

УДК 621.51.226.2.53

С.Ю. ДАНИЛКИН¹, Д.А. РЕДЬКИН¹, А.А. ХОРИКОВ¹, С.И. ШАНЬКИН²¹ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия² АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

Представлены результаты бесконтактной диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин с применением узкополосного спектрального анализа сигналов с высокочастотных датчиков пульсаций статического давления, установленных на корпусе турбомашин. Приведены результаты экспериментальных исследований динамической прочности рабочих лопаток компрессора и турбины экспериментального турбовинтового двигателя при стендовых испытаниях. Определены формы колебаний лопаток, гармоника возбуждения от окружной неравномерности потока и частоты вращения ротора, на которых рекомендовано производить резонансные испытания рабочих лопаток компрессора и турбины.

Ключевые слова: рабочие лопатки, резонанс, испытания, спектральный анализ, пульсации потока, частоты колебаний, диагностика.

Введение

Известно, что резонанс вызывает резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний системы при приближении частоты внешнего гармонического воздействия к какой-либо из частот собственных колебаний системы. В турбомашинах резонансные колебания лопаток зависят от взаимосвязанности лопаток, входящих в состав рабочего колеса. В случае слабой связанности каждая лопатка резонирует при совпадении ее собственной частоты с частотой возбуждения, независимо от поведения других лопаток. В случае сильной связанности поведение каждой лопатки зависит от динамического состояния лопаточного венца или колеса в целом.

Для диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток обычно применяется тензометрирование. Вместе с тем при колебаниях рабочие лопатки являются вращающимся источником возмущений потока, обусловленным видом деформаций и частотным спектром. Известно, что при флаттере эти возмущения относительно неподвижного датчика реализуются в виде амплитудно-фазомодулированных волн деформации, бегущих по вращению колеса. Такой вывод был сделан на основе рассмотрения физических моделей явления и подтвержден многочисленными экспериментами. С использованием этих физических моделей были разработаны методы диагностики флаттера. В основе этих методов лежит спектральный анализ пульсаций потока на диагностических частотах.

Применительно к резонансным колебаниям такие подходы практически отсутствуют, однако эф-

фективность диагностики флаттера по изменению спектра пульсаций в высокочастотной области вблизи частот следования лопаток [1, 2] предопределило разработку аналогичного метода для резонансных колебаний [3, 4]. Метод основан на спектральном анализе сигнала с датчика пульсаций статического давления на частоте следования лопаток. Было установлено, что при увеличении частоты вращения ротора спектральная составляющая пульсаций потока на частоте следования лопаток монотонно увеличивается, но в момент возникновения резонансных колебаний лопаток она резко убывает пропорционально амплитуде колебаний лопаток (рис. 1).

В зависимости от назначения турбомашин могут быть актуальны как диагностика непосредственно резонанса, так и определение уровня напряжений на этом резонансе. Например, для стационарных турбомашин с большим ресурсом и отдельных видов авиационных двигателей, которые, в основном, работают при постоянных оборотах, требуется обеспечить отсутствие резонанса именно на этих оборотах в течение всего срока эксплуатации. В то же время для многорежимных турбомашин важно определить режимы с максимальным уровнем напряжений для того, чтобы (если это необходимо) ограничить наработку на этих режимах.

Вибронапряженность рабочих лопаток турбомашин, которые по техническим причинам не могут быть протензометрированы, проверяется резонансно-циклическими испытаниями. Обычно резонансные испытания проводятся при ступенчатом изменении частоты вращения с наработкой на каждой

