

УДК 534.1 : 539.3 : 624.07 : 621.165

В.А. ЦИМБАЛЮК

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев

ФЛАТТЕРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХРЯДНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКИ ПРОФИЛЕЙ

Экспериментально определены нестационарные аэродинамические силы и моменты на профилях двухрядной компрессорной решетки при поступательных и угловых колебаниях профилей каждого ряда. Проанализировано силовое взаимодействие профилей такой решетки при помощи аэродинамических коэффициентов влияния. Выполнены расчеты устойчивости к флаттеру двухрядного лопаточного венца при двух углах атаки с учетом влияния на границу флаттера междурядного соотношения собственных частот лопаток.

двухрядная решетка профилей, устойчивость к флаттеру, аэродинамические коэффициенты влияния

Введение

Минимизация числа ступеней осевого компрессора, и вследствие этого понижение размера и веса двигателя, всегда было целью проектировщика. Одним из путей для достижения этой цели является применение двухрядных (тандемных) лопаточных венцов, в которых лопатки соседних рядов образуют щели для увеличения скорости потока над выпуклой поверхностью лопаток второго ряда (рис. 1). Это позволяет увеличить угол отклонения потока при сохранении безотрывного обтекания решетки, тем самым уменьшить число ступеней [1], например, шахтных вентиляторов [2]. С появлением лопастей малого относительного удлинения увеличился интерес к тандемному облопачиванию для увеличения нагрузки на решетке и улучшения ее нерасчетных эксплуатационных характеристик [3].

1. Формулирование проблемы

Аэродинамическое взаимовлияние лопаток увеличивается с уменьшением расстояния между ними, а в двухрядной решетке расстояние между рядами существенно меньше шага решетки. Это обстоятельство может существенно повлиять на устойчивость двухрядного лопаточного венца к автоколебаниям, однако автору неизвестны работы по исследованию флаттерной устойчивости двухрядных решеток.

Цель данной работы состоит в оценке аэродинамического взаимовлияния между колеблющимися профилями и в изучении влияния на границу флаттера двухрядного лопаточного венца различий в собственных частотах лопаток, которые принадлежат разным рядам.

На рис. 1 схематично представлена развертка цилиндрического периферийного сечения двухрядного компрессорного венца.

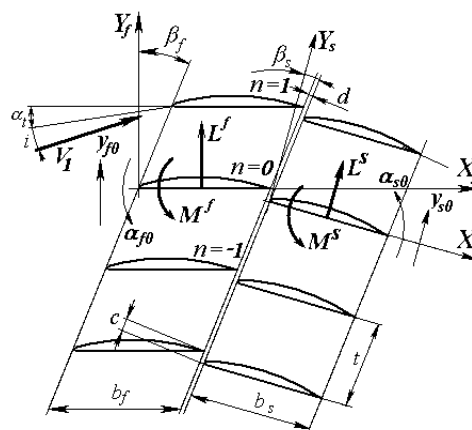


Рис. 1. Двухрядная решетка профилей: b_f, b_s — хорды профилей; t — шаг решетки; β_f, β_s — углы выноса; i — угол атаки; d — расстояние между рядами; c — смещение рядов вдоль фронта

При колебаниях лопаток перемещения сечения любой из них можно разложить на поступательное вдоль оси Y и угловое α относительно середины хорды профиля. Возникающие при этом погонные нестационарные аэродинамические нагрузки на

профиле можно представить в виде силы L и момента M (влиянием перемещений вдоль оси X и силой в этом направлении можно пренебречь). Параметры, относящиеся к первому ряду, будем обозначать индексом « f », а ко второму – « s ».

