

## НЕСИММЕТРИЧНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ГАСИТЕЛИ С АКТИВНЫМИ ВОЛНОВЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

© 2005 А. Н. Головин

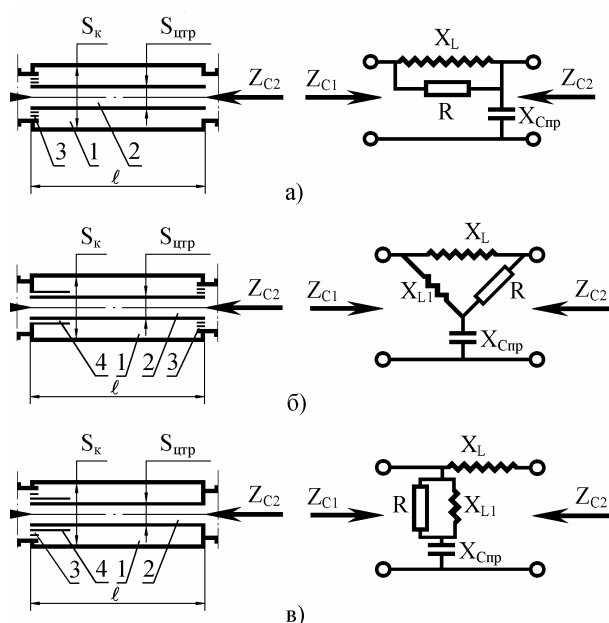
Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены схемы несимметричных акустических гасителей колебаний и предложен алгоритм формирования параметров элементов, при которых у гасителей одно или оба волновых сопротивления становятся активными на фиксированной частоте или близких к активным в определенной области 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. Прежде всего, необходимо отметить следующее. 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 инвариантен к характеристикам того участка системы, в сторону которого обращено активное волновое сопротивление устройства.

Рассмотрим гасители, изображенные на рис. 1.

Схема гасителя на рис. 1а 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. 1а, регулируются сопротивлениями дросселей 3.



**Рис. 1.** Принципиальные гидравлические схемы несимметричных гасителей и их электрические аналоги: 1 – расширительная полость; 2 – проточный канал;  $S_k, S_{штр}$  – площади поперечных сечений расширительной полости и проточного канала;  $l$  – длина гасителей (продольные размеры расширительной полости и проточного канала равны);  $X_L$  – инерционное сопротивление проточного канала;  $X_{L1}$  – инерционное сопротивление "горла" резонансного контура;  $X_{Cсп}$  – приведенное упругое сопротивление расширительной полости;  $R$  – сопротивление гидродросселей;  $Z_{C1}$  – волновые сопротивления гасителей

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

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

Обозначения в формулах (1) следующие:

$$R^* = \sqrt{\frac{L}{C_{пр}}}; \quad \bar{X}_L = X_L \sqrt{\frac{C_{пр}}{L}}, \quad (2)$$

$$\bar{X}_C = \bar{X}_{с.пр} \sqrt{\frac{C_{пр}}{L}}; \quad \bar{X}_i = X_i \sqrt{\frac{C_{пр}}{L}},$$

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

$$C_{пр} = \frac{(V_k + V_{ц})}{\rho \alpha^2}, \text{ где } V_k, V_{ц} \text{ – соответственно, объемы полости гасителя и проточного канала. При цилиндрической полости и цилиндрическом проточном канале гасителя параметр } \bar{X}_i \text{ определяется выражением}$$

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

где  $S_v = V_k/V_{ц}$ .

В формуле (1) параметром  $\bar{X}_i$  ( $i=1,2$ ) обозначены комплексные сопротивления элементов, установленные на входе и выходе расширительной полости. Сопротивление  $\bar{X}_1$  стоит на входе в расширительную по-

лость, т. е. со стороны волнового сопротивления  $Z_{c1}$ . Сопротивление  $\bar{X}_2$  включено на выходе из расширительной полости, т. е. со стороны волнового сопротивления  $Z_{c2}$ . Для схемы гасителя на рис.1а:  $\bar{X}_1 = R$ ;  $\bar{X}_2 = 0$ . У схемы гасителя на рис.1б:  $\bar{X}_1 = X_{L1}$ ;  $\bar{X}_2 = R$ . На схеме рис.1в: 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.1а. Для этого устройства зависимости волновых сопротивлений следующие:

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

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

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\bar{\omega} = \omega \sqrt{LC_{пр}}$ .

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

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

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

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

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

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

Исследуем характеристики гасителя, изображенного на рис.1б. Выражения для

коэффициентов передачи устройства получим из соотношений (1), если принять в них  $\bar{R}_1 = \infty$ ,  $\bar{R}_2 = \bar{R}$ . После соответствующих преобразований формулы для расчета волновых сопротивлений примут вид:

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

(9)

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

(10)

где  $\mu = L_1/L$ ;  $L_1$  - инерционность "горла" резонансного контура;  $\bar{\omega}_p = \bar{\omega}\sqrt{\mu}$ .

