

4. При вычислении частот изгибно-крутильных колебаний закрученных лопаток переменного сечения необходимо одновременно учитывать податливость заделки при изгибе как относительно минимальной, так и максимальной оси инерции поперечного сечения.

5. Предложенный метод учета влияния податливости заделки обеспечивает достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений собственных частот колебаний лопаток.

ЛИТЕРАТУРА

1. РТМ 24.026.05—74. Расчет собственных частот и форм колебаний длинных лопаток.

2. Зоробьев Ю. С., Шульженко Н. Г. Исследование колебаний систем элементов турбоагрегатов. — Киев: Наукова думка, 1978. — 135 с.

3. *Joshio Hirota, Akio Hizume, Jasuo Nakagami, Joshiki Kogoya* Recent Technology in Large Steam Turbines, Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review, v. 15, № 3, 1978.

4. *Боришанский К. Н.* Влияние податливости заделки на собственные частоты рабочих лопаток паровых турбин. — Проблемы прочности, 1980, № 1. — с. 98—102.

5. *Лурье А. И.* Пространственные задачи теории упругости. — М.: Госгиздат, 1955. — 491 с.

6. *O'Donnel W. J.* The Additional Deflection of a Cantilever Due to the Elasticity of the Support, Transactions of the ASME, journal of Applied Mechanics, v. 27, 1960. — p. 461—464.

7. *Шемитов А. З.* Приближенное определение частоты собственных тангенциальных колебаний коротких лопаток паровых турбин. — Котлотурбостроение, 1947, № 1. — с. 29—31.

УДК 534.284:532.542

И. Д. Быстров

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО РС—ФИЛЬТРА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕПИ С ДРОССЕЛЕМ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При стендовой и летной доводке компрессоров газотурбинных двигателей находят применение зонды для измерения пульсаций давления, включающие в свой состав волноводные каналы и датчики давления. Для повышения точности измерения

пульсационной составляющей давления используются дифференциальные датчики, в частности малогабаритные дифференциальные датчики типа ДМИ. Согласующие RC -фильтры, входящие в состав зондов, позволяют обеспечить необходимую равномерность передачи колебаний в заданном частотном диапазоне [1]. В тех случаях, когда необходима регистрация низких частот, габариты и вес акустических фильтров резко возрастают. В этой связи целесообразно разделить функции одного акустического фильтра между двумя элементами. При этом один элемент должен использоваться как элемент согласования волновода с нагрузкой, а второй — как элемент подавления высокочастотных колебаний. Тогда первый элемент может быть выполнен в виде сосредоточенного корректирующего дросселя [2], а второй, подавляющий акустический фильтр, целесообразно выполнить в виде RC -схемы с большой величиной сопротивления дросселя фильтра.

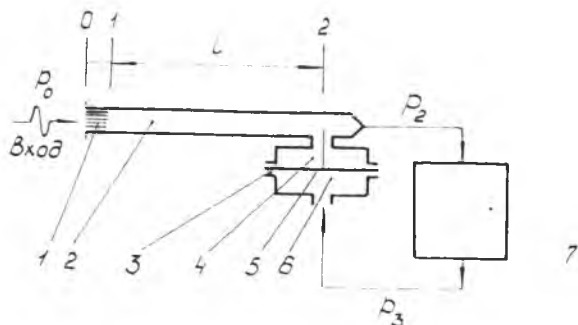


Рис. 1. Принципиальная схема волноводной цепи дифференциальной схемы: 1 — дроссель коррекции частотной характеристики; 2 — подводящий волноводный канал; 3 — дифференциальный преобразователь давления; 4 — динамическая камера преобразователя; 5 — чувствительный элемент преобразователя; 6 — статическая камера преобразователя; 7 — акустический фильтр низкой частоты

Рассмотрим дифференциальную цепь с сосредоточенным дросселем коррекции частотной характеристики, установленным на входе (рис. 1). Для обоснованного выбора параметров фильтра в дифференциальной цепи с дросселем коррекции допустимо рассматривать идеализированный волновод и полагать, что сопротивление дросселя коррекции Z_d есть активная величина, равная волновому сопротивлению подводящего канала (т. е. $Z_d = \text{Re} Z_d$, $\text{Re} Z_d = Z_w$, $Z_w = \frac{\rho c}{S}$, где $\text{Re} Z_d$ — действительная

составляющая сопротивления дросселя; Z_B — волновое сопротивление подводящего канала; ρ — плотность рабочей среды; c — скорость звука; S — площадь поперечного сечения волновода); объемы полостей дифференциального датчика давления малы по сравнению с объемом волноводного канала; акустический фильтр состоит из одной ячейки и составлен из линейных сосредоточенных элементов; входное акустическое сопротивление дифференциального датчика — бесконечно большая величина.