Нестационарные аэродинамические нагрузки представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} L^f &= qb_f \sum_{n=-1}^1 (l_{yfn}^f \cdot \bar{y}_{fn} + \dots + l_{\alpha sn}^f \cdot \alpha_{sn}); \\ L^s &= qb_s \sum_{n=-1}^1 (l_{yfn}^s \cdot \bar{y}_{fn} + \dots + l_{\alpha sn}^s \cdot \alpha_{sn}); \\ M^f &= qb_f^2 \sum_{n=-1}^1 (m_{yfn}^f \cdot \bar{y}_{fn} + \dots + m_{\alpha sn}^f \cdot \alpha_{sn}); \\ M^s &= qb_s^2 \sum_{n=-1}^1 (m_{yfn}^s \cdot \bar{y}_{fn} + \dots + m_{\alpha sn}^s \cdot \alpha_{sn}), \end{aligned} \quad (1)$$

где L^f , L^s , M^f и M^s – погонные силы и моменты на исходных (нулевых) профилях 1 и 2 рядов; q – скоростной напор невозмущенного потока перед решеткой; $\bar{y}_{fn}$, $\bar{y}_{sn}$ – поступательное перемещение n -го профиля в долях его хорды для 1 и 2 ряда соответственно; α_{fn} , α_{sn} – угловое перемещение n -го профиля для 1 и 2 ряда соответственно; l_{yfn}^f , ..., $l_{\alpha sn}^s$ – силовые аэродинамические коэффициенты влияния (АКВ), верхний индекс означает ряд, на исходном профиле которого действует сила, нижний индекс означает элементарное перемещение, вызвавшее эту силу; m_{yfn}^f , ..., $m_{\alpha sn}^s$ – моментные АКВ. Например, АКВ m_{ysn}^f соответствует той части нестационарного момента на нулевом профиле первого ряда, которая вызвана поступательными колебаниями у n -го профиля второго ряда. АКВ являются комплексными величинами, так как учитывают сдвиг фаз между аэродинамической нагрузкой и вызвавшим ее перемещением профиля. Для учета влияния перемещений профилей $n = -1; 0; 1$, нужна матрица из 48 АКВ. Влиянием более удаленных пакетов пренебрегаем.

2. Нестационарные аэродинамические характеристики двухрядной компрессорной решетки

Методика измерения нестационарных аэродинамических сил и моментов изложена в [4].

Экспериментально получены матрицы АКВ двухрядной компрессорной решетки, которая имела следующие геометрические характеристики.

Углы выноса $\beta_f = 35^\circ$; $\beta_s = 17^\circ$; относительный шаг $\bar{t} = t/b_f = 1,07$; расстояние между рядами $d = 0$, смещение рядов вдоль фронта $\bar{c} = c/b_f = 0,135$.

Профили 1 и 2 ряда одинаковы и образованы плоскостью и дугой окружности с закругленной передней кромкой, относительная толщина 10% хорды.

Хорды $b_f = b_s = 28$ мм.

Решетка была испытана при углах атаки 0° и 5° .

На рис. 2 представлены АКВ, характеризующие силы от поступательных перемещений переднего и заднего исходных профилей. Так как на переднем профиле мнимая часть силы от его собственных колебаний отрицательна, то поступательные колебания этого профиля при неподвижных остальных будут демпфироваться.

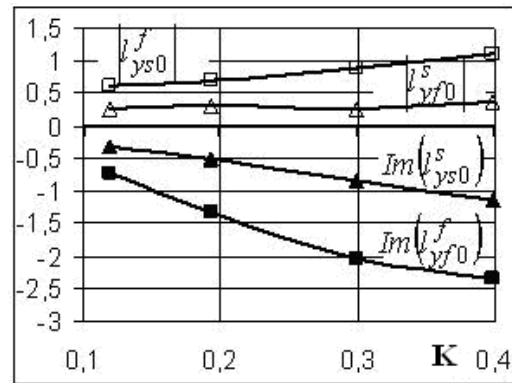


Рис. 2. Зависимости силовых АКВ при поступательных перемещениях от приведенной частоты при угле атаки 0°

Аналогичное заключение можно сделать и для поступательных перемещений заднего профиля. Так как мнимые части l_{yf0}^f и l_{ys0}^s увеличиваются с уменьшением приведенной частоты, то может най-

тись такая приведенная частота, когда влияние соседних профилей превысит собственное аэродемпфирование.

На рис. 3 и 4 представлены АКВ, характеризующие силы и моменты от угловых перемещений в зависимости от приведенной частоты, угол атаки 5° .