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

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

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

(11)

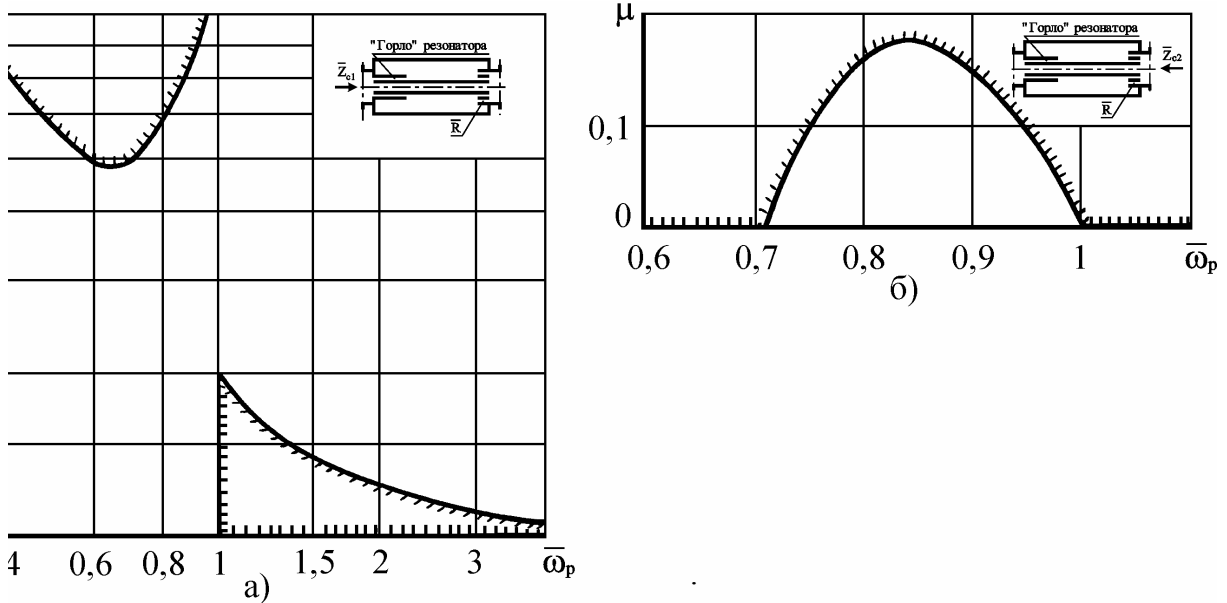
При реализации активного волнового сопротивления со стороны  $\bar{Z}_{c2}$  сопротивление  $\bar{R}$  необходимо выбирать из условия

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

(12)

Учитывая, что в обоих случаях величина  $\bar{R}$  должна быть действительной, на рис.2 построены области значений  $\mu$  и  $\bar{\omega}_p$ , при которых возможна реализация активных волновых сопротивлений гасителя.

Приведенные графики показывают, что возможны комбинации параметров элементов гасителя, при которых его волновые сопротивления могут быть активными с обеих сторон. Однако, небольшой проектный



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

диапазон изменения этих параметров делает не целесообразным практическое применение такого гасителя. 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.2б, возможны более широкие комбинации параметров элементов устройства. Поэтому схеме гасителя на рис.1б желательно применять, когда требуется устройство, имеющее со стороны системы активное волновое сопротивление, а со стороны источника колебаний реактивное.

Рассмотрим схему гасителя, приведенную на рис. 1в. 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 устройства имеют вид:

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

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

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

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

Области изменения параметров  $\mu$  и  $\bar{\omega}_p$ , в которых реализуются действительные величины  $\bar{R}$  и, соответственно, возможны ре-

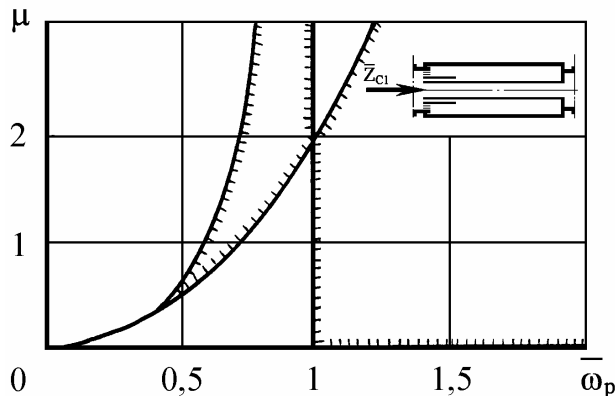


Рис. 3. Области возможных реализаций активного волнового сопротивления гасителя  $\bar{Z}_{c1}$ . Штриховка направлена в области изменения требуемых значений  $\mu$  и  $\bar{\omega}_p$ .

ализации активных волновых сопротивлений  $\bar{Z}_{c1}$ , представлены на рис. 3.

Графики на рис. 3 позволяют определить, что наибольший непрерывный частотный диапазон в котором волновое сопротивление  $\bar{Z}_{c1}$  активное возможен, если  $\mu = 2$ . При других значениях параметра  $\mu$  в окрестности  $\bar{\omega}_p = 1$  появляются области, в которых волновое сопротивление  $\bar{Z}_{c1}$  комплексное.

