

УДК 621.51.226.2.53

А.А. ХОРИКОВ¹, С.Ю. ДАНИЛКИН¹, Т.И. МАЗИКИНА¹, П.В. МАКАРОВ²¹ Центральный институт авиационного машиностроения им. П.И.Баранова, Москва, Россия² ФГУП «НПП газотурбостроения «Салют», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КЛАССИЧЕСКОГО ФЛАТТЕРА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На основе использования новых методов обработки и анализа динамических сигналов проведено исследование механизмов возникновения и развития классического флаттера рабочих лопаток осевого компрессора. Выявлены диагностические признаки классического флаттера, отличающие его от других видов флаттера лопаток компрессоров. В частности установлено, что вследствие естественной разночастотности лопаток классический флаттер не возникает одновременно по всем лопаткам в колесе и не реализуется по диаметральным формам колебаний, свойственным решетчатому флаттеру.

Ключевые слова: классический флаттер, лопатки компрессора, анализ динамических процессов, новые методы обработки, частоты и формы колебаний, вибронпряжения

Введение. Постановка задачи

Существование классического изгибно-крутильного флаттера лопаток турбомашин длительное время ставилось под сомнение. Считалось, что флаттер лопаток обусловлен их взаимодействием в колесе и может возникать либо по первой изгибной форме (низкочастотный флаттер), либо при первой крутильной форме колебаний (высокочастотный флаттер), которая обычно имеет третий порядковый номер. При этом отмечалось, что крутильный флаттер отличается от изгибного гораздо меньшей связанностью и может возникать на отдельных группах лопаток. На близость к частоте крутильной формы частоты второй изгибной формы не обращалось внимания. Однако проведенный в работе [1] анализ экспериментальных данных показал, что это сближение частот является определяющим для устойчивости лопаток к высокочастотному флаттеру, причем в этом случае реализуется механизм классического изгибно-крутильного флаттера, когда при изменении частоты вращения ротора турбомашин вторая форма из преимущественно изгибной превращается в преимущественно крутильную, а третья, наоборот, из преимущественно крутильной в преимущественно изгибную.

При таком перестроении второй и третьей форм происходит изменение распределений напряжений по лопатке, что значительно снижает эффективность контроля уровня напряжений и надежность проведения экспериментов. Это

обстоятельство наряду с резким ростом напряжений при изменении режима работы турбомашин, с большим разбросом напряжений по лопаткам и трудностями его диагностики дает основание считать этот тип флаттера одним из наиболее опасных из известных типов флаттера компрессорных лопаток. Приводящий к поломкам лопаток незначительный в отдельных случаях уровень измеренных напряжений при флаттере указывает на необходимость учета при анализе данных тензометрирования изменения распределений напряжений вследствие изменения форм колебаний.

Приведенные в работе [1] исследования классического флаттера были выполнены с использованием методов регистрации и обработки динамических процессов, существовавших в прошлом веке. Перед настоящим исследованием была поставлена задача на основе новых методов обработки и анализа динамических процессов определить характерные признаки классического флаттера, отличающие его от широко известного решетчатого флаттера лопаток и позволяющие в дальнейшем повысить надежность его диагностики.

1. Методы и объект исследования

Методы обработки и анализа сигналов были разработаны на базе имеющихся пакетов программ WinPos фирмы «Мера», Test.Xpress фирмы LMS и вейвлет-анализа программного комплекса ФИАН.

Для 3D спектрального представления функции когерентности был разработан подключаемый модуль (плагин) в виде динамической библиотеки (DLL) для среды «WinPos», который осуществил конвертирование экспериментальных данных в формате фирмы «мера» в формат данных LMSTest.Xpress.