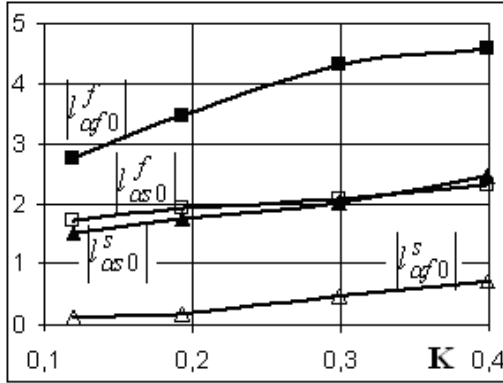


Рис. 3. Зависимости силовых АКВ при угловых перемещениях от приведенной частоты.

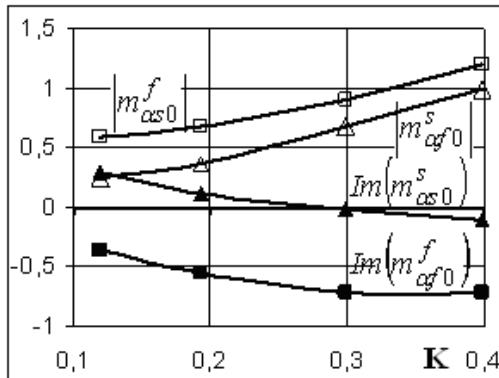


Рис. 4. Зависимости моментных АКВ при угловых перемещениях от приведенной частоты.

На рис. 4 мнимая часть m^s_{asn} становится положительной при малых приведенных частотах. Это означает, что задний профиль неустойчив при угловых колебаниях даже при неподвижных остальных профилях решетки ($\text{Im}(m^s_{asn}) > 0$). Взаимовлияние лопаток лишь ухудшит ситуацию.

Следует отметить, что силы (моменты) на переднем профиле, вызванные колебаниями заднего профиля, значительно превышает обратное влияние (например, см. на рис. 2 модуль АКВ l^f_{ys0} и l^s_{yf0}).

3. Математическая модель колебаний двухрядного лопаточного венца в потоке

В расчетной модели лопаточного венца использованы следующие предположения: механическая связь между лопатками отсутствует; моменты инерции и упругости, действующие на колеблющиеся лопатки, значительно превышают аэродинамические; перемещения поперечных сечений закрученных лопаток для изгибной формы колебаний будем рассматривать как угловые перемещения относительно оси, находящейся за задней кромкой на расстоянии X_{tf} и X_{ts} от середины хорды этих сечений; каждая лопатка приведена к осциллятору с одной степенью свободы, а лопаточный венец – к системе с числом степеней свободы, которое равно числу лопаток.

Двухрядный лопаточный венец из $2N$ лопаток будем рассматривать как циклически однородную структуру, которая состоит из N одинаковых пакетов лопаток. Каждый пакет имеет две лопатки, которые можно обозначить « f » и « s » (см. рис. 1).

Используя АКВ можно определить обобщенные аэродинамические коэффициенты моментов приведенных к осям X_{tf} и X_{ts} [5]:

$$\bar{m}^f_{fn} = \frac{1}{qb_f^2} \int_0^h q(z) b_f(z)^2 \tilde{m}^f_{fn\alpha} \varphi_f^2 dz, \quad (2)$$

где $\tilde{m}^f_{fn\alpha} = m^f_{fn\alpha} - \frac{X_{tf}}{b_f} (m^f_{fny} + l^f_{fn\alpha}) + \left(\frac{X_{tf}}{b_f} \right)^2 l^f_{fny}$;

q и b_f и b_s – скоростной напор и хорды лопаток в сечении $z = h$; φ_f и φ_s – форма колебаний; h – длина лопаток. Аналогично найдем обобщенные аэродинамические коэффициенты $\bar{m}^f_{sn}$, $\bar{m}^s_{fn}$ и $\bar{m}^s_{sn}$.

При угловых колебаниях лопаток относительно осей X_{tf} и X_{ts} аэродинамические моменты на лопатках нулевого пакета:

$$M^f = q \cdot b^2 \sum_{n=-1}^1 (\bar{m}^f_{fn} \alpha_{fn} + \bar{m}^f_{sn} \alpha_{sn}); \quad (3)$$

$$M^s = q \cdot b^2 \sum_{n=-1}^1 (\bar{m}_{fn}^s \alpha_{fn} + \bar{m}_{sn}^s \alpha_{sn}) . \quad (4)$$

Уравнения движения лопаточного венца можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_{fk} + j \frac{\delta_{mech}}{\pi} \omega^2 \alpha_{fk} + \Omega_f^2 \alpha_{fk} &= \frac{M^f}{I} ; \\ \ddot{\alpha}_{sk} + j \frac{\delta_{mech}}{\pi} \omega^2 \alpha_{sk} + \Omega_s^2 \alpha_{sk} &= \frac{M^s}{I} ; \end{aligned} \quad (5)$$

(k = 1, 2, ..., N) ,

где Ω_f и Ω_s – собственные частоты лопаток; δ_{mech} – механический логарифмический декремент; k – номер пакета; $I_f = \int_0^h \phi_f^2 \bar{I}_f dz$; $I_s = \int_0^h \phi_s^2 \bar{I}_s dz$; $\bar{I}_f$ и $\bar{I}_s$ – погонные моменты инерции.

На границе динамической устойчивости колебания лопаток будут гармоническими, а в силу циклической симметрии амплитуды колебаний пакетов и сдвиг фаз между пакетами будут одинаковы. Поэтому решение системы уравнений будем искать в виде

$$\alpha_{fn} = \alpha_f \cdot e^{j(\omega t + n\mu)} ; \alpha_{sn} = \alpha_s \cdot e^{j(\omega t + n\mu)} , \quad (6)$$

где α_f и α_s – комплексные амплитуды, учитывающие сдвиг фаз между лопатками «f» и «s»; μ – сдвиг фаз между пакетами. Таким образом, задача определения границы флаттера данного лопаточного венца сводится к определению границы устойчивости пакета при условии минимизации скорости флаттера по отношению к сдвигу фаз μ , который может принимать следующие значения:

$$\mu = 2\pi(m-1)/N, \quad (m = 1, 2, \dots, N). \quad (7)$$

Подставим эти колебания (6) в уравнения (5), разделим на ω и выразим скорость потока V через приведенную частоту колебаний K ($V = \omega b_f / K$). Получим для пакета уравнения движения в безразмерном виде:

$$\begin{cases} -\alpha_f + j \frac{\delta_{mech}}{\pi} \alpha_f + \frac{1}{\omega^2} \Omega_{fs}^2 \alpha_f = a_f ; \\ -\alpha_s + j \frac{\delta_{mech}}{\pi} \alpha_s + \frac{1}{\omega^2} \alpha_s = a_s , \end{cases} \quad (8)$$

где ρ – плотность воздуха;

$$a_f = \frac{\rho b_f^4}{2I_f \cdot Sh^2} \sum_{n=-1}^1 (\bar{m}_{fn}^f \cdot \alpha_f + \bar{m}_{sn}^f \cdot \alpha_s) e^{jn\mu} ;$$

$$a_s = \frac{\rho b_s^4}{2I_s \cdot Sh^2} \sum_{n=-1}^1 (\bar{m}_{fn}^s \cdot \alpha_f + \bar{m}_{sn}^s \cdot \alpha_s) e^{jn\mu} ;$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{f0}} ; \quad \bar{\Omega}_{fs} = \frac{\Omega_f}{\Omega_s} . \quad (9)$$

Полагая (аналогично работе [6]), что на границе устойчивости $1/\bar{\omega}^2 = \lambda$, приходим к задаче на собственные значения.

В результате решения характеристического уравнения получаем комплексные корни λ , из которых можно определить коэффициент устойчивости $\delta = -\max \text{Im}(\lambda)$.

При $\delta > 0$ движение устойчиво, при $\delta < 0$ – неустойчиво.

Приведенные частоты, соответствующие границе флаттера ($\delta = 0$) будут критическими. Подставляя собственные значения в (8) найдем собственные векторы, которые характеризуют отношение амплитуд лопаток первого и второго ряда и сдвиг фаз между их колебаниями.

4. Расчет флаттерной устойчивости двухрядного лопаточного венца

Ниже приводятся результаты расчетов границ динамической устойчивости двухрядного лопаточного венца при разных отношениях собственных частот лопаток первого и второго ряда, разных положениях осей поворота периферийных сечений.

На рис. 5 представлены зависимости критических приведенных частот и отношения амплитуд от отношения собственных частот при углах атаки 0° и 5° . Видно, что при сближении собственных частот лопаток обоих рядов устойчивость двухрядного лопаточного венца снижается, а минимального значения достигает когда собственные частоты лопаток первого ряда примерно на 1% выше собственных частот лопаток второго ряда.

Если различие собственных частот рядов более 5 – 6%, устойчивость повышается, а влияние собственных частот рядов становится незначительным. При автоколебаниях амплитуды второго ряда в несколько раз превышают амплитуды первого ряда.

На рис. 6 отображается влияние на критические приведенные частоты отношения собственных частот и разных положений оси поворота сечения. При одновременном удалении назад осей поворота сечений обоих рядов от профиля устойчивость не только повышается, но и значительно ослабляется влияние на устойчивость отношения собственных частот.

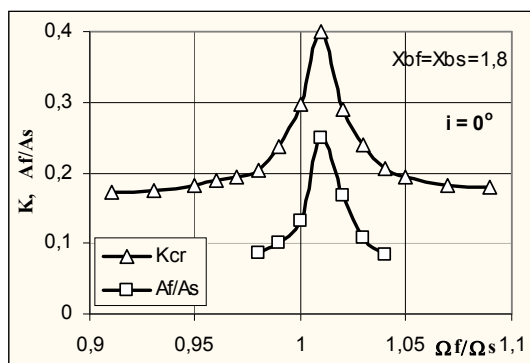


Рис. 5. Зависимости критической приведенной частоты и отношения амплитуд от отношения собственных частот при нулевом угле атаки

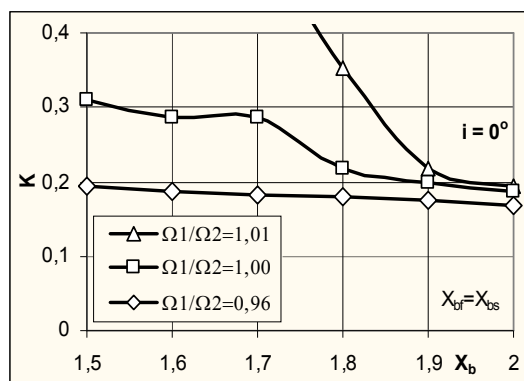


Рис. 6. Зависимости критической приведенной частоты от положения оси поворота сечения для разных отношений собственных частот

Заключение

1. Двухрядный лопаточный венец неустойчив по крутильной форме колебаний лопаток в исследованном диапазоне приведенных частот.

2. Обнаружено более сильное влияние колебаний заднего профиля на передний, чем переднего профиля на задний.

3. Динамическая устойчивость минимальна, когда собственные частоты лопаток первого ряда примерно на 1% выше, чем у лопаток второго ряда.

4. Для повышения устойчивости первой формы колебаний двухрядного лопаточного венца желательно использование малозакрученных лопаток, у которых ось поворота периферийных сечений достаточно удалена назад.

Литература

1. Гостелову Дж. Аэродинамика решеток турбомашин. – М.: Мир, 1987. – 392 с.
2. Батяев Е.А., Курзин В.Б., Чернышева О.В. Обратная задача аэродинамики двойной решетки осевого вентилятора // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т. 5, № 2. – С. 167-174.
3. Saha U.K., Roy B. Experimental Investigations on Tandem Compressor Cascade Performance at Low Speeds // Experimental Thermal and Fluid Science, April 1997. – Vol. 14, Issue 3. – P. 263-276.
4. Цимбалюк В.А. Методика измерения нестационарных аэродинамических сил и моментов на вибрирующих профилях решетки // Пробл. прочности. – 1996. – № 2. – С. 100-109.
5. Горелов Д.Н., Курзин В.Б., Сарен В.Э. Аэродинамика решеток в нестационарном потоке. – Н-ск: Наука, 1971. – 272 с.
6. Цимбалюк В.А. Влияние аэродинамической и частотной расстройек на границу флаттера компрессорного венца // Проблемы машиностроения. – 2006. – Т. 9, №3. – С. 21-26.

Поступила в редакцию 4.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.П. Зиньковский, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.