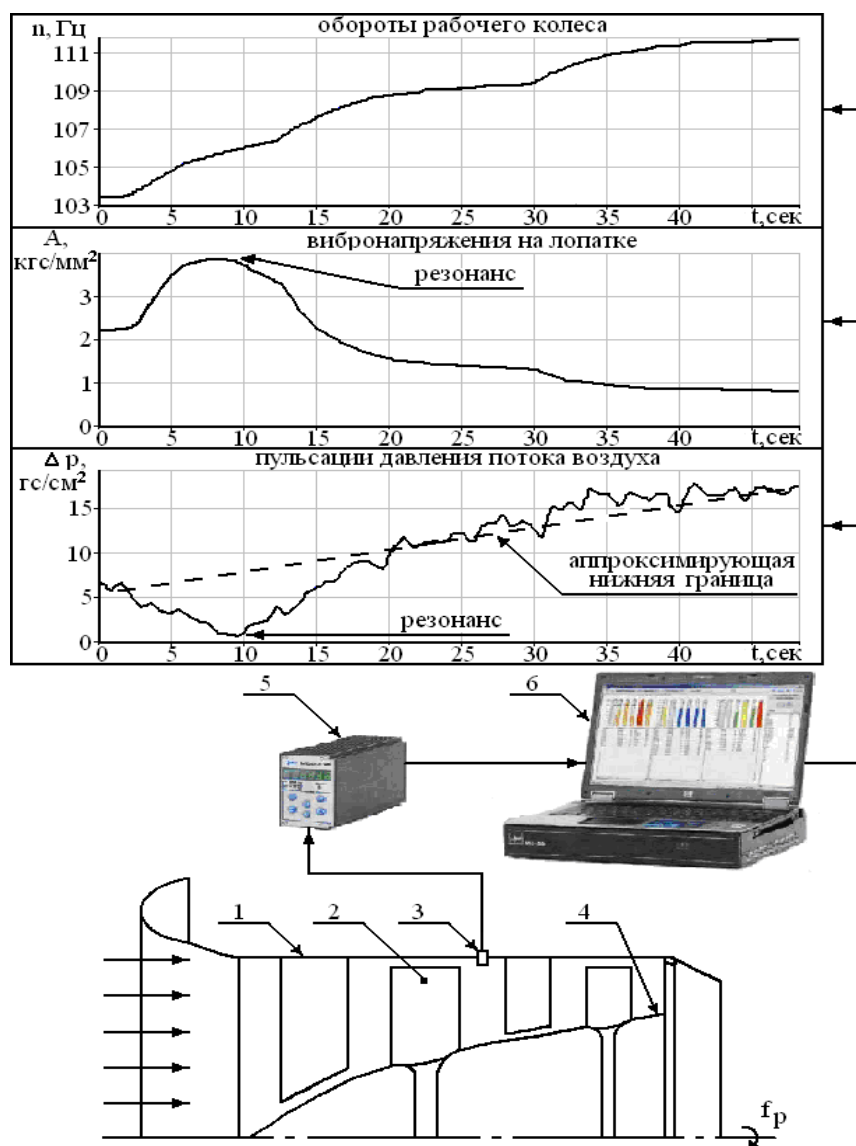


Рис. 1. Схема реализации способа диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток компрессоров: 1 – турбомашина; 2 – рабочие лопатки; 3 – датчик пульсаций давления; 4 – ротор турбомашин; 5 – согласующий усилитель; 6 – регистратор-анализатор

ступени заданного числа циклов колебаний или времени работы.

Весь диапазон частоты вращения, в котором следует проводить эти резонансные испытания, определяется на основании расчетов частот и форм собственных колебаний и их экспериментального определения на вибростендах. При этом нет уверенности, что при таком ступенчатом разбиении хотя бы одна из лопаток в процессе испытаний будет в действительности находиться в резонансе.

Результаты исследований

Одним из таких объектов, для подтверждения вибрационной прочности лопаток которого необхо-

димо было проведение резонансно-циклических испытаний, являлся экспериментальный турбовинтовой двигатель. Для проведения исследования и анализа резонансных колебаний рабочих лопаток компрессора и свободной турбины была смонтирована система измерений пульсаций статического давления на стенде АО "Мотор Сич" (рис. 2). Для обеспечения постановки датчиков пульсаций статического давления были выполнены работы по доработке корпуса компрессора и турбины двигателя. Измерения пульсаций потока осуществлялись в 4-х сечениях, которые располагались за исследуемыми рабочими колесами 1-й и 2-й ступени компрессора в плоскостях направляющих аппаратов 1-й и 2-й ступени и за рабочими колесами 1-й и 2-й ступени свободной турбины.