Объектом исследования являлись рабочие лопатки 2-й ступени высоконагруженного четырехступенчатого экспериментального вентилятора. Тензометрирование данных лопаток проведено при различном опирании по бандажным полкам при испытаниях в составе двигателя на стенде с атмосферными условиями на входе в двигатель [2]. При наличии опирания

рабочих лопаток 2-й ступени по бандажным полкам флаттер отсутствовал. Для проведения исследования лопаток без опирания по бандажным полкам, они были выполнены с большим зазором по бандажным полкам, исключая его исчезновение при высоком уровне амплитуд колебаний. Расчеты частот и форм колебаний этих лопаток показали, что при увеличении частоты вращения происходит перестроение (инверсия) второй и третьей форм колебаний (рис.1). Для экспериментального исследования вибрационной нагруженности этих лопаток профильная часть пера была подробно препарирована тензометрами (рис.2), а на корпусе вентилятора были размещены трехкомпонентные вибродатчики.

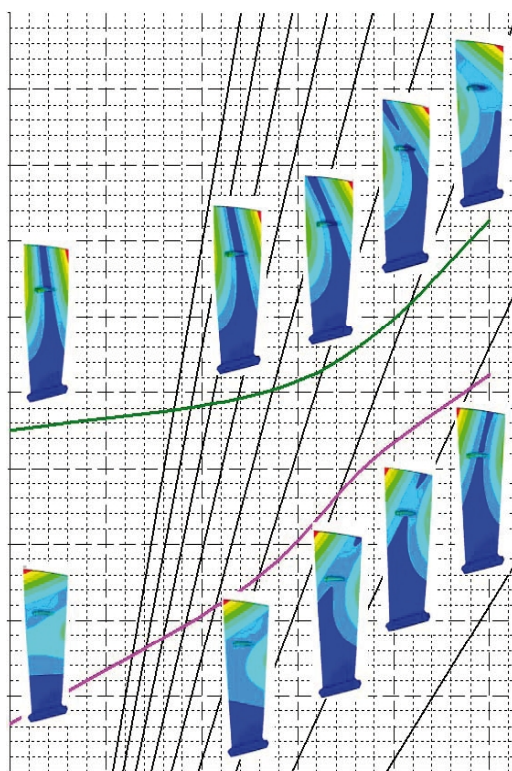


Рис.1. Расчетные зависимости частот и форм колебаний исследуемых лопаток при изменении частоты вращения

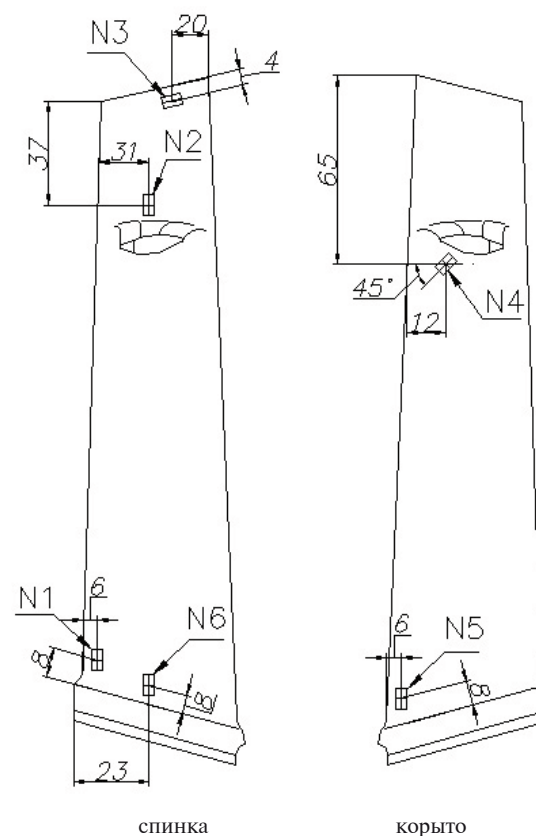


Рис.2. Схема размещения тензодатчиков на РЛ 2 ступени КНД

2. Результаты исследований

На рабочем режиме при увеличении частоты вращения вентилятора на рабочих лопатках были зафиксированы нерезонансные колебания с высоким уровнем замеренных напряжений (рис.3).