На основании принятых допущений для характерных сечений цепи можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} p_0 - p_1 &= Z_B q_1; \\ p_1 &= p_2 \cos \frac{\omega l}{c} + j q_2 Z_B \sin \frac{\omega l}{c}; \\ q_1 &= j \frac{1}{Z_B} p_2 \sin \frac{\omega l}{c} + q_2 \cos \frac{\omega l}{c}; \\ p_2 &= Z_\Phi q_2; p_2 = a_{11} p_3, \end{aligned} \right\} (1)$$

где p_0, p_1, p_2, p_3 — комплексные амплитуды колебаний давления в соответствующих точках цепи; q_1, q_2 — комплексные амплитуды колебаний объемного расхода в соответствующих точках цепи; l — длина подводящего канала; ω — угловая частота колебаний давления; Z_Φ — входное сопротивление акустического фильтра; a_{11} — коэффициент матрицы передачи акустического фильтра.

Решая систему уравнений (1) относительно частотных функций $W_1(j\omega)$ и $W_2(j\omega)$, получим:

$$W_1(j\omega) = \frac{p_2}{p_0} = \frac{1}{1 + \frac{Z_B}{Z_\Phi}} \frac{1}{\cos \frac{\omega l}{c} + j \sin \frac{\omega l}{c}}; \quad (2)$$

$$W_2(j\omega) = \frac{p_2 - p_3}{p_2} = \frac{a_{11} - 1}{a_{11}}. \quad (3)$$

Функция $W_1(j\omega)$ определяет передачу колебаний по волноводу к датчику, а $W_2(j\omega)$ характеризует эффективность подавления колебаний акустическим фильтром низкой частоты.

В целом передающие свойства цепи оцениваются общей передаточной функцией

$$W_0(j\omega) = W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega).$$

С учетом зависимостей (2) и (3)

$$W_0(j\omega) = \frac{a_{11} - 1}{a_{11}} \frac{1}{1 + \frac{Z_B}{Z_\Phi}} \frac{1}{\cos \frac{\omega l}{c} + j \sin \frac{\omega l}{c}}. \quad (4)$$

На основании выражения (4) получаем модуль $W_0(j\omega)$:

$$|W_0(j\omega)| = \left| \frac{a_{11}-1}{a_{11}} \right| \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_n}{Z_\phi}} \right|, \quad (5)$$

Из зависимости (5) следует, что динамические погрешности передачи колебаний давления в дифференциальной цепи будут зависеть от параметров акустического фильтра.

В качестве акустического фильтра в данной статье рассмотрен RC -фильтр, параметры которого в случае большой величины сопротивления дросселя можно реализовать при малых габаритах фильтра. Для RC -фильтра согласно [3]

$$a_{11} = 1 + j\omega RC;$$

$$Z_\phi = R + \frac{1}{j\omega C};$$

где R — активное сопротивление дросселя фильтра; C — акустическая емкость расширительной камеры фильтра.

С учетом a_{11} и Z_ϕ и на основании выражения (5) получим

$$|W_0(j\omega)| = \left| \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC \left(1 + \frac{Z_n}{R}\right)} \right|. \quad (6)$$

Предполагая процесс в расширительной камере фильтра изотермическим и вводя нормированные параметры, преобразуем выражение (6) к виду:

$$|W_0(j\bar{\omega})| = \frac{1}{\left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\bar{\omega}\bar{V}\bar{R}\right)^2} + \left(1 + \frac{1}{\bar{R}}\right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (7)$$

где $\bar{\omega}$ — нормированная угловая частота колебаний (нормирование производится по первой резонансной частоте заглушенного на выходе канала длиной l без потерь); $\bar{V} = \frac{V}{lS}$ — нормированный объем расширительной камеры фильтра; V — геометрический объем расширительной камеры фильтра; $\bar{R} = \frac{R}{Z_n}$ — нормированное сопротивление дросселя фильтра. На рис. 2 в качестве примера приведены результаты расчета $|W_0(j\bar{\omega})|$ по соотношению (7).