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

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

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

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

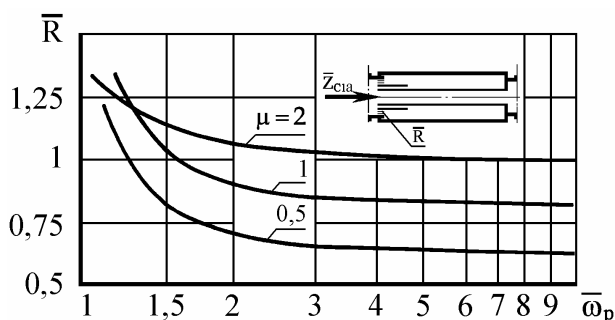


Рис. 4. Зависимости сопротивления гидродросселя  $\bar{R}$ , необходимые для реализации активного волнового сопротивления гасителя  $\bar{Z}_{cia}$

величина  $\bar{Z}_{cia}$  становится “независимой” от частоты колебаний и равной

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

Графики, иллюстрирующие изменение значений параметров  $\bar{R}$ , необходимых для реализации активного волнового сопротивления гасителя  $\bar{Z}_{cia}$  при различных значениях  $\mu$  ( $\mu \leq 2$ ), приведены на рис. 4.

Исследование графиков показывает, что требуемые значения сопротивления дросселя  $\bar{R}$  зависят от частоты колебаний. При вариациях параметра  $\mu$  также изменяются значения сопротивления  $\bar{R}$ , необходимые для обеспечения активности волнового сопротивления  $\bar{Z}_{ci}$ . Минимальный интервал изменение сопротивления дросселя  $\bar{R}$ , равный  $[\sqrt{2}; 1]$  имеет место при значении  $\mu = 2$ . Однако на практике в конструкциях гасителей обычно используют дроссели с постоянным сопротивлением  $\bar{R}$ . Поэтому исследуем возможность реализации активного волнового сопротивления гасителя в некотором диапазоне частот  $[\bar{\omega}_{p1}; \bar{\omega}_{p2}]$  при сопротивлении  $\bar{R} = \text{const}$ . Для этого используем формулу для коэффициента рассогласования

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

по которой проведем расчеты зависимости  $\Gamma_{\omega}$ . Рассчитаем зависимости коэффициен-

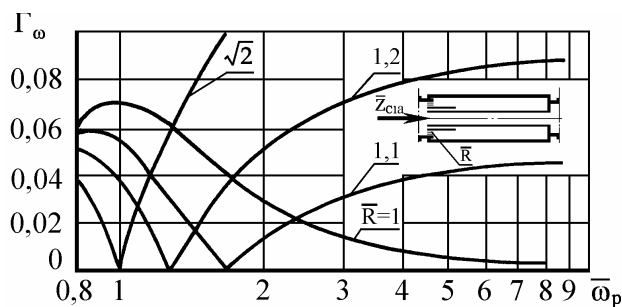


Рис. 5. Зависимости коэффициентов рассогласования  $\Gamma_{\omega}$  при  $\mu=2$  и реализации активного волнового сопротивления гасителя  $\bar{Z}_{cia} = 1$

тов рассогласования  $\Gamma_{\omega}$ , например, при значениях  $\mu = 2$ ,  $\bar{Z}_{cia} = 1$  и  $\bar{R} \in [\sqrt{2}; 1]$ . Результаты вычислений коэффициентов  $\Gamma_{\omega}$  приведены на рис. 5. Их анализ позволяет сделать следующие выводы. Имеются частотные диапазоны колебаний, в которых реализуются небольшие значения коэффициентов  $\Gamma_{\omega}$ . В этих частотных диапазонах из-за небольших значений коэффициентов  $\Gamma_{\omega}$  волновое сопротивление гасителя можно считать постоянным и равным  $\bar{Z}_{cia}$ . Для рассматриваемого варианта расчета  $\bar{Z}_{cia} = 1$ .

Оптимальное сопротивление дросселя  $\bar{R}_{\text{опт}}$ , необходимое для работы гасителя в частотном диапазоне  $[\bar{\omega}_{p1}; \bar{\omega}_{p2}]$ , выбирается из условия равенства значений коэффициентов рассогласования на границах проектного частотного диапазона. Это требование записывается в виде

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

Для определения оптимального значения  $\bar{R}_{\text{опт}}$  нужно в равенство (20) подставить развернутые выражения (19) и произвести соответствующие вычисления.

### Выводы

1. Показано, что 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. Предложено характеристики элементов гасителей рассчитывать исходя из минималь-

ных значений коэффициентов рассогласования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Головин А.Н.* Эффективность гасителей колебаний // Известия Самарского научного центра РАН, 2004. Т.6. №2.

### **ASYMMETRICAL ACOUSTIC DEMPERS WITH ACTIVE WAVE RESISTANCE**

© 2005 A.N. Golovin

Samara State Aerospace University

The circuits asymmetrical acoustic dampers of fluctuations are considered and the algorithm of elements parameters formation is offered at which at dampers one or both wave resistance become active on the fixed frequency or close to active in the frequencies certain area.