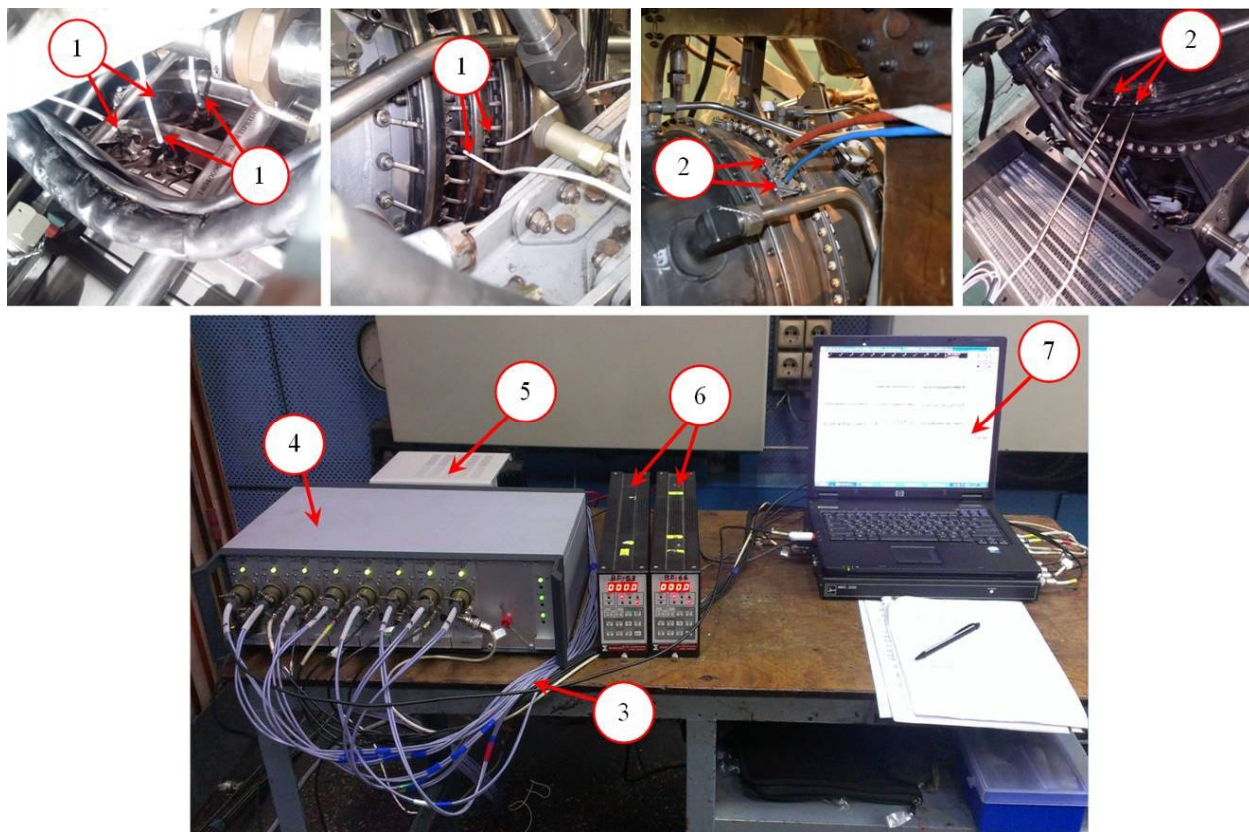


Рис. 2. Общий вид ИИС для измерения и регистрации пульсаций статического давления при испытаниях экспериментального двигателя на стенде АО "Мотор Сич":

- 1 – датчики пульсаций статического давления, установленные на компрессоре
- 2 – датчики пульсаций статического давления, установленные на турбине
- 3 – специальный кабель «датчик–усилитель»,
- 4 – тензометрический усилитель,
- 5 – блок питания тензометрического усилителя,
- 6 – блоки усилителя заряда,
- 7 – регистратор-анализатор динамических сигналов МІС-200М

На монитор регистратора - анализатора МІС-200М в режиме реального времени выводились осциллограммы сигналов с измерительных каналов датчиков пульсаций давления и датчиков частоты вращения свободной турбины и турбины компрессора, а также результаты экспресс-анализа сигналов с датчиков пульсаций.

Согласно представленному на рис. 3 объекту исследования, в окружной неравномерности потока, создаваемой конфигурацией воздухозаборника, должны преобладать гармоники, кратные двойной частоте вращения, т.е. $k = 2, 4, 6$ и т.д. В неравномерности потока, создаваемой винтом, с учетом вращения винта в сторону, противоположную вращения ротора двигателя, должны преобладать гармоники

$$k' = (f_{\text{дв}} + 3f_{\text{винта}}) k,$$

где $f_{\text{дв}}$ – частота вращения ротора двигателя, $f_{\text{винта}}$ – частота вращения вала винта.