Таким образом, из выражения (7) и рис. 2 видно, что погрешность передачи давления по цепи зависит от частоты $\bar{\omega}$ и нормированных параметров фильтра. Согласно выражению (7),

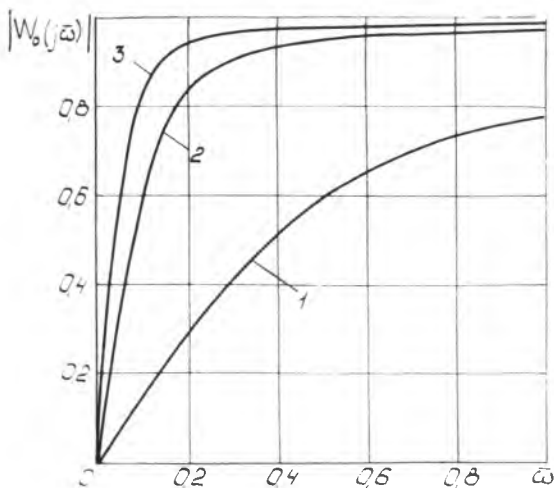


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики дифференциальной цепи при $V = 0,1$: 1 — $\bar{R} = 10$; 2 — $\bar{R} = 50$; 3 — $\bar{R} = 100$

амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассматриваемой цепи имеет асимптоту по параметру $\bar{\omega}$, т. е.:

$$|W_0(j\bar{\omega})|_{\bar{\omega} \rightarrow \infty} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\bar{R}}} \quad (8)$$

Следовательно, АЧХ дифференциальной цепи с RC -фильтром и дросселем коррекции на входе в канал в рамках принятых допущений теоретически не может достигать единицы.

Поскольку $|W_0(j\bar{\omega})|$ приближается к своему асимптотическому значению снизу, можно оценить величину нужного нормированного сопротивления для обеспечения необходимой точности передачи колебаний при достаточно больших нормированных частотах колебаний.

На основании выражения (8) можно записать

$$|W_0(j\bar{\omega})| = 1 - \delta_{\text{пм}} \quad (9)$$

где $\delta_{\text{пм}}$ — наименьшая допустимая погрешность передачи колебаний давления.

С учетом выражений (8) и (9) находим

$$\bar{R} = \frac{1 - \delta_{\text{пм}}}{\delta_{\text{пм}}} \quad (10)$$

Соотношение (10) позволяет по выбранному значению $\delta_{\text{нм}}$ назначить величину нормированного сопротивления дросселя фильтра. Например, если $\delta_{\text{нм}} = 0,01$, то $\bar{R} \approx 10^2$.

Аналогичный результат может быть получен значительно проще при рассмотрении взаимодействия прямых и отраженных волн на входе в акустический фильтр. Согласно [4], можно записать

$$p_{2 \text{ отр}} = p_{2 \text{ пр}} h_2.$$

где $p_{2 \text{ отр}}$, $p_{2 \text{ пр}}$ — комплексные амплитуды давления в отраженной и прямой волнах давления соответственно; h_2 — коэффициент отражения волны давления в сечении 2.

Поскольку на входе цепи установлен дроссель с волновым сопротивлением, то в случае больших входных сопротивлений фильтра $p_{2 \text{ пр}} = \frac{1}{2} p_0$.

Тогда

$$p_2 = p_{2 \text{ пр}} + p_{2 \text{ отр}} = \frac{1}{2} p_0 (1 + h_2).$$

Откуда

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{1}{2} (1 + h_2). \quad (11)$$

Запишем выражение для коэффициента отражения давления для сечения 2. Согласно [4]

$$h_2 = \frac{\bar{Z}_\Phi - 1}{\bar{Z}_\Phi + 1}, \quad (12)$$

где $\bar{Z}_\Phi = \frac{Z_\Phi}{Z_0}$.

С учетом зависимости (12) выражение (11) запишется в виде

$$\left| \frac{p_2}{p_0} \right| = \left| \frac{\bar{Z}_\Phi}{\bar{Z}_\Phi + 1} \right|. \quad (13)$$

Поскольку в качестве акустического фильтра принят RC — фильтр, то записав уравнение

$$\left| \frac{\bar{Z}_\Phi}{\bar{Z}_\Phi + 1} \right| = 1 - \delta_{\text{нм}}$$

и пренебрегая реактивной составляющей сопротивления \bar{Z}_Φ , получим:

$$\bar{Z}_\Phi \approx \bar{R} = \frac{1 - \delta_{\text{нм}}}{\delta_{\text{нм}}}. \quad (14)$$

