

УДК 621.373.8

Д.Г. ФЕДОРЧЕНКО, А.В. ГЛАДКОВ, В.А. СОЛЯННИКОВ, А.И. ЖУЖУКИН

ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия

СПЕКЛ – ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Описана конструкция спекл-интерферометра, разработанного для исследования колебаний облопаченных колёс газотурбинных двигателей. Оптическая схема спекл – интерферометра и исследуемый объект размещены на массивной голографической платформе. Для выравнивания соотношения интенсивностей опорного и предметного пучков в центре и на периферии поверхности исследуемой крупногабаритной детали в оптической схеме интерферометра применён оптический растр. Для повышения контраста интерференционных полос в оптической схеме использован поляризационный фильтр. Получены формы колебаний колеса турбины 1-ступени одного из авиационных двигателей.

Ключевые слова: спекл – интерферометрия, формы колебаний, измерение вибраций, лазерные спеклы.

Введение

Анализ эксплуатационной надёжности газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что в большинстве случаев их работоспособность и ресурс определяются состоянием лопаток и дисков ротора. Наиболее опасными дефектами этих деталей являются усталостные трещины, вызванные резонансными колебаниями, в связи с чем возникает задача по исследованию собственных частот и форм колебаний облопаченных колёс ГТД.

Наиболее полную и достоверную информацию о вибрационных характеристиках элементов конструкций дают методы голографической [1] и цифровой спекл – интерферометрии [2 – 4]. В последнее время исследование вибрационных характеристик деталей ГТД наиболее эффективно проводятся методами цифровой спекл – интерферометрии, которые менее требовательны к виброзащищённости оптической схемы и при этом исключают использо-

вание высокоразрешающих фотохимических средств регистрации. Однако приведённые в работах [3, 4] цифровые спекл – интерферометры (ЦСИ) позволяют исследовать колебания только отдельных деталей, таких как рабочие и направляющие лопатки ГТД. Вместе с тем на практике остро стоит проблема обеспечения вибрационной прочности рабочих колёс турбомашин, которые являются одними из наиболее напряжённых элементов ГТД [5]. В работе [6] для исследования колебаний крупногабаритных конструкций разработан ЦСИ с использованием импульсного лазера. Однако применение специальных дорогостоящих телекамер, высокая стоимость импульсного лазера и блока синхронизации значительно ограничивают использование таких установок на практике. На ОАО «КУЗНЕЦОВ» разработан ЦСИ для исследования колебаний крупногабаритных деталей и узлов ГТД на базе непрерывного лазера (рис. 1). При этом использован интерферометр с разделёнными пучками и гладкой опорной волной.



Рис. 1. Спекл – интерферометр для исследования колебаний крупногабаритных деталей и узлов ГТД

Результаты исследований

Главной особенностью созданного ЦСИ является то, что оптическая схема и исследуемый объект размещены на голографической платформе размером 3x5 м, массой 14 т, находящейся на каучуковых подушках. Использование интерферометра с достаточно большими оптическими путями предъявляет более жёсткие требования по виброзащищённости оптической схемы, так как в этом случае небольшие колебания отражающих зеркал интерферометра приводят к значительным изменениям разности хода между опорным и предметным пучками.

Для исследования колебаний крупногабаритных объектов в качестве источника когерентного излучения могут быть использованы как гелий – неоновые лазеры типа ЛГН – 222, с длиной волны излучения 632,8 нм, мощностью 50 мвт, так и твердотельные лазеры непрерывного действия LCS – DTL – 317 - 50 с длиной волны излучения 532 нм, мощностью 50 мвт. Использование твердотельных лазеров предпочтительнее, так как они обладают значительно большей длиной когерентности, что облегчает настройку интерферометра. Оптическая схема разработанного ЦСИ приведена на рис. 2.

Установка работает следующим образом: излучение лазера 1 с помощью светоделителя 2 разделяется на два когерентных пучка – опорный и предметный. Опорный пучок с помощью поворотных зеркал 3,4 направляется на линзу 5, представляющую собой микрообъектив. После микрообъектива 5 расширенный пучок направляется на положительную линзу 6. С помощью линзы 6 расходящийся

опорный пучок преобразуется в сходящийся и направляется на оптический клин 7, расположенный перед объективом 13 телекамеры 14. Отражившись от передней грани клина, опорный пучок через объектив 13 попадает на светочувствительную матрицу телекамеры 14. Взаимной юстировкой оптического клина 7, линзы 6 необходимо добиться, чтобы опорная волна сходилась по оси объектива в точку в плоскости диафрагмы объектива 13.

Предметный пучок формируется из проходящей через светоделитель 2 части исходного пучка, расширяется с помощью микрообъектива 8 и, проходя через оптический растр 9, освещает исследуемый объект 10, находящийся на оптической оси объектива 13 телекамеры 14. Поляризационный фильтр 11 устанавливается, как описано в работе [7]. В результате на светочувствительной матрице телекамеры 14 регистрируется результирующая интерференционная картина спекл – структуры, образованной диффузной поверхностью исследуемого объекта 10 и гладкой опорной волной. Размер диафрагмы 12 объектива 13 должен быть установлен таким образом, чтобы характерный размер регистрируемых субъективных спеклов был больше или равен размеру элементарной ячейки светочувствительной матрицы телекамеры 14.

С помощью описываемой установки проведены исследования резонансных колебаний колеса 1-й ступени турбины одного из авиационных двигателей. Для расклинивания рабочих лопаток в исследуемом колесе с входной и выходной сторон устанавливались технологические клинья между диском и баллончиками лопаток.

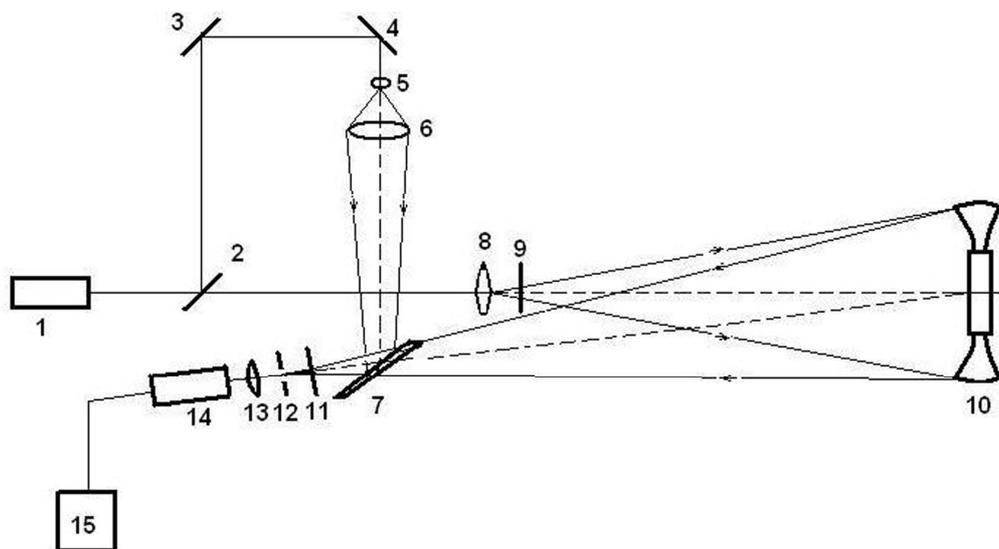


Рис. 2. Оптическая схема спекл – интерферометра с гладким опорным пучком для исследования крупногабаритных деталей и узлов ГТД:

- 1 – лазер; 2 – делитель пучка; 3,4 – поворотные зеркала; 5,6 – линзы; 7 – оптический клин; 8 – расширительная линза; 9 – оптический растр; 10 – исследуемый объект; 11 – поляризационный фильтр; 12 – диафрагма; 13 – объектив телекамеры; 14 – телекамера; 15 – персональная ЭВМ

Расклинное колесо крепилось 8 болтами к специально изготовленной установочной плите. Установочная плита с колесом с помощью четырёх болтов притягивалась к силовой раме, установленной на плите голографического интерферометра. Возбуждение колебаний колеса осуществлялось в осевом направлении с помощью электродинамического вибратора ВЭДС – 10А. Возбуждающее усилие от подвижной платформы возбудителя передавалось колесу с помощью переходника, который жёстко связан с подвижной платформой. Точка контакта переходника с колесом располагалась в плоскости полотна диска колеса. Частота возбуждения подаваемого на вибратор фиксировалась по цифровому табло частотомера ЧЗ – 32. Акустический сигнал отклика колеса на возбуждающее усилие регистрировался микрофоном МК – 102, установленным вблизи колеса, усиливался шумомером RFT 00 017 и подавался на вход электронного осциллографа С1 – 83, на который одновременно поступал сигнал от звукового генератора, возбуждающего колебания. При сканировании частоты возбуждения, в момент резонанса, резко возрастает уровень сигнала отклика, а на экране осциллографа возникает фигура Лиссажу. Резонансная частота определялась при максимальном уровне сигнала отклика по индикатору шумомера.

При колебаниях объекта на резонансной частоте, яркость наблюдаемого на экране монитора усреднённого за время ввода (40 мс) спекл – изображения в любой точке экрана (x, y) описывается выражением [4]:

$$B(x, y) = b \left[\langle I_O \rangle + \langle I_S \rangle + 2\sqrt{\langle I_O \rangle \langle I_S \rangle} \cdot J_0 \left(\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot \cos(\varphi_O - \varphi_S) \right], \quad (1)$$

где b – коэффициент, зависящий от параметров системы ввода;

$\langle I_O \rangle, \langle I_S \rangle$ – усреднённая за время ввода яркость опорного и предметного пучков;

J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$A(x, y)$ – амплитуда колебаний поверхности в точке (x, y);

φ_O, φ_S – фаза опорного и предметного пучков в точке (x, y).

Для получения высококонтрастной картины полос применяется метод вычитания изображений. Для этого спекл – изображение, соответствующее выражению (1), заносится в память компьютера. Фаза опорного пучка сдвигается на π , как описано в работе [3]. На экране монитора при этом наблюдается интерференционная картина аналогичная первой,

но на месте светлых спеклов размещаются тёмные и наоборот. Далее второе изображение вычитается по модулю из первого, хранящегося в памяти. В результате на экране монитора наблюдается изображение контрастной интерференционной картины, яркость которого может быть описана выражением [4]:

$$\Delta B = 4b \left[\langle I_O \rangle \langle I_S \rangle J_0^2 \left(\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot \cos^2(\varphi_O - \varphi_S) \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Контраст получаемых таким образом интерференционных полос высок и позволяет оценить величину $A(x, y)$ в каждой точке поверхности объекта. При нормальных колебаниях поверхности объекта это выражение дает такое же расположение интерференционных полос, как и в случае голографической интерферометрии.

В работе [2] показано, что соотношение сигнал/шум на спекл – интерферограмме для ЦСИ с гладким опорным пучком определяется следующим выражением:

$$\frac{S}{N} = \frac{4b \sqrt{v} \mu \cdot I_{i \text{ на}}}{1 + v + 2 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{250} + 2v \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент, определяемый устройством ввода;

v – соотношение интенсивностей опорного и предметного пучков;

$I_{i \text{ на}}$ – интенсивность насыщения телекамеры.

Анализ выражения (3) показывает, что наиболее оптимальным ($S/N - \text{max}$) является случай, когда $v = 2$. Генерируемое лазером когерентное излучение имеет гауссовский профиль, то есть в центре пучка мощность излучения максимальна, на краях пучка мощность спадает. Это приводит к дополнительным трудностям при записи спекл – интерферограмм крупногабаритных объектов, так как в этом случае освещённость в центре исследуемой детали будет больше, чем на краях детали. В результате может возникнуть значительная разница в соотношении интенсивностей опорного и предметного пучков в центре детали и на периферии, что приводит на некоторых участках исследуемого объекта в соответствии с выражением (3) к падению соотношения S/N .

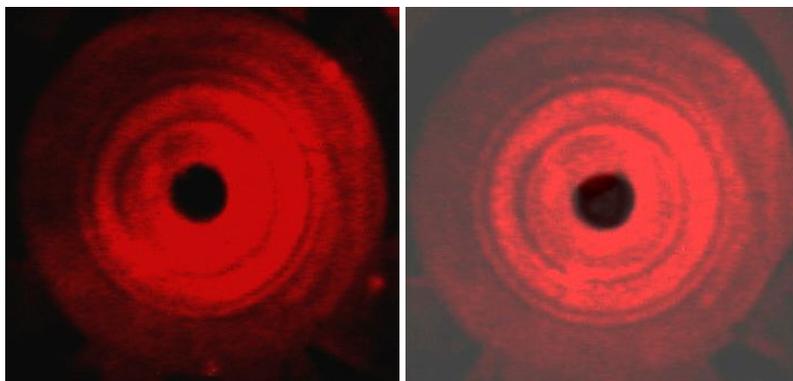
Применение оптического растра позволяет в значительной степени устранить этот недостаток. Оптический растр представляет собой совокупность микролинз, размещённых на одной, как правило, плоской поверхности. На рис. 3 приведён пример,

когда колесо турбины освещено без растра и с применением растра.

В случае, когда для освещения объекта применён оптический растр (рис.3б), поверхность исследуемой детали освещена более равномерно. Это яв-

ляется необходимым условием для получения качественных спекл – интерферограмм.

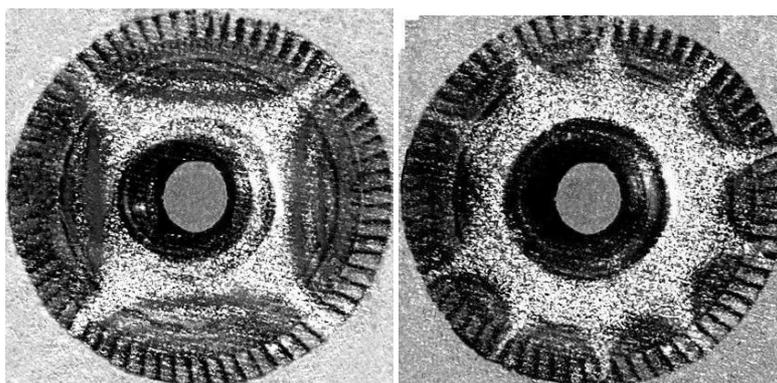
Описываемый интерферометр позволяет эффективно и оперативно исследовать вибрационные характеристики облопаченных колёс ГТД (рис. 4).



а

б

Рис. 3. Примеры освещения колеса турбины лазерным излучением: а – без использования растра; б – с применением растра



1042 Гц

1814 Гц

Рис.4. Частоты и формы колебаний колеса турбины 1-й ступени

Выводы

1. Разработана методика и создан стенд для исследования собственных частот и форм колебаний крупногабаритных узлов ГТД методом цифровой спекл-интерферометрии, позволяющие исследовать связанные колебания лопаток и диска в колёсах турбин и компрессоров.

2. Применение растра в оптической схеме ЦСИ позволило получить спекл-интерферограммы, на которых интерференционные полосы видны по всей поверхности исследуемой конструкции.

3. Разработанный ЦСИ для исследования колебаний крупногабаритных объектов эффективно использован при прочностной доводке колеса турбины

1-й ступени одного из авиационных ГТД для определения его вибрационных характеристик.

Литература

1. Макаева, Р.Х. Использование голографической интерферометрии для диагностики технического состояния деталей турбомашин [Текст] / Р.Х. Макаева // Изв. вузов. Авиаци. техника. - 2008. - №2. - С. 72 – 74.
2. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия [Текст] / Р. Джоунс, К. Уайкс. - М.: Мир. 1986. - 328 с.
3. Еленевский, Д.С. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов [Текст] /Д.С. Еленевский, Ю.Н. Шапош-

ников // Изв. Самарского научного центра РАН. - 1999. - № 1. - С. 134-136.

4. Комаров, С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл – интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01/ Комаров Сергей Юрьевич. - Самара, 2004. - 234 с.

5. Иванов, В.П. Колебания рабочих колёс турбомашин [Текст] / В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.

6. Pedrini, G Digital double pulsed TV-holography [Text] / G. Pedrini, H. Tiziani, Y. Zou // Optics and Lasers in Engineering. – 1997. - № 26. - P. 199-219.

7. Жужукин, А.И. Применение поляризационного фильтра для повышения соотношения сигнал/шум на спекл – интерферограммах [Текст] /А.И. Жужукин, В.А. Соляников // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, №2. – С. 220 – 223.

Поступила в редакцию 27.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры АСЭУ Н.Д. Быстров, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия.

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Д.Г. Федорченко, О.В. Гладков, В.А. Соляников, А.І. Жужукин

Описано конструкцію спекл-інтерферометра, розробленого для дослідження коливань облопачених коліс газотурбінних двигунів. Оптична схема спекл-інтерферометра і дослідний об'єкт розташовані на масивній голографічній платформі. Для вирівнювання співвідношення інтенсивностей опорного і предметного пучків в центрі і на периферії поверхні досліджуваної великогабаритної деталі в оптичній схемі інтерферометра застосовано оптичний растр. Для підвищення контрастності інтерференційних смуг в оптичній схемі використано поляризаційний фільтр. Отримані форми коливань колеса турбіни 1 ступеня одного з авіаційних двигунів.

Ключові слова: спекл-інтерферометрія, форми коливань, вимірювання вібрацій, лазерні спекли.

SPECKLE-INTERFEROMETER FOR GAS TURBINE ENGINE LARGE-SIZE PARTS AND COMPONENTS VIBRATIONS STUDY

D.G. Fedorchenko, A.V. Gladkov, V.A. Solyannikov, A.I. Zhuzhukin

The article gives the description of a speckle-interferometer designed and developed for gas turbine engine bladed wheels vibrations study. Optical scheme of speckle-interferometer and the object of study are on the massive holographic platform. An optic raster is included into interferometer optic scheme for equalizing reference and object bunches intensities correlation in the center and on periphery of a large-size part surface being studied. A polarizing filter is used in the optic scheme for increase of interference bands contrast. Engine turbine stage-1 wheel vibration modes were obtained and are given in the article.

Key words: speckle interferometry, vibration modes, vibration measurement, laser speckles.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, Генеральный конструктор ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия, e-mail: gk_okb@kuznetsov-motors.ru.

Гладков Александр Владимирович – начальник научно – исследовательского лабораторного комплекса ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия, e-mail: cntkknio@yandex.ru.

Соляников Виктор Анатольевич - канд. техн. наук, начальник конструкторского научно – исследовательского отделения ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия, e-mail: cntkknio@yandex.ru.

Жужукин Анатолий Иванович - канд. техн. наук, инженер – конструктор, ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия, e-mail: cntkknio@yandex.ru.