}_p^{-2}(2+\mu)] + j[\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu)(1+\mu-\bar{\omega}_p^{-2}) + \mu\bar{R}^2(\bar{\omega}_p^{-2}-1)]}}, \quad (10)$$

где $m = L_1/L$; L_1 - инерционность “горла” резонансного контура; $\bar{w}_p = \bar{w}\sqrt{m}$.

Анализ выражений (9), (10) показывает, что характер волновых сопротивлений \bar{Z}_{c1} , \bar{Z}_{c2} зависит от соотношения параметров m , \bar{R} , \bar{w}_p и может быть активным с обеих сторон, если сопротивление \bar{R} выбрано определенным образом.

Для реализации активного волнового сопротивления со стороны \bar{Z}_{c1} сопротивление \bar{R} должно быть равно

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{\bar{\omega}_p^{-2}(1+\mu) \left[\bar{\omega}_p^{-2}(\mu^2-1) - (1+\mu) \right]}{\left(1-\bar{\omega}_p^{-2}\right) \left[\mu^2\bar{\omega}_p^{-2}(\bar{\omega}_p^{-2}-1) + \mu(\bar{\omega}_p^{-4}+1) \right]}}. \quad (11)$$

При реализации активного волнового сопротивления со стороны \bar{Z}_{c2} сопротивление \bar{R} необходимо выбирать из условия

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{\bar{w}_p^{-2}(1+m)^2 \left[\left(1-\bar{w}_p^{-2}\right)^2 + \bar{w}_p^{-2}(\bar{w}_p^{-2}-1+m) \right]}{\left(\bar{w}_p^{-2}-1\right)^2 \left[(1+m)(2+m)\bar{w}_p^{-2} - m \right]}}. \quad (12)$$

С учетом того, что в обоих случаях величина \bar{R} должна быть действительной, на рис. 2 построены области значений m и \bar{w}_p , при которых достигается реализация активных волновых сопротивлений гасителя.

Приведенные графики показывают, что существуют комбинации параметров элементов гасителя, при которых его волновые сопротивления могут быть активными с обеих сторон. Однако, небольшой проектный диапазон изменения этих параметров делает не целесообразным практическое применение такого устройства. Предпочтительным является условие реализации активного волнового сопротивления гасителя только с одной стороны, а именно со стороны \bar{Z}_{c2} . Для этого варианта, как следует из графика на рис. 2,б, возможны более широкие диапазоны изменения параметров элементов устройства. Поэтому схему гасителя на рис. 1,б желательно применять, когда требуется устройство, имеющее со стороны системы активное волновое сопротивление, а со стороны источника колебаний – реактивное.

Рассмотрим схему гасителя, приведенную на рис. 1,в. Зависимости для коэффициентов передачи получаются из соотношений (1), если принять в них $\bar{X}_1 = \infty$, $\bar{X}_2 = R$. При этих значениях параметров формулы для вычисления волновых сопротивлений имеют вид:

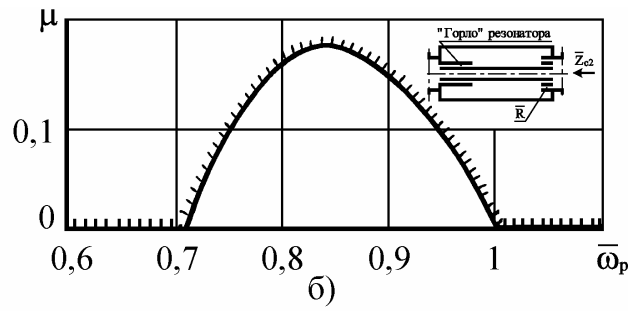
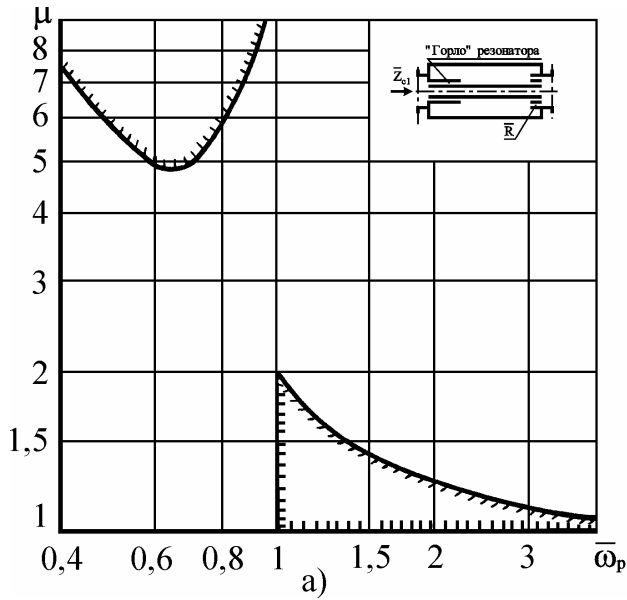