При оценке нерабочего частотного диапазона цепи от 0 до $\omega_{\text{гп}}$ очевидно, что погрешность передачи может быть несколько

увеличена по сравнению с $\delta_{\text{нм}}$. Обозначим наибольшую допустимую погрешность передачи цепи через $\delta_{\text{нб}}$ и используя выражение (7), запишем следующее уравнение:

$$\left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2} \omega_{\text{гр}} \bar{V} \bar{R} \right)^2} + \left(1 + \frac{1}{\bar{R}} \right)^2 \right]^{-1/2} = 1 - \delta_{\text{нб}}. \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно нормированного объема \bar{V} , находим:

$$\bar{V} = \frac{2}{\pi \bar{R} \omega_{\text{гр}}} \left[\frac{1}{(1 - \delta_{\text{нб}})^2} - \left(1 + \frac{1}{\bar{R}} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (16)$$

Таким образом, последовательность определения параметров RC -фильтра в дифференциальной цепи с дросселем коррекции такова:

- 1) по $\delta_{\text{нм}}$ определяется нормированное сопротивление дросселя фильтра \bar{R} (зависимость (14));
- 2) по заданной частоте $\omega_{\text{гр}}$ и найденному \bar{R} по зависимости (16) находим \bar{V} ;
- 3) размерные величины сопротивления и объема находим по выражениям:

$$R = Z_{\text{в}} \bar{R}; \quad V = \bar{V} \cdot S \cdot l.$$

При конструктивной реализации фильтра следует иметь в виду, что малые габариты дросселя и фильтра в целом могут быть достигнуты при использовании так называемого капиллярно-стержневого дросселя. Методика расчета параметров капиллярно-стержневого дросселя приведена в работе [5]. Расчет и конструктивная реализация расширительной камеры имеются в работе [1]. Таким образом, предложены соотношения, позволяющие производить выбор параметров RC -фильтра в дифференциальной цепи с дросселем коррекции в заданной полосе частот колебаний давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Н. Д. К определению параметров акустического RC -фильтра коррекции частотной характеристики газо-гидравлических цепей дифференциальной схемы. Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт имени академика С. П. Королева Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР. Куйбышев, 1982, 15 с. библиограф. назв. (Рукопись деп. в ЦНИИТЭИриборостроения 25.03.82 № 1783 Пр-Д82).

2. Быстров Н. Д., Гимадиев А. Г., Шорин В. П. Об одной схеме выравнивания амплитудно-частотных характеристик акустических каналов систем измерения давления. — Изв. вузов: Авиационная техника, 1981, № 3. — 22—26 с.

3. Босый Н. Д. Электрические фильтры. — Киев.: ГИТЛ УССР, 1960. — 616 с.
4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. — М.: МГУ, 1960. — 336 с.
5. Быстров Н. Д., Гимадиев А. Г. Расчет акустического РС — фильтра нижних частот для дифференциальных преобразователей пульсаций давления. — Измерительная техника, 1982, № 2 — 41—43 с.

УДК 539.4.013

В. С. Вигант, В. А. Радченко, И. А. Холмянский

РАСЧЕТ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лопатки авиадвигателей работают в сложных силовых и температурных условиях и относятся к числу наиболее ответственных деталей. Соединяются лопатки с дисками с помощью замков различных конструкций, из которых наиболее распространены «елочные» замки.

Для оценки надежности авиадвигателей важнейшее значение имеет рассмотрение вопросов напряженного состояния и концентрации напряжений в замковых соединениях лопаток. Обычные методы расчетов на прочность не позволяют получить полную картину напряженного состояния замковых конструкций, в особенности распределения напряжений в области концентраторов [1]. В настоящее время для численного анализа напряженно-деформированного состояния тел сложной формы широко используется метод конечных элементов (МКЭ).

В работе исследуется напряженное состояние замкового соединения турбинных лопаток с диском типа «елочка» одного из турбореактивных двигателей методом конечных элементов. Исследуется величина концентрации напряжений.

Реализующая программа написана на языке ФОРТРАН для ЕС ЭВМ. Программа позволяет решать плоскую задачу теории упругости.

Для построения сетки конечных элементов используется подпрограмма автоматического разбиения плоской области на треугольные элементы, которая позволяет автоматически генерировать информацию о координатах и номерах узлов по небольшому числу начальных данных [2].

Основная идея заключается в том, что исходная область предварительно разбивается на зоны, которые описываются как