В результате применения преобразования Фурье был определен спектральный состав

сигналов с тензодатчиков на рабочих лопатках, в котором преобладающими оказались частоты, близкие к частотам второй и третьей форм колебаний (рис.4). При возникновении колебаний лопаток с большими уровнями напряжений по третьей форме в спектрах сигналов с трехкомпонентного датчика вибраций, установленного

на корпусе в плоскости направляющего аппарата первой ступени вентилятора появились диагностические частоты $f_d = f_l \pm m f_p$ (рис.5), где m имело непрерывные целые значения.

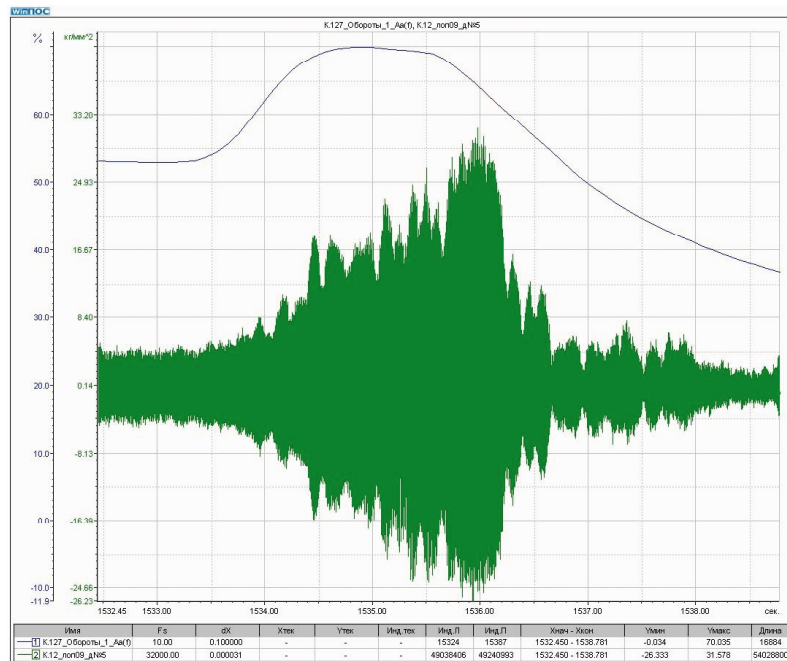


Рис.3. Осциллограмма сигнала с тензодатчика №2 и изменение частоты вращения

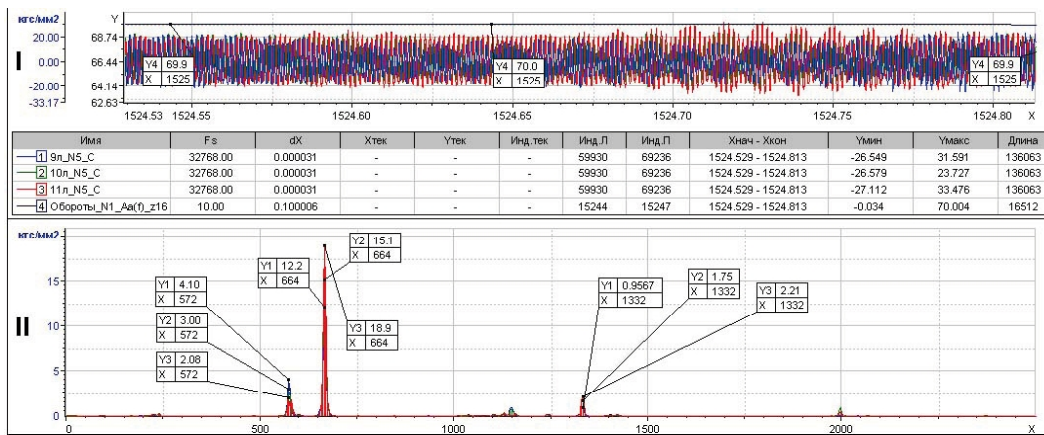


Рис.4. Осциллограммы и спектры сигналов с тензометров при развитом флаттере

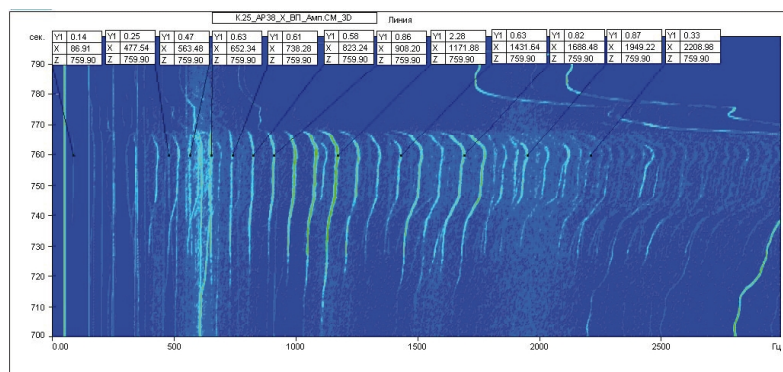


Рис.5. 3D-спектр сигнала с датчика вибраций на корпусе в плоскости НА 1 ступени вентилятора (вертикальное направление)

Таблица 1 – Результаты частотно-временного анализа сигналов с тензометров при возникновении и развитии флаттера

т/д № 2					
№ лопатки	до начала флаттера $\sigma < 5 \text{ кгс/мм}^2$	$\sigma = 5 \dots 10 \text{ кгс/мм}^2$	$\sigma \geq 10 \text{ кгс/мм}^2$	Когерентность γ^2 при $\sigma \geq 10 \text{ кгс/мм}^2$	Сдвиг фаз $\Delta\phi$, град
Процесс отфильтрован в диапазоне частот $f = 625\text{-}670 \text{ Гц}$					
9	652.7	647.5	646.8	лоп.9 и 10: 0.991	лоп.9 и 10: 6.22
10	652.7	647.5	646.8		
11	645.3	648.7	646.8	лоп.39 и 40: 0.98	лоп.39 и 40: -13.1
39	629.2	651.3	649.8		
40	631.7	651.3	649.8		
41	662.6	650.8	649.8	лоп.40 и 41: 0.98	лоп.40 и 41: -0.72
Процесс отфильтрован в диапазоне частот $f = 470\text{-}530 \text{ Гц}$					
9	516.2	479.8	494.7	лоп.9 и 10: 0.5	лоп.10 и 11: 0.72
10	495.6	477.4	494.7		
11	475.4	472.14	496.3	лоп.39 и 40: 0.97	лоп.39 и 40: -14.26
39	503.5	475.0	495.0		
40	480.7	485.7	502.1		
41	499.0	483.2	487.0	лоп.40 и 41: 0.90	
т/д № 6					
Процесс отфильтрован в диапазоне частот $f = 625\text{-}670 \text{ Гц}$					
41	644.8	650.8	651.7	лоп.39 и 40: 0.99	лоп.39 и 40: 62.4
40	658.4	650.8	651.7		
39	647.0	650.8	651.7	лоп.40 и 41: 0.99	лоп.40 и 41: 64.2
28	645.6	650.0	650.5		
27	666.9	651.3	650.5		
17	647.9	643.3	650.3	лоп.27 и 28: 0.91	
11	641.4	649.8	650.0		
10	647.8	647.8	647.9	лоп. 9 и 10: 0.99	лоп.9 и 10: -30
9	663	647.8	647.6		
6	653.9	653.8	651.3	лоп. 10 и 11: 0.995	лоп. 10 и 11: -23
Процесс отфильтрован в диапазоне частот $f = 470\text{-}530 \text{ Гц}$					
41	482.9	488.2	517.9	лоп.39 и 40: 0.6	
40	506.2	511.9	514.2		
39	509.9	518.8	514.2	лоп.9 и 10: 0.5	
28	501.6	500	516.2		
27	513.6	507.2	516.7		
17	501.6	509.8	515.0		
11	510.0	502.2	525.7		
10	495.4	503.9	516.3		
9	502.1	509.7	526.6		
6	505.0	509.7	526.1		

Заклучение

Из представленных результатов обработки динамических процессов при реализации классического флаттера рабочих лопаток высоконагруженного четырехступенчатого экспериментального вентилятора можно выделить следующие механизмы его возникновения:

– классический флаттер возникает на частотах вращения, при которых у лопаток происходит перестроение форм колебаний под действием центробежных сил;

– вследствие естественной разночастотности лопаток классический флаттер не возникает одновременно по всем лопаткам;

– классический флаттер не реализуется по диаметральной формам колебаний, свойственным решеточному флаттеру;

– на начальном этапе возникновения флаттера лопатки в колесе колеблются с разными частотами и только при весьма высоком уровне вибрационных напряжений вследствие нелинейных эффектов несколько рядом расположенных лопаток могут иметь одинаковые частоты;

– при высоком уровне вибрационных напряжений в спектре вибраций корпуса можно выделить многочисленные спектральные составляющие, которым можно привести в соответствие различные номера диаметральных форм совместных колебаний лопаток с диском, однако, в действительности они являются результатом разложения окружной неравномерности деформации корпуса в ряд Фурье от воздействия колебаний вращающихся лопаток.

Литература

1. Хориков А.А. Прогнозирование и диагностика флаттера лопаток осевых компрессоров авиационных ГТД // ЦИАМ, Труды №1311.-2002.-351 с.
2. Макаров П.В. Исследование флаттера рабочего колеса 2 ступени вентилятора ГТД при различном опирании лопаток по бандажным полкам // Вестник Московского авиационного института, том 19, №3, 2012., С.101-111.
3. Дремин И.М. Иванов О.В., Нечитайло В.А., Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук, том 171, №5, 2001.
4. Сачин В.М., Хориков А.А., Шатохин А.Г. Исследование фазовых характеристик связанных колебаний лопаток компрессоров в потоке // ЦИАМ, Труды № 953.-1981.- С. 287-296.

Поступила в редакцию 10.06.2013

А.О. Хоріков, С.Ю. Данилкін, Т.І. Мазикіна, П.В. Макаров. Дослідження механізмів виникнення і розвитку класичного флатеру компресорних лопаток із використанням сучасних методів обробки динамічних процесів

На основі використання нових методів обробки і аналізу динамічних сигналів проведено дослідження механізмів виникнення і розвитку класичного флатеру робочих лопаток осевого компресора. Виявлено діагностичні ознаки класичного флатера, які відрізняють його від інших видів флатеру лопаток компресорів. Зокрема встановлено, що внаслідок природної різночастотності лопаток класичний флатер не виникає одночасно по усіх лопатках в колесі та не реалізується за діаметральними формами коливань, які властиві решітчастому флатеру.

Ключові слова: класичний флатер, лопатки компресора, аналіз динамічних процесів, нові методи обробки, частоти і форми коливань, вібронпруження

A.A. Horikov, S.U. Danilkin, T.I. Mazikina, P.V. Makarov. Research of mechanisms of occurrence and development of classical flutter in compressor's blades with application of modern methods of processing of dynamic processes

On the basis of use of new methods of processing and the analysis of dynamic signals research of mechanisms of occurrence and development classical flutter in axial compressor's blades is conducted. Diagnostic characters classical flutter, distinguishing it from other kinds flutter in compressor's blades are revealed. It is fixed that owing to natural dispersion of frequencies in blades the classical flutter does not arise simultaneously on all blades in fan and is not realized under the diametrical shapes of oscillations peculiar cascade flutter.

Key words: classic flutter, compressor's blades, analysis of dynamic processes, new methods of processing, frequencies and natural modes, dynamic stresses.