

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ В ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ВИБРОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2013 А.И. Жужукин, В.А. Соляников

ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара

Поступила в редакцию 19.02.2013

В оптической схеме спекл-интерферометра с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной впервые выявлена возможность использования цифровой фотокамеры для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД. Указаны особенности расположения фотокамеры в оптической схеме спекл – интерферометра. Замена телекамеры на фотокамеру позволила повысить контраст интерференционных полос и увеличить диапазон допустимых виброперемещений.

Ключевые слова: виброметрия, голографическая и спекл-интерферометрия, лазерные спеклы, спекл-шум

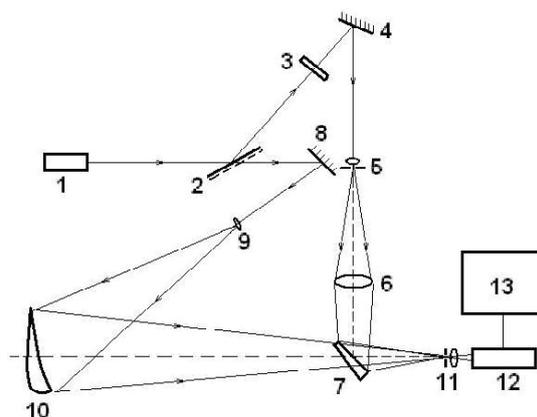
Прогнозирование динамической напряжённости деталей и узлов газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из наиболее сложных и в настоящий момент до конца нерешённых задач, встающих перед разработчиками двигателей на стадии проектирования и поузловой доводки по параметрам прочности. Анализ собственных частот и форм колебаний проектируемых деталей является составной частью в решении проблемы прогнозирования и снижения динамической напряжённости деталей. На стадии проектирования эта проблема находит решение с использованием расчётных методов, которые, однако, не позволяют полностью учесть индивидуальные особенности изготовления конкретной детали, отклонения в геометрии и свойствах материала. Полученные при этом данные являются ориентировочными и позволяют принимать решения в целом, без учёта индивидуальных особенностей деталей. Для определения истинных значений собственных частот и форм колебаний конкретных деталей необходимо применение экспериментальных методов.

В настоящее время к наиболее эффективным экспериментальным средствам исследования колебаний реальных конструкций относятся методы голографической и цифровой спекл – интерферометрии [1, 2]. Эти методы дают наиболее полную информацию о колебаниях деталей. Применение голографических методов требует значительных затрат по времени и предполагает использование дорогостоящего экспериментального оборудования. Существующие методы цифровой спекл-интерферометрии позволяют опера-

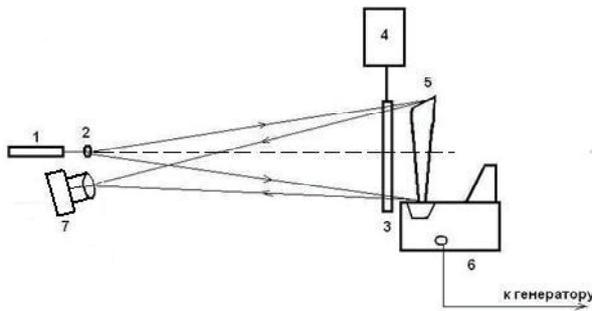
*Жужукин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, инженер-конструктор. E-mail: cntkknio@yandex.ru*  
*Соляников Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения. E-mail: cntkknio@yandex.ru*

тивно регистрировать формы колебаний деталей. В большинстве применяемых на практике цифровых спекл – интерферометров (ЦСИ) используются оптические схемы с гладким опорным пучком и разделёнными ветвями, заимствованные из голографической интерферометрии (рис. 1) [2, 3].

Главным недостатком таких ЦСИ является достаточно высокая сложность юстировки оптической схемы, так как в этом случае с помощью светоделителя 7 нужно совместить оптические оси предметного и опорного пучков. На этой же оптической оси должна располагаться телекамера 12. Одновременно с этим необходимо сфокусировать опорный пучок в плоскости диафрагмы объектива 11 телекамеры 12 для равномерного освещения рабочей поверхности ПЗС-матрицы телекамеры. Настройка такого интер-



**Рис. 1.** ЦСИ с гладкой опорной волной и разделёнными пучками для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД: 1 – лазер; 2 – светоделитель; 3 – оптический фильтр; 4 – поворотное зеркало; 5 – микрообъектив; 6 – линза; 7 – светоделитель; 8 – поворотное зеркало; 9 – микрообъектив; 10 – исследуемый объект; 11 – объектив телекамеры; 12 – телекамера; 13 – персональная ЭВМ



**Рис. 2.** ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной и совмещёнными пучками для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД:

1 – лазер; 2 – расширительная линза; 3 – диффузор; 4 – держатель диффузора; 5 – исследуемый объект; 6 – устройство возбуждения; 7 – видеосистема

ферометра проводится поэтапно и требует постоянного наблюдения на экране монитора процесса сведения интерферирующих пучков. В связи с указанными особенностями для регистрации спекл – интерферограмм с помощью таких спекл – интерферометров используются телекамеры. Однако телекамеры, обладая высокой стоимостью, имеют относительно низкую разрешающую способность, что приводит к снижению контраста получаемых спекл – интерферограмм.

В работе [4] разработан ЦСИ, оптическая схема которого значительно упрощена за счёт использования спекл – модулированного опорного пучка, сформированного с помощью фазового объекта – диффузора, расположенного перед исследуемым объектом (рис.2).

Эта установка предназначена для регистрации перемещений, перпендикулярных поверхности объекта. Юстировка оптической схемы такого ЦСИ проста, что позволяет использовать для регистрации интерференционной картины предметного и опорного пучков цифровую фотокамеру. При этом необходимо соблюдать условие, чтобы лазер 1, расширительная линза 2, диффузор 3 и исследуемый объект 5 находились на одной оптической оси, а видеосистема 7 должна быть максимально приближена к этой оптической оси. Наложение предметного и опорного пучков в этой схеме осуществляется за счёт расположения диффузора 3, формирователя опорной волны, перед исследуемым объектом 5.

В данной работе с помощью спекл – интерферометра, представленного на рис.2, была исследована лопатка 10-й ступени компрессора производства ОАО “КУЗНЕЦОВ”. При этом использовалась первоначально телекамера MTV – 4363 СА с разрешением 640x480, а затем на её место устанавливалась цифровая фотокамера Canon EOS 1100D с разрешением 4272x2848 (рис.3).

Приведённые спекл – интерферограммы получены методом вычитания изображений, как опи-

сано в [5]. В этом случае яркость изображения наблюдаемой на экране монитора интерференционной картины определяется выражением:

$$B = 4b \left[ \langle I_s \rangle \langle I_o \rangle J_0^2 \left( \frac{4\pi A(x,y)}{\lambda} \right) \cdot \cos^2(\varphi_s - \varphi_o) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от параметров системы ввода;  $\langle I_s \rangle, \langle I_o \rangle$  – усреднённая за время ввода интенсивность предметного и опорного пучков в точке  $(x, y)$ ;  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $A(x, y)$  – амплитуда колебаний поверхности в точке  $(x, y)$ ;  $\varphi_s, \varphi_o$  – фаза предметного и опорного пучков в точке  $(x, y)$ .

Здесь члены  $\langle I_s \rangle, \langle I_o \rangle$ , а также  $(\varphi_s - \varphi_o)$  представляют собой случайные величины и являются источниками спекл – шумов на спекл – интерферограмме. Информацию об амплитуде колебаний в каждой точке поверхности исследуемой детали содержит член  $J_0 \left( \frac{4\pi A}{\lambda} \right)$ .

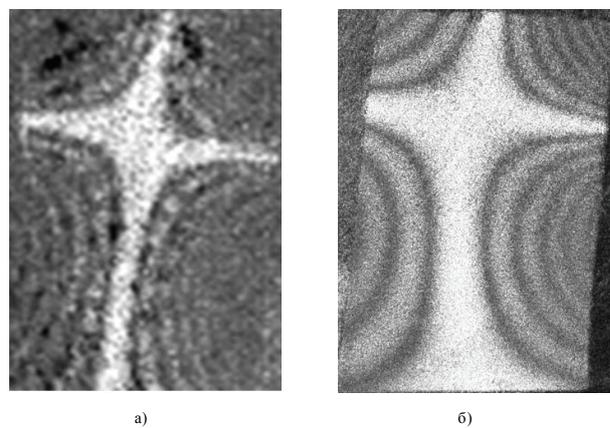
При этом необходимо иметь в виду, что формула (1) справедлива для случая, когда время экспозиции кадра велико по сравнению с периодом колебаний исследуемого объекта.

Из формулы (1) видно, что яркость светлых полос быстро падает в соответствии с функцией Бесселя. Тем не менее контраст полос без учёта шумов, определяемый как

$$V = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (2)$$

и для полос высоких порядков равен единице.

В выражении (2)  $B_{\max}$  – максимальная яркость светлой полосы;  $B_{\min}$  – минимальная яркость тёмной полосы.



**Рис. 3.** Спекл – интерферограммы колеблющейся на частоте 9387 Гц лопатки 10-й ступени компрессора, зарегистрированные с помощью: а – телекамеры MTV – 4363 СА; б – фотокамеры Canon EOS 1100D

Однако из-за наличия спекл-шумов, уровень которых сравним с интенсивностью вторичных максимумов функции Бесселя, контраст интерференционных полос при исследовании вибраций быстро падает, и полосы становятся неразличимыми (рис. 3а). В результате теряется информация о колебаниях в этих точках поверхности исследуемой детали.

В работе [5] показано, что интервалы между интерференционными полосами и их контраст зависят от разрешающей способности используемой видеосистемы. При этом установлено, что контраст полос возрастает с увеличением разрешающей способности видеосистемы. В результате экспериментальных исследований, выполненных в работе [4], доказано, что в случае использования видеосистемы с одинаковой разрешающей способностью контраст интерференционных полос на спекл – интерферограммах, получаемых с помощью ЦСИ с гладкой опорной волной, выше, чем на спекл – интерферограммах, получаемых на ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной. Однако за счёт возможности использования видеосистемы с более высоким разрешением, например, фотокамеры

Canon EOS 1100D, при исследовании вибраций контраст полос на спекл- интерферограммах, получаемых с помощью ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной, может значительно превышать контраст интерференционных полос на спекл-интерферограммах, получаемых с помощью спекл – интерферометра с гладкой опорной волной. Кроме того, при исследовании колебаний объектов различных геометрических размеров ЦСИ с гладкой опорной волной необходимо перенастраивать, причём наибольшие технические трудности возникают при исследовании вибраций деталей ГТД с относительно малыми геометрическими размерами и высокими градиентами перемещений. Так, при экспериментальных исследованиях, проведённых в работе [3], используя оптическую схему на рис. 1, авторы испытывали затруднения при регистрации вторичных максимумов на спекл – интерферограммах детали размером 40x32 мм. В данной работе объектом исследования была лопатка 14-й ступени компрессора высотой 26,2 мм и хордой 21,5 мм (рис. 4).

