

УДК 621.51.226.2.53

А.А. ХОРИКОВ

Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ДАТЧИКАМИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА

Изложены основы метода исследования колебаний лопаток компрессоров по сигналам с датчиков измерения радиального зазора. Предложена математическая модель диагностики колебаний, на основе которой выявлены диагностические признаки различных видов колебаний лопаток. Апробация метода выполнена применительно к исследованию флаттера лопаток. Отмечены преимущества предложенного метода перед другими методами исследования колебаний лопаток.

радиальный зазор, колебания, лопатки, корпус, напряжения, диагностика, флаттер

### Введение. Постановка задачи

Для обеспечения высокого аэродинамического качества вентиляторов и компрессоров в мировом гражданском авиадвигателестроении в последнее время наметилась устойчивая тенденция оптимизации радиальных зазоров. Эта перспективная технология получила термин "активное управление зазорами", в основе которой лежит измерение и регулирование текущего значения зазоров в зависимости от эксплуатационного режима и выработанного ресурса. Измерение радиальных зазоров является также актуальным в процессе стендовой доводки лопаточных машин для исключения касания рабочих лопаток о корпус.

Целью данной работы является разработка метода диагностики колебаний лопаток на основе регистрации и последующего спектрального анализа сигналов с датчиков зазора. По своей тематической направленности эта работа близка к технике бесконтактного измерения колебаний лопаток [1]. Однако в отличие от работы [1], в данной работе предлагается метод, при котором для диагностики колебаний не требуется специального устройства типа ЭЛУРА, а вся диагностика базируется на анализе тонкой структуры спектров сигналов с уже имеющихся в корпусе турбомшины датчиков зазора.

При этом датчик желательно, но не обязательно, устанавливать над той частью периферийного сечения лопатки, которая имеет наибольшую амплитуду по контролируемой форме колебаний. Важным обстоятельством является также наличие закрученности лопатки или конусность наружного контура, чтобы при колебаниях лопатки происходило заметное изменение зазора, которое позволит определить уровень вибрационных напряжений. На рис. 1 представлена связь напряженно-деформированного состояния лопатки и радиального зазора при колебаниях лопатки 1-й ступени компрессора с коническим наружным контуром (расчеты проведены С.С. Калачевым).

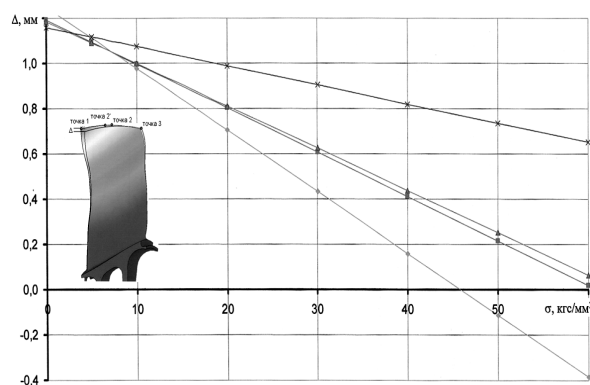


Рис. 1. Зависимость изменения радиального зазора от переменных напряжений для рабочей лопатки 1-й ступени КВД на максимальных частотах вращения:  $\diamond$  – точка 1;  $\square$  – точка 2';  $\triangle$  – точка 2;  $\times$  – точка 3

### Математическая модель диагностики колебаний лопаток по датчикам радиального зазора

Будем считать лопаточный венец однородным, в котором лопатки находятся на податливом диске. Соответствующая деформационная картина венца и сигналов с датчиков зазора представлены на рис. 2

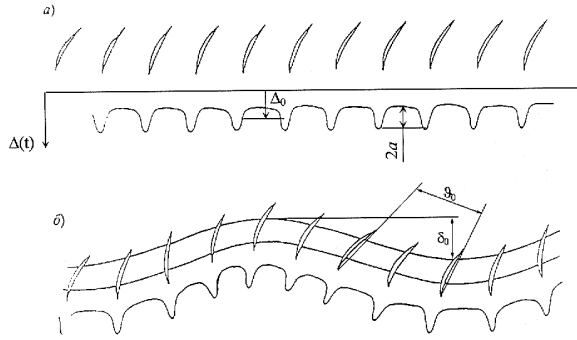


Рис. 2. Деформационные картины и соответствующие им сигналы с датчиков изменения зазоров: а – неколеблущаяся решетка профилей; б – решетка профилей на податливом диске при бегущих волнах деформации