Рис. 3. Экспериментальный двигатель при проведении резонансных испытаний на стенде АО "Мотор Сич"

При проведении спектрально-корреляционного анализа зарегистрированных при проведении испытаний динамических сигналов было установлено, что в сигналах с датчиков пульсаций давления, расположенных в корпусе компрессора, во всём рабочем диапазоне оборотов превалирует гармоника частоты вращения винта с кратностью 3, а также отсутствует спектральная составляющая, соответствующая вращающемуся срыву (рис. 4). Поэтому, основными источниками возбуждения резонансных колебаний лопаток 1-й и 2-й ступени компрессора являлись окружные неравномерности потока, создаваемые винтом и воздухозаборником.

В результате проведенного узкополосного спектрального анализа акустических сигналов, измеряемых с помощью высокочастотных датчиков пульсаций, установленных на корпусе компрессора, было выделены режимы, на которых наблюдалось уменьшение амплитуды гармонической составляющей на частоте следования лопаток (рис. 5, 6).

С учётом данных о тензометрировании на двигателе-прототипе, с использованием диаграмм Кэмпбелла и результатов анализа сигналов с датчиков пульсаций, были установлены частоты вращения ротора, на которых рекомендовано производить резонансные испытания рабочих лопаток компрессора (табл. 1).

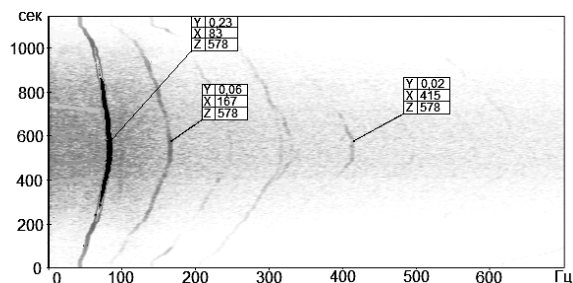


Рис. 4. 3D спектр пульсаций потока, создаваемых винтом за рабочим колесом 1-й ступени компрессора

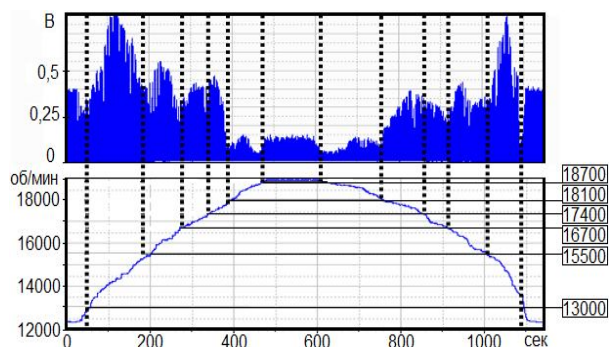


Рис. 5. График изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток 1-й ступени компрессора и график изменения оборотов

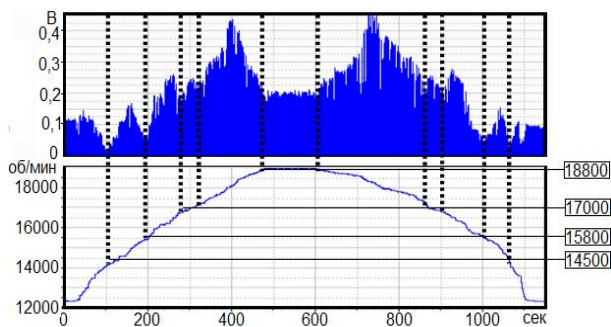


Рис. 6. График изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток 2-й ступени компрессора и график изменения оборотов

Таблица 1

Частоты вращения ротора, на которых рекомендовано производить резонансные испытания рабочих лопаток компрессора

№ ст. компр.	n, об/мин	№ формы колебаний
1	13000	1
	15500	2
	17050	1
	18400	1
2	14500	2
	15800	1
	17000	2
	18800	2

Аналогичный узкополосный спектральный анализ был проведен для пульсаций потока за 1-й и 2-й ступенью свободной турбины. На основе сопоставления результатов спектрального анализа пульсаций потока и расчетных диаграмм Кэмпбелла были определены значения частот вращения ротора турбины, на которых рекомендуется проводить резонансные испытания рабочих лопаток.

Выводы

Таким образом, разработанный метод диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин по сигналам с датчиков пульсаций статического давления, устанавливаемых в корпусе турбомашин, основанный на измерении пульсаций давления потока на частоте следования лопаток, позволил определить резонансные частоты вращения для рабочих лопаток, как от окружной неравномерности потока на входе, создаваемой воздухозаборником, так и от неравномерности потока создаваемой винтом. В результате проведенного исследования определены формы колебаний лопаток и номера гармоник окружной неравномерности потока,

по которым реализуются резонансные колебания лопаток компрессора, а также определены режимы для проведения резонансных испытаний рабочих лопаток свободной турбины.

Литература

1. Хориков, А.А. Прогнозирование и диагностика флаттера лопаток осевых компрессоров авиационных ГТД [Текст] / А.А. Хориков. – М.: ЦИАМ, 2002. – Вып. 1311. – 180 с.

2. Хориков, А.А. Метод и система диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток компрессоров датчиками пульсаций [Текст] / А.А. Хориков // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. – Х.: ИПМаш, 1997. – С. 323-332.

3. Пат. 2451279 Российская Федерация, МПК G01M 15/14, G01H 13/00. Способ диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомашин [Текст] / Хориков А.А., Данилкин С.Ю.; Заявитель и патентообладатель ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова". – № 2011101521/28; заявл. 18.01.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 4 с.

4. Пат. 109287 Российская Федерация, МПК G01H 13/00. Устройство диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомашин [Текст] / Хориков А.А., Данилкин С.Ю.; Заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает Минпромторг России, ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова". – № 2011126590/28; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28. – 4 с.

Поступила в редакцию 10.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, начальник отдела В.В. Медведев, НИЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова", Москва.

БЕЗКОНТАКТНА ДІАГНОСТИКА РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

С.Ю. Данилкін, Д.О. Редькін, А.О. Хориков, С.І. Шанькін

Представлено результати безконтактної діагностики резонансних коливань робочих лопаток турбомашини із застосуванням вузькосмугового спектрального аналізу сигналів з високочастотних датчиків пульсацій статичного тиску, встановлених на корпусі турбомашини. Наведено результати експериментальних досліджень динамічної міцності робочих лопаток компресора і турбіни експериментального турбогвинтового двигуна при стендових випробуваннях, з урахуванням яких визначено форми коливань лопаток, гармоніки збудження від окружної нерівномірності потоку і частоти обертання ротора, на яких рекомендовано проводити резонансні випробування робочих лопаток компресора і турбіни.

Ключові слова: робочі лопатки, резонанс, випробування, спектральний аналіз, пульсації потоку, частоти коливань, діагностика.

NON-CONTACT DIAGNOSTIC OF THE TURBOMACHINERY ROTOR BLADES RESONANT OSCILLATIONS

S.Yu. Danilkin, D.A. Redkin, A.A. Khorikov, S.I. Shankin

The results of the non-contact diagnostic turbomachinery rotor blades resonant vibrations using a narrow-band spectral analysis of signals from high static pressure pulsation sensors mounted on the engine case. The results of experimental studies of the dynamic strength of the compressor and turbine rotor blades for the experimental turboprop engine bench tests. To taking this results into account are determined the mode shapes of the blades, the harmonic excitation of the district uneven flow and rotor speed, which is recommended to produce resonance tests compressor blades the turbines.

Keywords: rotor blades, resonance, testing, spectral analysis, flow pulsation, vibration frequency, diagnostics.

Данилкин Сергей Юрьевич – начальник сектора отдела динамической прочности ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова", Москва, Россия, e-mail: Danilkin@rtc.ciam.ru.

Редькин Дмитрий Александрович – инженер отдела динамической прочности ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова", Москва, Россия, e-mail: Danilkin@rtc.ciam.ru.

Хориков Анатолий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, начальник отдела прочности ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова", Москва, Россия, e-mail: Khorikov@rtc.ciam.ru.

Шанькин Сергей Иванович – главный конструктор АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина.