

УДК: 621.51.226.2.53

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОВЕДЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК В СОСТАВЕ ТУРБОМАШИН

© 2014 А.А. Хориков, С.Ю. Данилкин, Д.А. Редькин

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Представлен новый метод проведения резонансных испытаний лопаток рабочих колёс турбомашин с применением бесконтактной диагностики возникновения колебаний лопаток, основанной на узкополосном спектральном анализе сигналов с высокочастотных датчиков пульсаций статического давления, установленных на корпусе турбомашин. Приведены результаты экспериментальных исследований динамической прочности рабочих лопаток турбомашин при стендовых испытаниях с применением разработанного метода. В результате проведённых исследований резонансных колебаний рабочих лопаток компрессора и турбины экспериментального турбовинтового двигателя (ТВД) и компрессора высокого давления (КВД) перспективного газотурбинного двигателя (ГТД) с применением метода диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин по сигналам с датчиков пульсаций статического давления, основанного на измерении пульсаций давления потока на частоте следования лопаток, с использованием диаграмм Кэмпбелла были определены формы колебаний лопаток, основные гармоники возбуждения резонансных колебаний от окружной неравномерности потока, а также режимы для проведения резонансных испытаний рабочих лопаток. Показано, что применение нового метода позволяет существенно повысить эффективность и надёжность диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин, а также снизить материальные затраты на проведение резонансных испытаний по сравнению с традиционной технологией определения резонансных режимов на основе расчётных методов.

Рабочие лопатки, резонанс, испытания, спектральный анализ, пульсации потока, частоты колебаний, бесконтактная диагностика.

Вибрационная нагруженность рабочих лопаток в составе турбомашин проверяется резонансно-циклическими испытаниями по причине сложности тензометрирования (высокие окружные скорости, малые габариты лопаток, невозможность установки токосъёмника без нарушения конструкции турбомашин и т.д.). Обычно резонансные испытания проводятся при ступенчатом изменении частоты вращения с наработкой изделия заданного числа циклов колебаний или времени работы на каждом интервале частоты вращения, определённом на основании расчётов частот и форм собственных колебаний и их экспериментального определения на вибростендах. При этом нет уверенности, что при таком подходе хотя бы одна из лопаток на выбранном поддиапазоне будет в действительности находиться в резонансе.

Авторами разработан новый метод проведения резонансных испытаний рабочих лопаток. Метод основан на бескон-

тактной диагностике резонансных колебаний лопаток рабочего колеса по сигналам с высокочастотных датчиков пульсаций статического давления, помещаемых в корпусе турбомашин. В результате использования математических моделей [1] и спектрально-корреляционного анализа сигналов с датчиков пульсаций потока при проведении экспериментальных исследований было установлено, что при увеличении частоты вращения ротора спектральные составляющие пульсаций потока на частоте следования лопаток монотонно увеличиваются, а в момент возникновения резонансных колебаний лопаток они убывают пропорционально амплитуде колебаний лопаток (рис. 1).

Распределение частот колебаний лопаток обычно подчиняется нормальному закону, поэтому режим, на котором происходит наибольшее снижение уровня амплитуды спектральной составляющей на частоте следования лопаток конкретного рабочего колеса, будет с наибольшей

вероятностью соответствовать резонансной частоте вращения для нескольких лопаток этого колеса. На способ диагностики резонансных колебаний и устройство для его реализации были получены патенты РФ [2, 3].

Реализация нового метода проведения резонансных испытаний осуществля-

лась на объектах, для подтверждения вибрационной прочности лопаток которых необходимо было проведение резонансно-циклических испытаний. Такими объектами являлись экспериментальный турбовинтовой двигатель (ТВД) и перспективный газотурбинный двигатель (ГТД).

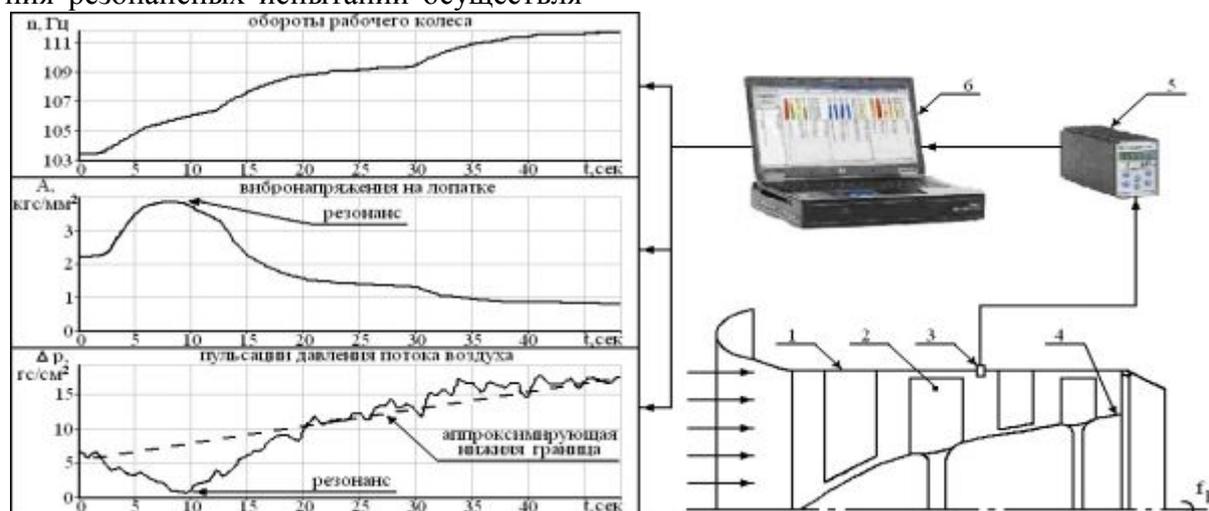


Рис. 1. Схема реализации способа диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток компрессоров: 1 – турбомашина; 2 – рабочие лопатки; 3 – датчик пульсаций давления; 4 – ротор турбомашин; 5 – согласующий усилитель; 6 – регистратор-анализатор

Для проведения исследования и анализа резонансных колебаний рабочих лопаток первой и второй ступени компрессора, а также первых двух ступеней свободной турбины экспериментального ТВД, на испытательном стенде была смонтирована информационно - измерительная система (ИИС) для измерения и анализа пульсаций потока в темпе эксперимента (рис. 2). ИИС включала в себя регистратор-анализатор динамических сигналов МИС-200М, согласующие усилители-преобразователи для пьезорезистивных и пьезоэлектрических датчиков, специальные соединительные кабели и высокочастотные датчики пульсаций давления. С учётом давления и температуры потока газа в точках измерения пульсаций для препарирования объекта применялись датчики фирмы «Kulite» типа ХТЛ-АС и ХТЕН-10LАС и датчики давления ДПС 013 производства НИИФИ г. Пенза. Для обеспечения постановки датчиков пульсаций статического давления были выполнены работы по доработке корпуса компрессора и турбины двигателя. Регистра-

ция и экспресс-анализ в темпе эксперимента сигналов с датчиков пульсаций давления, а также сигналов с датчиков частоты вращения ротора турбины компрессора (ТК) и ротора свободной турбины (СТ) осуществлялись на регистраторе-анализаторе динамических сигналов МИС-200М.

В результате узкополосного спектрального анализа сигналов с датчиков пульсаций давления потока, установленных на корпусе компрессора и турбины, были выделены режимы, на которых происходило уменьшение амплитуды гармонической составляющей на частоте следования лопаток исследуемых ступеней (рис. 3, 4, 5). Используя результаты анализа пульсаций потока, а также данные о тензометрировании на двигателе-прототипе и диаграммы Кэмпбелла, были установлены частоты вращения ротора, на которых рекомендовано проводить резонансные испытания рабочих лопаток компрессора и свободной турбины, определены формы колебаний лопаток и выявлены основные гармоники возбуждения резо-

нансных колебаний от окружающей неравномерности потока.

Аналогичная работа с использованием предлагаемого метода была проведена на перспективном ГТД. Объектом исследования являлись рабочие лопатки 1-4 ступеней КВД. Из-за особенностей конструкции исследуемого двухконтурного газотурбинного двигателя, давления и тем-

пературы потока газа в точках измерения пульсаций потока было принято решение для препарирования объекта применять датчики фирмы «Kulite» типа ХТЕН-10LАС, которые устанавливались на корпусе КВД, а кабель от датчика в металлическом кожухе проходил через внешний контур двигателя.

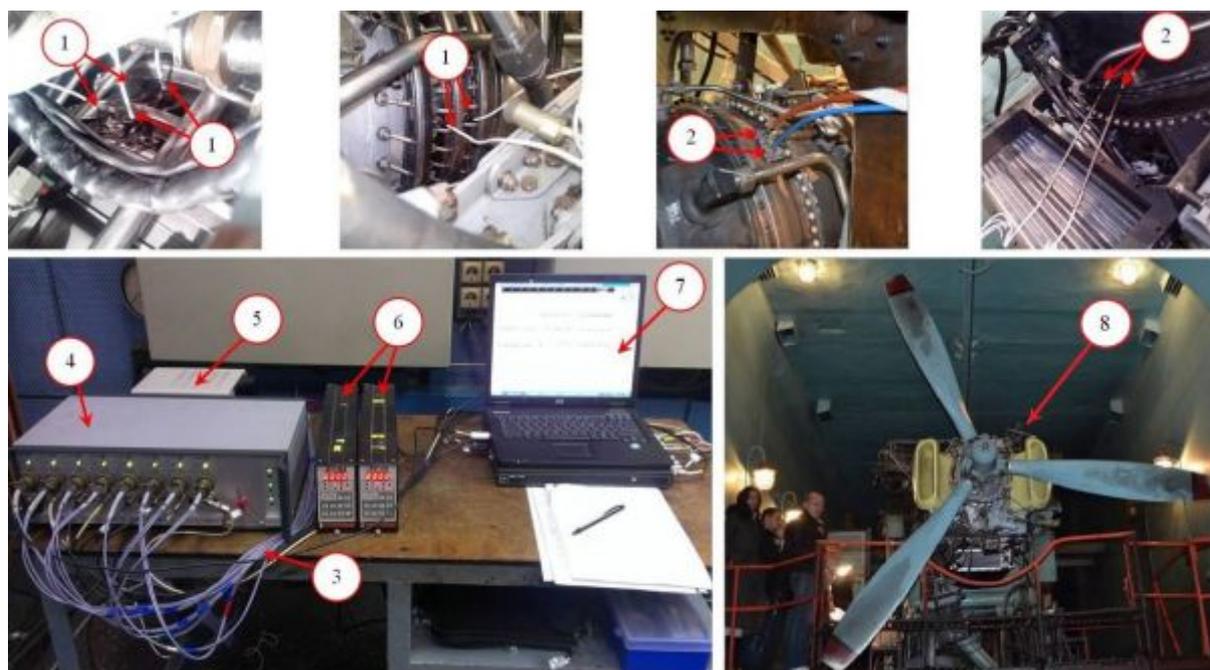


Рис. 2. Объект исследования и общий вид ИИС для измерения и регистрации пульсаций статического давления при испытаниях экспериментального двигателя на стенде:

- 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 МИС-200М; 8 – экспериментальный ТВД

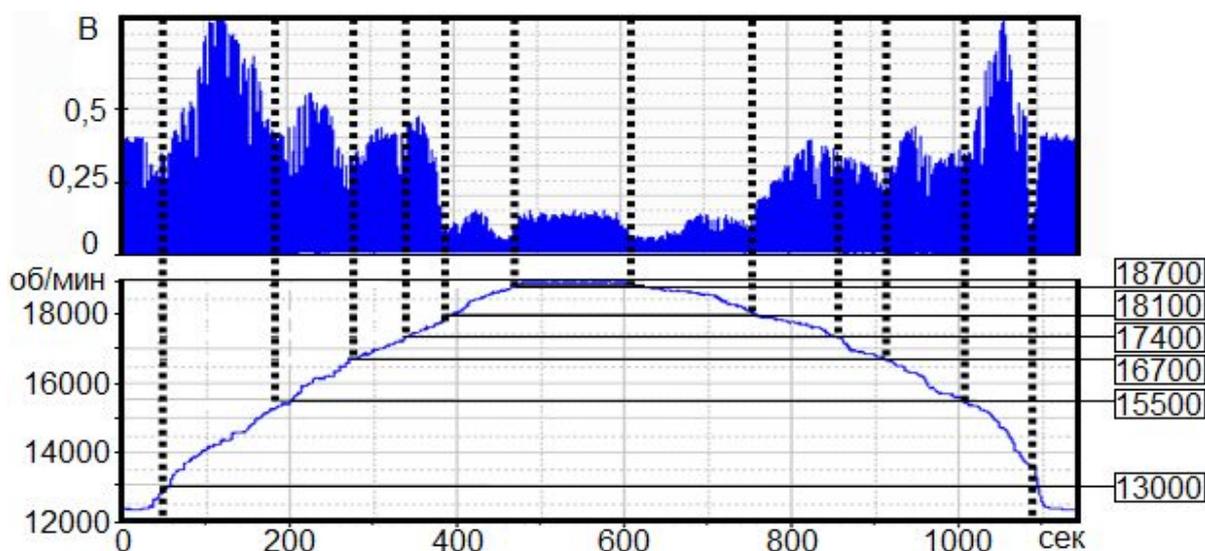


Рис. 3. График изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток первой ступени компрессора и график изменения оборотов

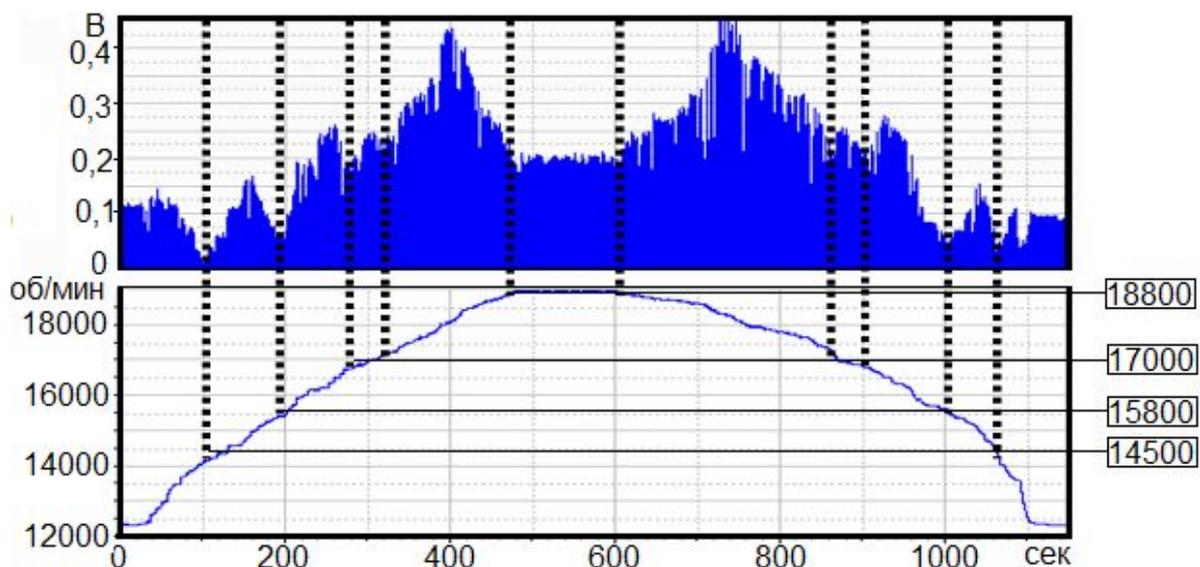


Рис. 4. График изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток второй ступени компрессора и график изменения оборотов

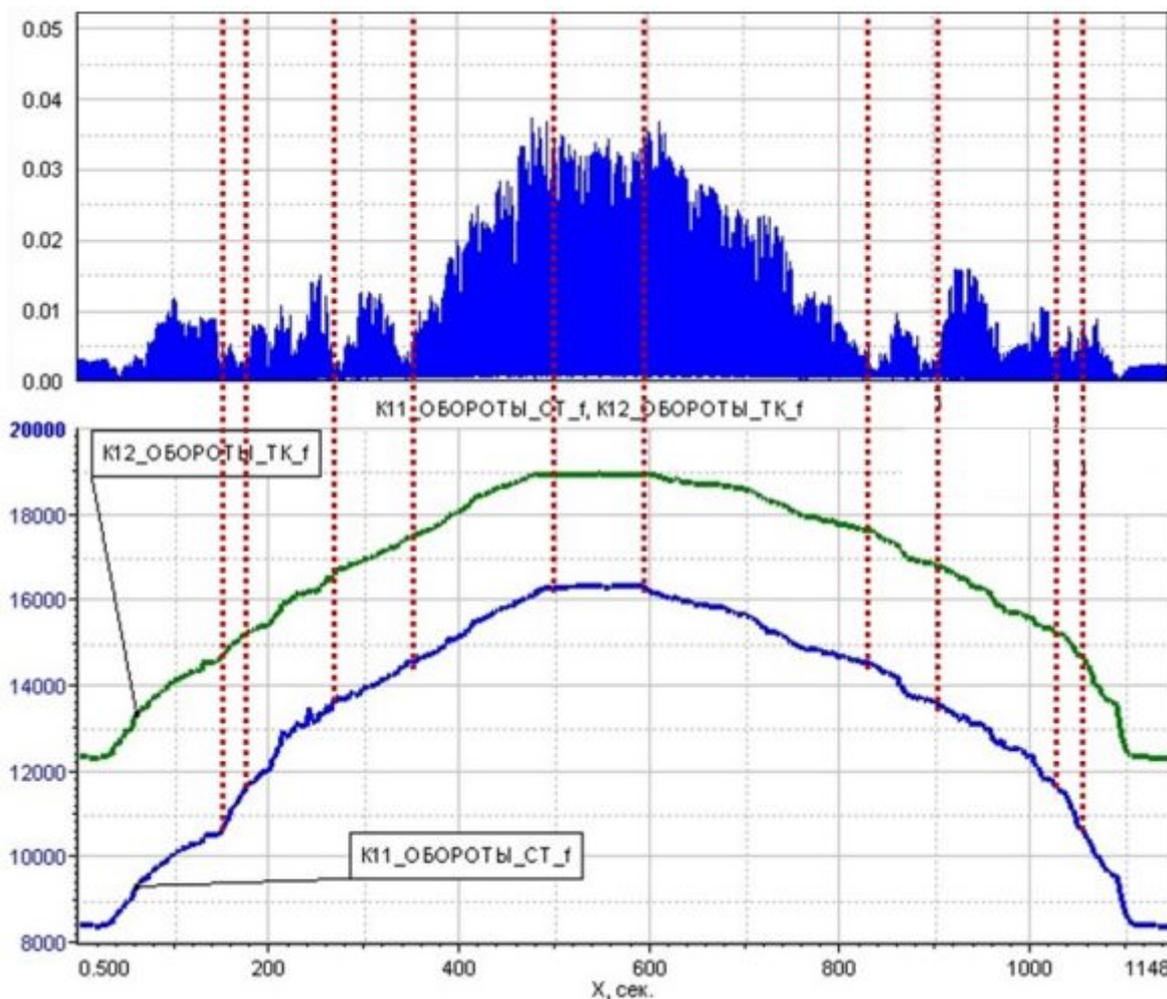


Рис. 5. График изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток второй ступени СТ и графики изменения оборотов ТК и СТ

Результаты узкополосного спектрального анализа сигналов с датчиков пульсаций давления над 1, 2, 3 и 4 ступенями КВД представлены на рис. 6. В ис-

следуемом диапазоне частот вращения получаем несколько режимов для каждой ступени, обозначенных на рис. 6. С учётом результатов ограниченного тензометрирования и расчётных значений частот и

форм колебаний, каждому полученному режиму с определённой частотой вращения приводятся в соответствие номера форм и гармоник окружной неравномерности потока.

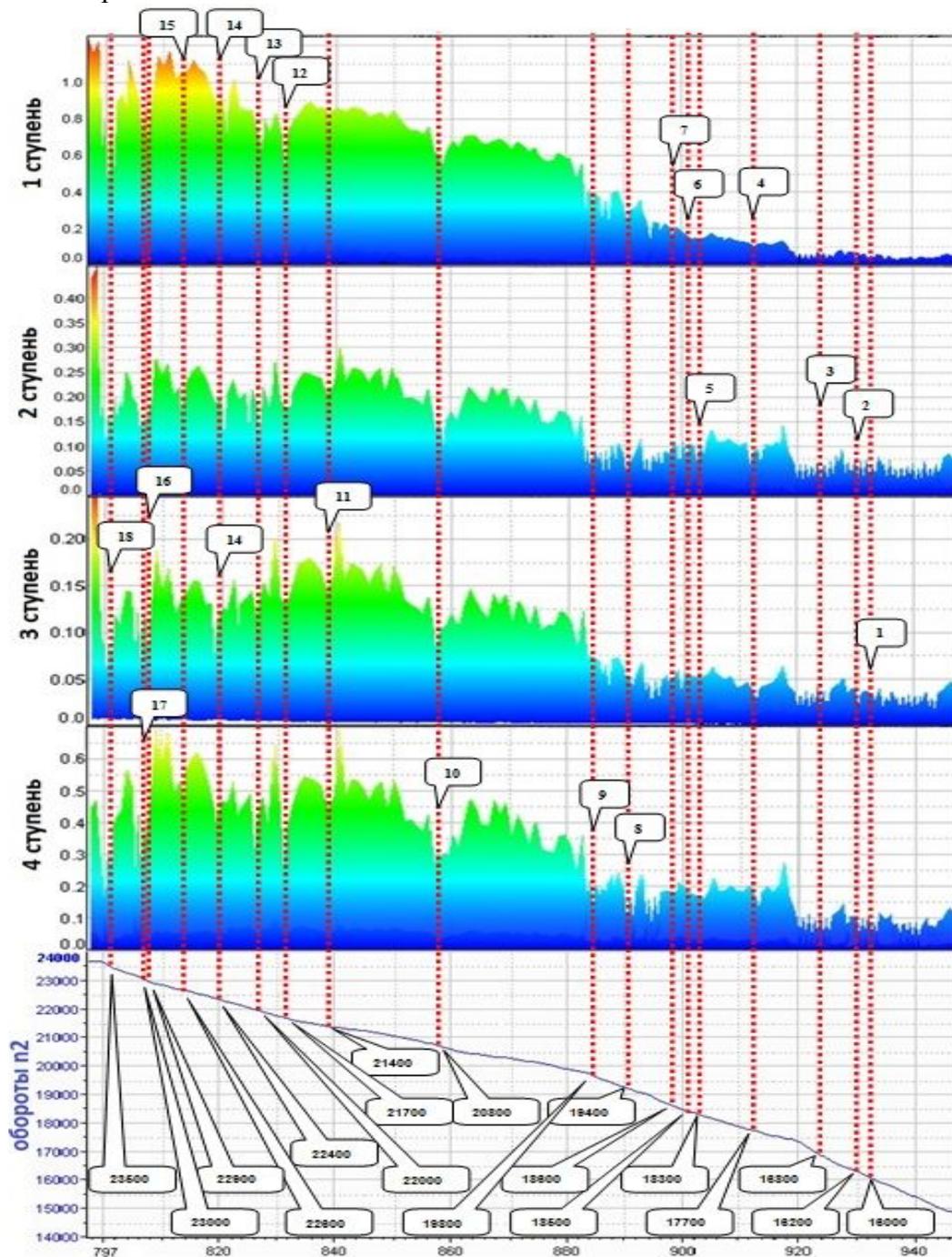


Рис. 6. Графики изменения спектральной составляющей на частоте следования лопаток 1-й, 2-й, 3-й и 4-й ступеней КВД и график изменения оборотов

В результате проведённых исследований резонансных колебаний рабочих лопаток компрессора и турбины экспериментального ТВД и КВД перспективного ГТД с применением метода диагностики

резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин по сигналам с датчиков пульсаций статического давления, основанного на измерении пульсаций давления потока на частоте следования лопаток

с использованием диаграмм Кэмпбелла, были определены формы колебаний лопаток, основные гармоники возбуждения резонансных колебаний от окружной неравномерности потока, а также режимы для проведения резонансных испытаний рабочих лопаток. Результаты диагностики резонансных колебаний были использованы непосредственно для проведения резонансных испытаний рабочих лопаток с целью подтверждения их динамической прочности в эксплуатационных условиях.

Таким образом, применение технологии определения частот вращения, при

которых возникают резонансные колебания лопаток в составе реактивного двигателя, с использованием высокочастотных датчиков пульсации давления позволяет существенно повысить эффективность и надёжность диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин, а также снизить материальные затраты на проведение резонансных испытаний по сравнению с традиционной технологией определения резонансных режимов на основе расчётных методов.

Библиографический список

1. Хориков А.А. Метод и система диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток компрессоров датчиками пульсаций // Сб. докладов конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Харьков: Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 1997.

2. Хориков А.А., Данилкин С.Ю.

Способ диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. Патент РФ № 2451279; опубл. 20.05.2012; бюл. № 14.

3. Хориков А.А., Данилкин С.Ю. Устройство диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. Патент РФ № 109287; опубл. 10.10.2011; бюл. № 28.

Информация об авторах

Хориков Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, расчетно-экспериментальный анализ.

Данилкин Сергей Юрьевич, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.

Баранова, г. Москва. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

Редькин Дмитрий Александрович, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

PERFECTION OF METHODS OF CONDUCTING RESONANCE TESTS OF ROTOR BLADES BEING PART OF THE ENGINE

© 2014 A.A. Khorikov, S.Y. Danilkin, D.A. Redkin

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

The new method of resonance test of rotor blades using blade oscillation non-contact diagnostics is presented. Diagnostics is based on narrowband spectral analysis of signals with high static pressure pulsation sensors mounted on the engine case. Experimental results of the turbomachinery rotor blades dynamic strength at bench tests using non-contact diagnostics resonance vibrations of blades are given. It is studied the resonant vibrations of rotor blades of the compressor and turbine of experimental turboprop engine and high-pressure compressor of a gas turbine engine with a promising diagnostic method using resonant vibrations of rotor blades by the signals from the sensors pulsation of static pressure, based on the measurement of pressure fluctuations in the flow of the blades repetition frequency, with using the Campbell diagram, identified by waveform blades, the main harmonic excitation of resonant oscillations of circumferential unevenness flow, as well as modes for the resonance testing of rotor blades. It is shown that the application of the new method can significantly improve the efficiency and reliability of the rotor blades resonant vibrations diagnostics, and reduce material costs of resonance testing compared with traditional technology determine the resonant modes on the basis of the calculation methods.

Rotor blades, resonance, testing, spectral analysis, flowpulsation, vibration frequency, non-contact diagnostics.

References

1. Khorikov A.A. Method and diagnostic system for aeroelastic vibrations of rotor blades compressors pulsation sensors // Sb. dokladov konferentsii «Sovershenstvovanie turbostanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya». Khar'kov: Institut problem mashinostroeniya NAN Ukrainy Publ., 1997.
2. Khorikov A.A., Danilkin S.Y. Sposob diagnostiki rezonansnykh kolebaniy lopatok rabocheho koleasa v sostave osevoy turbomashiny [Method of the rotor blades resonance oscillations diagnostics in the composition of axial turbomachine]. Patent RF, no. 2451279, 2012. (Publ. 20.05.2012, bull. no.14)
3. Khorikov A.A., Danilkin S.Y. Ustroystvo diagnostiki rezonansnykh kolebaniy lopatok rabocheho koleasa v sostave osevoy turbomashin [Device for the rotor blades resonance oscillations diagnostics in the composition of axial turbomachine]. Patent RF, № 109287, 2011. (Published 10.10.2011, bulletin No. 28)

About the authors

Khorikov Anatoliy Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), professor, head of department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, experiment-calculated analysis.

Danilkin Sergey Yurievich, chief of group, Central Institute of Aviation Motors,

Moscow. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, digital signal processing.

Redkin Dmitriy Aleksandrovich, engineer, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, digital signal processing.