Предполагаем в первом приближении гармонический характер изменения зазора  $\Delta$ :

$$\Delta(t, n) = \Delta_0 [1 + a \cos(\omega t - \varphi_{on})], \quad (1)$$

где  $\omega_p = 2\pi f_p N$ ;  $\varphi_{on} = 2\pi n / N$  – угловая координата;  $f_p$  – частота вращения;  $N$  – количество лопаток в колесе,  $n$  – порядковый номер лопатки;  $a$  – амплитуда переменной составляющей зазора. Начало отсчета может быть выбрано на любой лопатке.

При возникновении флаттера лопаток бегущая по колесу волна деформации с числом волн  $z$  угловая координата  $\varphi_{on}$  в формуле (1) делается переменной величиной, которая будет меняться по гармоническому закону с частотой колебаний лопаток в неподвижной системе координат  $\omega_z$ :

$$\varphi_n = \varphi_{on} + \vartheta_0 \sin(\omega_z t - 2\pi n / N), \quad (2)$$

где  $\vartheta_0$  – величина, пропорциональная амплитуде крутильных колебаний лопатки, а  $\omega_z = \omega_n + z\omega_p$  в соответствии с обобщенным эффектом Доплера;  $\omega_n$  – частота колебаний во вращающейся системе координат,  $z = 0, 1 \dots N - 1$ .

Кроме того, по гармоническому закону с той же частотой будет изменяться и амплитуда  $\Delta_0$

$$\Delta_0 = \Delta_0(t, n) = A [1 + \delta_0 \cos(\omega_z t - 2\pi n / N)], \quad (3)$$

где  $\delta_0$  – величина, пропорциональная амплитуде колебаний лопатки в осевом направлении.

Подставляя выражения (3) и (2) в формулу (1) и предполагая, что датчик зазора помещен над профилем с номером  $n = 0$ , получим

$$\Delta(t) = A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) [1 + a \cos(\omega t + \vartheta_0 \sin \omega_z t)]. \quad (4)$$

Преобразуем выражение (4), используя формулу косинуса разности двух аргументов:

$$\begin{aligned} \Delta(t) = A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) \times \\ \times [1 + a \cos \omega t \cos(\vartheta_0 \sin \omega_z t) - \\ - a \sin \omega t \cdot \sin(\vartheta_0 \sin \omega_z t)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку справедливы разложения [2]

$$\cos(\vartheta_0 \cdot \sin \omega_z t) = I_0(\vartheta_0) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k}(\vartheta_0) \cos 2k\omega_z t;$$

$$\sin(\vartheta_0 \cdot \sin \omega_z t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k-1}(\vartheta_0) \sin(2k-1)\omega_z t, \quad (6)$$

где через  $I_k(\vartheta_0)$  обозначена функция Бесселя первого рода  $k$ -го порядка от аргумента  $\vartheta_0$ , то, применив эти разложения к формуле (5), после обычных алгебраических преобразований и раскрытий произведений функций будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta(t) = A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) [1 + a I_0(\vartheta_0) \cos \omega t + \\ + (-1)^k \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\vartheta_0) (\cos \omega t - k\omega_z t) + \\ + a \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\vartheta_0) \cos(\omega t + k\omega_z t)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из полученного выражения следует, что при возникновении флаттера датчик зазора, расположенный над лопатками компрессорного колеса, будет регистрировать следующие диагностические частоты флаттера:

$\omega_z = \omega_n + z\omega_p$  – частоту, обусловленную эффектом Доплера;

$\omega = \omega_p \cdot N$  – частоту следования лопаток;

$\omega_{z-k} = \omega - k\omega_z$  – нижнюю боковую полосу частот;

$\omega_{z+k} = \omega + k\omega_z$  – верхнюю боковую полосу частот.

Амплитуда доплеровской диагностической частоты пропорциональна амплитуде осевого смещения, т.е. изгибной составляющей колебания, а амплитуда частоты следования лопаток будет убывать как функция Бесселя нулевого порядка, где аргументом является крутильная составляющая колебаний. Разница амплитуд нечетных боковых составляющих и сумма амплитуд четных боковых составляющих  $k$ -го порядка равны двум функциям Бесселя этого же порядка. То есть,

$$\text{если } k - \text{нечетное, то } S_{+k} - S_{-k} = 2I_k;$$

$$\text{если } k - \text{четное, то } S_{+k} + S_{-k} = 2I_k.$$

Например,

$$S_{+1} - S_{-1} = 2I_1; \quad S_{-2} + S_{+2} = 2I_2.$$

Поскольку при малых значениях аргумента  $\vartheta_0$  справедливы соотношения:

$$I_0 \approx 1; \quad I_1 \approx \vartheta_0/2,$$

то разница амплитуд первых боковых составляющих пропорциональна амплитуде крутильной составляющей колебаний, т.е.  $S_{+1} - S_{-1} \sim \vartheta_0$ . Кроме того, в силу зависимостей функций Бесселя от аргумента, при малых его значениях спектральные составляющие  $S_k$  должны иметь тенденцию к убыванию с номером  $k$ , поэтому при малых значениях амплитуд флаттера достаточно ограничиться определением амплитуд первых боковых составляющих.

В неоднородном колесе каждая форма колебаний уже не является чисто диаметральной и ее можно представить совокупностью волн деформации, которая содержит все диаметральные формы, хотя частота процесса для всех этих форм в подвижной системе координат (измеряемая, например, тензометром) будет одинаковой –  $f_{л}$ . Но в неподвижной системе координат (связанной с датчиком зазора) эти волны в соответствии с обобщенным эффектом

Доплера будут иметь разные частоты

$$f_z = f_{л} + z f_p.$$

В этом случае формула (2) примет вид

$$\varphi_n = \varphi_{0n} + \sum_{z=0}^{\infty} (\vartheta_{0z} \cdot \sin \omega_z t - 2\pi n / N), \quad (8)$$

где  $\vartheta_{0z}$  – компонента (весовой коэффициент) диаметральной формы колебаний с номером  $z$  при представлении формы колебаний колеса с помощью бесконечного ряда Фурье диаметральных форм.

Неравномерность радиального зазора в общем случае также не является чистой синусоидой. Представляя ее бесконечным рядом Фурье, формулу (1) получим в следующем виде

$$\Delta(t, n) = \Delta_0 \left[ 1 + \sum_{j=1}^{\infty} \Delta_j \cos(\omega_j t - \varphi_n) \right], \quad (9)$$

где  $\omega_j = j \cdot 2\pi f_p N$ ,  $j = 1, 2, \dots$

В свою очередь формула (7) для бегущей волны изменения зазора тогда примет вид

$$\begin{aligned} \Delta(t) = A \left\{ 1 + \sum_{z=1}^{\infty} \delta_{0z} \cos \omega_z t + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} I_0(\vartheta_{0z}) \Delta_j \cos \omega_j t + \right. \\ \left. \sum_{j,k=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} (-1)^k I_k + \frac{\delta_{0z}}{2} (-1)^{k-1} (I_{k+1} + I_{k-1}) \Delta_j \cos(\omega_j - k\omega_z) \cdot t + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} I_k + \frac{\delta_{0z}}{2} (I_{k+1} + I_{k-1}) \Delta_j \cos(\omega_j + k\omega_z) \cdot t \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

### Апробация метода при экспериментальных исследованиях флаттера рабочих лопаток

Диагностика флаттера лопаток по сигналам с датчиков зазора производилась для первой ступени трехступенчатого вентилятора. Датчики зазора располагались над серединой хорды периферийного профиля. Кроме датчиков зазора для диагностики флаттера на корпусе вентилятора были установлены высокочастотные датчики пульсаций "Kulite", а на рабочих лопатках были размещены тензодатчики. Сигналы с этих датчиков регистрировались на регистратор-анализатор МС-300М. На осциллограммах,

приведенных на рис. 3 временной участок 1 соответствует отсутствию флаттера по первой форме, а временной участок 2 соответствует режиму развитого флаттера по первой форме колебаний (изгибный флаттер).