В результате анализа спекл – интерферог-

| Частота колебаний | Спекл – интерферограммы получены с помощью установки на рис.1 телекамерой MTV – 4363 CA | Спекл – интерферограммы получены с помощью установки на рис.2 фотокамерой Canon EOS 1100D |
|-------------------|---|---|
| 2301 Гц           |   |   |
| 4808 Гц           |   |   |
| 10 926 Гц         |   |   |

Рис. 4. Частоты и формы колебаний лопатки 14-й ступени компрессора

рам на рис.4 было установлено, что контраст полос на спекл – интерферограммах, полученных с помощью ЦСИ со спекл – модулированной опорной волной (рис.2) после замены телекамеры на фотокамеру, на различных участках интерферограммы на 15-30% выше, чем на спекл – интерферограммах, полученных на установке, приведённой на рис.1. Величина контраста полос вычислялась в соответствии с выражением (2). При этом необходимо отметить, что на всех формах колебаний увеличилось и число регистрируемых интерференционных полос. Так на основном тоне при частоте колебаний 2301 Гц на спекл – интерферограмме, полученной с помощью установки с гладкой опорной волной, на данной лопатке можно наблюдать не более четырёх интерференционных полос. В то время как на установке со спекл – модулированной опорной волной зарегистрировано семь интерференционных полос. Это означает, что диапазон допустимых амплитуд колебаний в случае использования гелий-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм) увеличился с 0,59 до 1,06 мкм. При колебаниях на первой крутильной форме на частоте 4808 Гц эта величина увеличилась с 0,46 до 1,21 мкм. На частоте 10926 Гц (изгибная форма) допустимая амплитуда колебаний верхней кромки лопатки увеличилась с 0,28 до 0,75 мкм. Такая же тенденция сохраняется и на более высоких формах колебаний.

### ВЫВОДЫ

- Впервые при исследовании вибраций методом цифровой спекл - интерферометрии выявлена и экспериментально подтверждена возмож-

ность применения цифровой фотокамеры для регистрации форм колебаний деталей ГТД;

- при динамических испытаниях лопатки 14-й ступени компрессора использование цифровой фотокамеры в оптической схеме ЦСИ со спекл – модулированной опорной волной позволило превысить контраст интерференционных полос на спекл – интерферограммах, получаемых с помощью ЦСИ с гладкой опорной волной, более чем на 15%;

- применение цифровой фотокамеры Canon EOS 1100D вместо телекамеры MTV – 4363 CA в оптической схеме ЦСИ со спекл – модулированной опорной волной привело к увеличению диапазона допустимых вибрационных перемещений более чем на 80% по сравнению с ЦСИ с гладкой опорной волной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царёва А.М. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии // Известия вузов. Авиационная техника. 2007. №1. С. 78 – 80.
2. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №1. С.134-136.
3. Журавлёв О.А., Комаров С.Ю., Попов К.Н., Прокофьев А.Б. Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок // Компьютерная оптика. 2001. Т.21. С.7 – 11.
4. Жужукин А.И. Мобильный цифровой спекл-интерферометр для виброметрии деталей и узлов ГТД: Дисс. ... канд. техн. наук. Самара: СГАУ, 2011. 224 с.
5. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир. 1986. 328 с.

## THE UTILIZATION PECULIARITIES OF DIGITAL CAMERA IN THE OPTICAL SCHEME OF SPECKLE PATTERN INTERFEROMETER FOR VIBROMETRY OF GAS TURBINE ENGINES PARTS

© 2013 A.I. Zhuzhukin, V.A. Solyannikov

JSC “KUZNETSOV”, Samara

In the optical scheme of speckle pattern interferometer with the combined beams and speckle - modulated reference wave, the possibility use of a digital photo-camera for the study of vibration characteristics of gas turbine engines parts is revealed. The Peculiarities arrangements of camera in optical scheme are indicated. The use of high-resolution camera provides increased contrast of interference fringes and it expands dynamic range of vibration amplitudes during recording.

Key words: Vibrometry, holographic and Speckle – Interferometry, Speckle pattern, Speckle-noise

Anatoly Zhuzhukin, Candidate of Technics, Design Engineer.

E-mail: cntkknio@yandex.ru

Victor Solyannikov, Candidate of Technics, Chief of Design and Scientific Studies Department.

E-mail: cntkknio@yandex.ru