Рис. 2. Области значений m и \bar{w}_p по направлению штриховки, в которых возможна реализация активных волновых сопротивлений гасителя:
а) со стороны \bar{Z}_{c1} ; б) со стороны \bar{Z}_{c2}

$$\bar{Z}_{c1} = \sqrt{\frac{\bar{R}^2 - \bar{w}_p^2 (m + 2\bar{R}^2) + \bar{R}^2 \bar{w}_p^4 + j2\bar{R}\sqrt{m(1 - \bar{w}_p^2)}\bar{w}_p}{m\bar{R}^2 - \bar{w}_p^2 (\bar{R}^2 + m\bar{R}^2 + m^2) + m\bar{w}_p^4 + j\bar{R}\sqrt{m(2m - \bar{w}_p^2(2+m))}\bar{w}_p}}; \quad (13)$$

$$\bar{Z}_{c2} = \sqrt{\frac{m \cdot \bar{w}_p^2 (m - \bar{w}_p^2) + \bar{R}^2 [m(1 - \bar{w}_p^2) - \bar{w}_p^2] + j \cdot \bar{R} \cdot \bar{w}_p^3 \cdot m\sqrt{m}}{m(\bar{R}^2 + m\bar{w}_p^2)}}. \quad (14)$$

Выражения (13), (14) показывают, что характер волнового сопротивления \bar{Z}_{c2} инерционный, а характер волнового сопротивления \bar{Z}_{c1} зависит от значения сопротивления \bar{R} . Активный характер волнового сопротивления \bar{Z}_{c1} будет тогда, когда сопротивление \bar{R} выбрано из соотношения

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{m\bar{w}_p^2(2\bar{w}_p^2 - m)}{m(\bar{w}_p^2 - 1)^2 + 2\bar{w}_p^2(\bar{w}_p^2 - 1)}}. \quad (15)$$

Области изменения параметров m и \bar{w}_p , в которых реализуются действительные значения параметра R и, соответственно, возможны реализации активных волновых сопротивлений \bar{Z}_{c1} , представлены на рис. 3.

Графики на рис. 3 показывают, что наибольший непрерывный частотный диапазон, в котором волновое сопротивление \bar{Z}_{c1} ак-

тивное, имеет место, если $m = 2$. При других параметрах коэффициента m в окрестности частоты $\bar{w}_p = 1$ появляются области комплексных значений волнового сопротивления \bar{Z}_{c1} .

Если условие (15) выполняется, то формула для вычисления волнового сопротивления $\bar{Z}_{c1} = \bar{Z}_{c1a}$ имеет вид

$$\bar{Z}_{c1a} = \frac{\sqrt{2m[2m - (2 + 3m)\bar{w}_p^2] + (2 + m)\bar{w}_p^4}}{|2m - (2 + m)\bar{w}_p^2|}. \quad (16)$$

Выражения (15), (16) устанавливают, что в общем случае параметры \bar{R} и \bar{Z}_{c1a} зависят от частоты колебаний. Однако при условии $m = 2$, когда значение \bar{R} , необходимое для реализации активного волнового сопротивления \bar{Z}_{c1a} , определяется по формуле

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{2\bar{w}_p^2}{2\bar{w}_p^2 - 1}}, \quad (17)$$

величина \bar{Z}_{c1a} становится “не зависимой” от частоты колебаний и равной

$$\bar{Z}_{c1a} = 1. \quad (18)$$

Графики, иллюстрирующие изменение параметров \bar{R} , необходимых для реализации

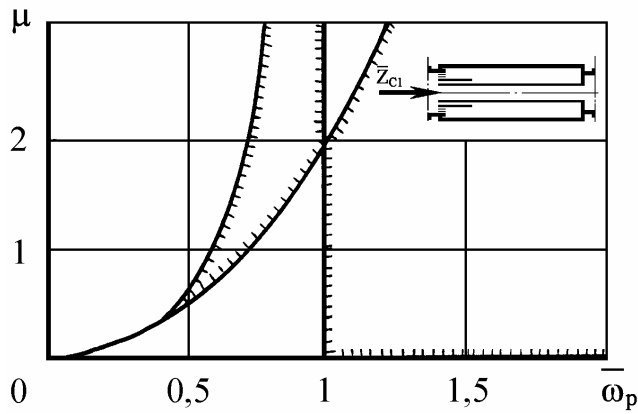


Рис. 3. Области возможных реализаций активного волнового сопротивления гасителя \bar{Z}_{c1} . Штриховка направлена в области изменения требуемых значений μ и $\bar{\omega}_p$

активного волнового сопротивления гасителя \bar{Z}_{c1a} при различных коэффициентах m ($m \leq 2$), приведены на рис. 4.

Анализ графиков показывает, что требуемые сопротивления \bar{R} зависят от частоты колебаний. При вариациях параметра m также изменяются значения сопротивления \bar{R} , необходимые для обеспечения активности волнового сопротивления \bar{Z}_{c1} . Минимальный интервал изменения сопротивления \bar{R} , равный $[\sqrt{2}; 1]$, имеет место при условии $m = 2$. Однако на практике в конструкциях гасителей обычно используют дроссели с постоянным сопротивлением \bar{R} . Поэтому ис-

следуем возможность реализации активного волнового сопротивления гасителя в некотором диапазоне частот $[\bar{\omega}_{p1}; \bar{\omega}_{p2}]$ при сопротивлении $\bar{R} = const$. Для этого используем формулу для коэффициента рассогласования [1]

$$\Gamma_w = \left| \frac{\bar{Z}_{ci} - \bar{Z}_{cia}}{\bar{Z}_{ci} + \bar{Z}_{cia}} \right|, \quad (19)$$

по которой проведем расчеты зависимости Γ_w . Рассчитаем зависимости коэффициентов рассогласования Γ_w , например, при значениях: $m = 2$, $\bar{Z}_{c1a} = 1$ и $\bar{R} \in [\sqrt{2}; 1]$. Результаты вычислений приведены на рис. 5. Их анализ

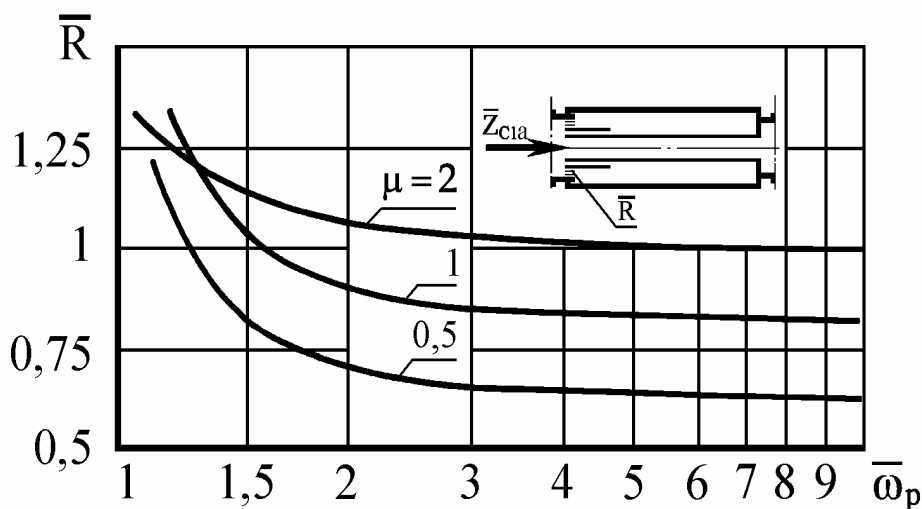


Рис. 4. Зависимости сопротивления гидродросселя \bar{R} , необходимые для реализации активного волнового сопротивления гасителя \bar{Z}_{c1a}

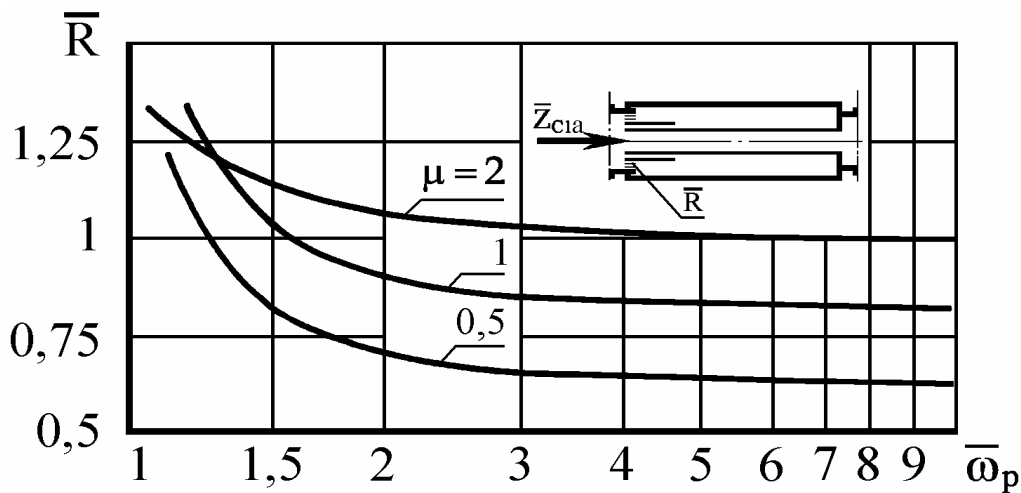


Рис. 5. Зависимости коэффициентов рассогласования Γ_ω при $m = 2$ и реализации активного волнового сопротивления гасителя $\bar{Z}_{cl\alpha} = 1$

дает следующее. Имеются частотные диапазоны колебаний, в которых реализуются небольшие значения коэффициентов Γ_ω . При этих частотах из-за небольших значений коэффициентов Γ_ω волновое сопротивление гасителя можно считать постоянным и равным $\bar{Z}_{cl\alpha}$. Для рассматриваемого варианта расчета $\bar{Z}_{cl\alpha} = 1$. Оптимальное сопротивление дросселя \bar{R}_{opt} , необходимое для работы гасителя в частотном диапазоне $[\bar{\omega}_{p1}; \bar{\omega}_{p2}]$, выбирается из условия равенства значений коэффициентов рассогласования на границах проектного интервала частот. Это требование записывается в виде

$$\Gamma_{\omega 1} = \Gamma_{\omega 2}. \quad (20)$$

Для определения оптимального сопротивления \bar{R}_{opt} нужно в равенство (20) подставить развернутые выражения (19) и про-

извести соответствующие вычисления.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Волновые сопротивления несимметричных гасителей при определенных соотношениях между параметрами их элементов могут быть активными.

2. Особенность выбора параметров элементов гасителей состоит в том, что необходимо определять их оптимальные соотношения для каждого рабочего частотного диапазона.

3. Характеристики элементов гасителей следует рассчитывать, исходя из минимальных значений коэффициентов рассогласования.

Список литературы

1. Головин А. Н. Разработка гасителей колебаний жидкости для трубопроводных цепей двигателей и систем летательных аппаратов: Диссертация на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Куйбышев, 1983.