В отсутствии изгибного флаттера лопатки, колеблются преимущественно с частотой  $f = 278$  Гц с уровнем напряжений по этой форме колебаний  $\sigma < 1,0$ , а при флаттере уровень напряжений составлял  $\sigma \approx 20$  кгс/мм<sup>2</sup> (рис.4)

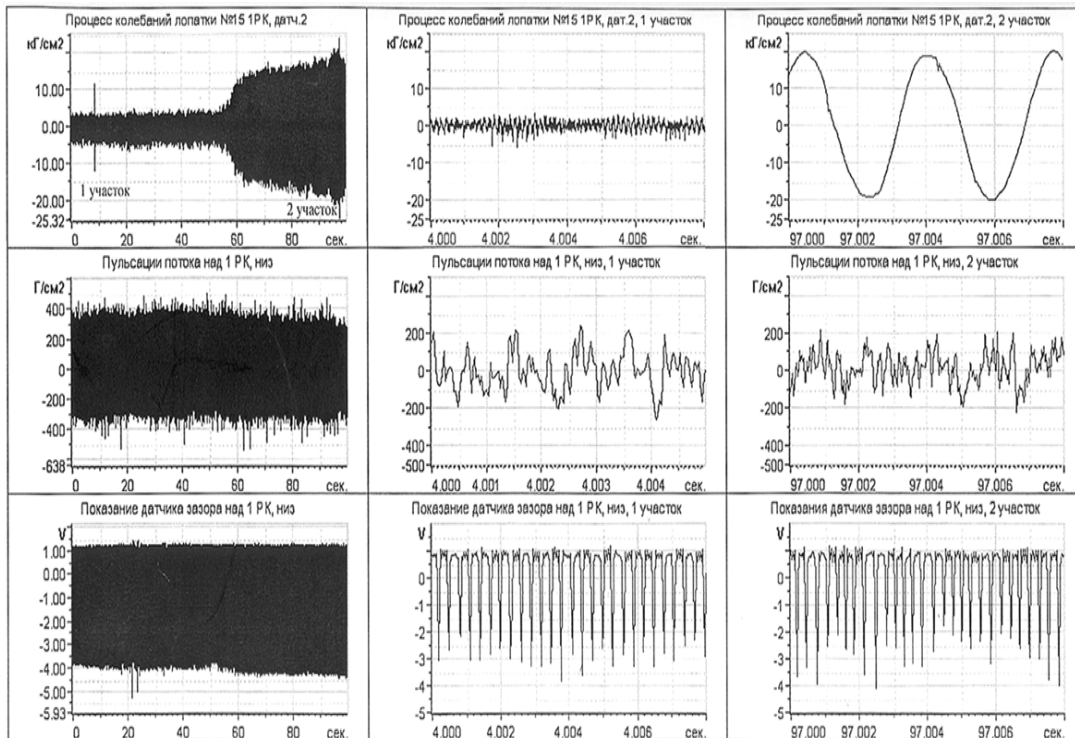


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с датчиков при возникновении и развитии флаттера лопаток

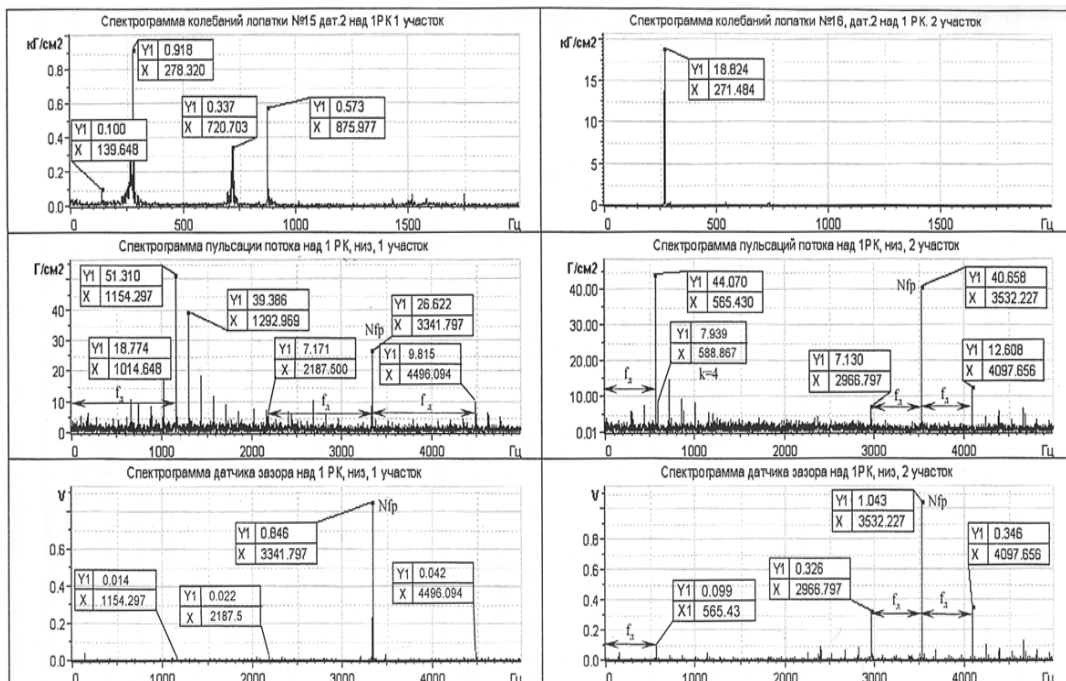


Рис. 4. Спектры сигналов с датчиков при возникновении и развитии флаттера

Тензодатчик был размещен в месте максимума напряжений по первой изгибной форме, поэтому он плохо фиксировал флаттер по крутильной форме ( $\sigma < 1,0 \text{ кгс/мм}^2$ ), который реализовался с частотой  $f = 876 \text{ Гц}$ . Однако, в спектре сигнала с датчика пульсаций присутствуют частоты  $f = 1115, 1154, 1293 \text{ Гц}$ , которые являются диагностическими частотами крутильного флаттера соответственно для узловых диаметров  $z = 1, 2, 3$ . Видно, что диаметральной форма с  $z = 2$  превалирует. В спектрограмме с датчика зазора эти диагностические составляющие также присутствуют, но с очень незначительным уровнем. Этот незначительный уровень обусловлен тем, что датчик зазора находился над серединой лопатки, где проходит узловая линия колебаний по крутильной форме, вследствие чего изменения зазора были ничтожны. Диагностические частоты флаттера на первом участке по первой форме колебаний отсутствуют как в сигналах с датчика пульсаций, так и с датчика вибраций.

На втором участке, где реализовался развитый изгибный флаттер лопаток с частотой  $f = 271,5 \text{ Гц}$ , в спектре пульсаций присутствует спектральная составляющая с частотой  $f = 565 \text{ Гц}$ , которая является диагностической для диаметральной формы с 2-я узловыми диаметрами. Симметрично частоты следования лопаток с  $f = 3532 \text{ Гц}$  имеются спектральные составляющие с  $f = 2967 \text{ Гц}$  и  $f = 4098 \text{ Гц}$ , причем уровень правой спектральной составляющей существенно превышает уровень левой. Аналогичная картина имеет место и в спектре с датчика зазора, причем отсутствие в этом спектре роторной гар-

моники  $k = 4$  даже не сколько облегчает диагностику флаттера. В связи с этим необходимо отметить, что данные испытания проводились на компрессорном стенде, где окружная неравномерность потока с низкими гармониками практически отсутствовала. Очевидно, что при наличии сильной окружной неравномерности потока с низкими гармониками и низкочастотными пульсациями потока диагностика флаттера по датчику пульсаций будет затруднительна. Сигнал с датчика зазора не имеет в своем спектре этих спектральных составляющих и поэтому диагностика флаттера здесь будет более надежной, чем по датчику пульсаций. Поскольку показания датчика зазора однозначно связаны с уровнем переменных напряжений (см. рис. 1), то использование данного метода позволяет не только надежно диагностировать момент и тип колебаний лопаток, но и определить напряженно-деформированное состояние лопаток при этих колебаниях без тензометрирования

## Литература

1. Заблочный И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977. – 420 с.
2. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1968. – 380 с.

*Поступила в редакцию 23.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Фишгойт, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия.