

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ И СТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© 2013 А.И. Жужукин¹

Разработан цифровой спекл-интерферометр с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной для исследования вибрационных характеристик и деформационных перемещений, вызванных статическими нагрузками, деталей энергетических установок. Экспериментально установлено, что при исследовании вибраций за счет возможности использования в оптической схеме цифровой фотокамеры на спекл-интерферограммах, полученных с помощью разработанного спекл-интерферометра, дисперсия спекл-шума 2,5–3,2 раза ниже, чем на спекл-интерферограммах, полученных с помощью традиционно применяемого спекл-интерферометра с разделенными пучками и гладкой опорной волной.

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

При создании новых энергетических установок первостепенное значение имеет обеспечение их прочности и надежности. При этом одной из задач в решении проблемы исследования вибрационных нагрузок в энергетических установках различного назначения является задача определения вибрационных характеристик и, в первую очередь, собственных частот и форм колебаний составляющих их функциональных элементов. Другой важной задачей является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей при статических нагрузках. В настоящее время для исследования вибрационных характеристик элементов конструкций и изучения НДС, вызванных статическими нагрузками, существует два направления — расчетное и экспериментальное.

Современные расчетные методы в большинстве случаев дают возможность смоделировать форму детали или узла, условия внешнего нагружения — статические, динамические, температурные, позволяют получить НДС практически в любой точке детали. Существующие расчетно-компьютерные комплексы, такие как, например, ANSYS, позволяют учитывать практически любые существующие в механике теории, рабочие нагрузки и условия эксплуатации конструкции. Точность расчетов при этом достаточно высока, что дает возможность проектировать детали с высокой степенью надежности.

Вместе с тем в расчетных условиях не всегда представляется возможным правильно назначить действительные условия нагружения деталей. Не всегда расчет-

¹Жужукин Анатолий Иванович (cntkknio@yandex.ru), инженер-конструктор конструкторского научно-исследовательского отделения "ОАО КУЗНЕЦОВ", 433009, Российская Федерация, г. Самара, Заводское шоссе, 29.

ная модель учитывает все особенности формы детали. Поэтому экспериментальная оценка НДС деталей, особенно в наиболее опасных точках, является непрерывным и обязательным этапом в исследовании работоспособности, надежности деталей и узлов таких энергетических установок, как газотурбинные двигатели.

Для экспериментального определения НДС деталей и узлов энергетических установок, вызванных вибрационными и статическими нагрузками, применяются различные методы и средства измерений. Наибольшее распространение получили методы тензометрирования, дающие информацию о напряжениях и деформациях деталей и узлов на работающем агрегате. Однако для определения места наклеивания тензодатчиков, как правило, требуется априорная информация о распределении поля деформаций по всей поверхности исследуемой детали.

В настоящее время для получения полной информации по всей поверхности исследуемых деталей, узлов конструкций при приложении к ним статических или динамических нагрузок наиболее эффективно применяются методы голографической интерферометрии [1–3] и цифровой спекл-интерферометрии [3–7]. Применение голографических методов ограничено экспериментальными трудностями из-за длительности и трудоемкости испытаний. Вследствие этого в последние годы методы цифровой спекл-интерферометрии получили наибольшее распространение.

При использовании метода цифровой спекл-интерферометрии особое внимание уделяется выбору оптической схемы интерферометра. В большинстве случаев используется оптическая схема цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с разделенными пучками и гладкой опорной волной (рис. 1) [4; 5].

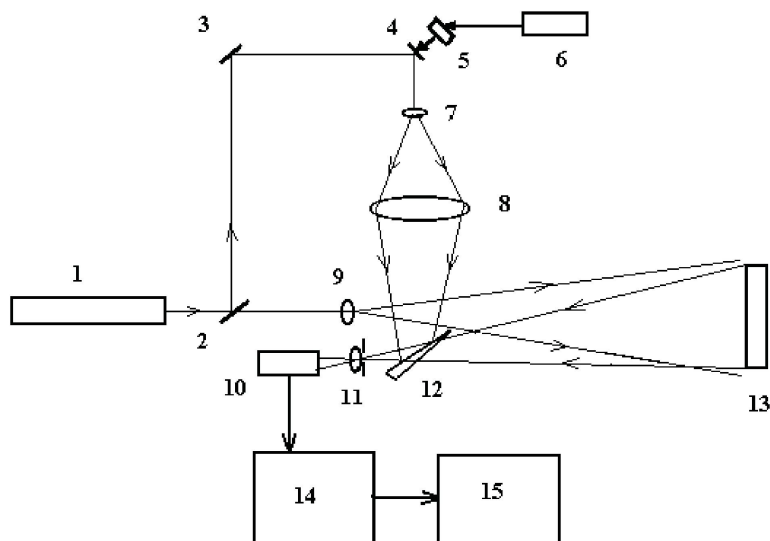


Рис. 1. Схема ЦСИ с разделенными пучками и гладкой опорной волной:

1 — лазер; 2 — светоделитель; 3 — зеркало; 4 — подвижное зеркало; 5 — пьезоэлектрическая пластина; 6 — блок управления фазой опорного пучка; 7, 8, 9 — линза; 10 — ПЗС-телекамера; 11 — объектив телекамеры; 12 — клин; 13 — вибрирующий объект; 14 — модуль ввода изображений; 15 — персональный компьютер

Оптическая схема приведенного ЦСИ требует сложной юстировки, в связи с чем для регистрации спекл-интерферограмм с помощью таких спекл-интерферо-

метров используются телекамеры. Однако телекамеры, обладая высокой стоимостью, имеют относительно низкую разрешающую способность, что приводит к снижению контраста получаемых спекл-интерферограмм. При этом пока не созданы эффективные алгоритмы для фильтрации шумов на спекл-интерферограммах диффузно отражающих объектов, что затрудняет автоматизированную обработку интерферограмм. Первостепенное значение в этом случае имеет разработка средств уменьшения спекл-шумов на этапе проведения эксперимента.

В работе [3] доказано, что контраст интерференционных полос на спекл-интерферограммах возрастает с увеличением разрешающей способности используемой видеосистемы. На ОАО "КУЗНЕЦОВ" для исследования вибраций и статических деформаций деталей энергетических машин разработан ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной, в котором опорный пучок сформирован с помощью диффузора, расположенного перед исследуемым объектом. Эта схема проста при юстировке и содержит малое число оптических элементов (рис. 2).

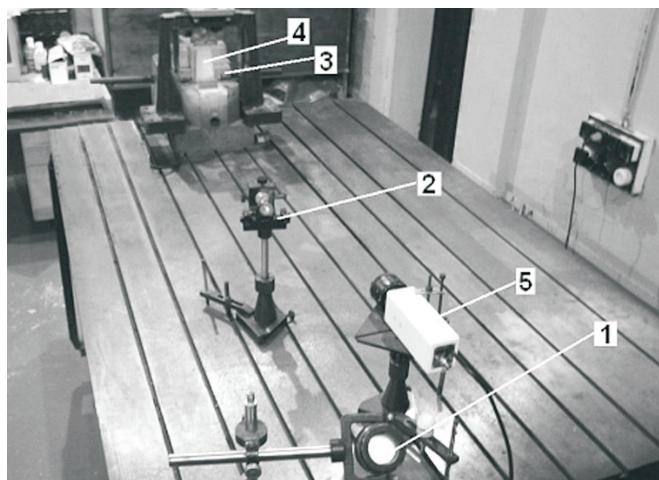


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки на основе ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной:

1 — поворотное зеркало для подвода излучения; 2 — распыритель пучка; 3 — диффузор; 4 — исследуемый объект; 5 — камера регистрации

Как установлено в работе [6], в случае использования одной и той же камеры регистрации контраст интерференционных полос на спекл-интерферограммах, получаемых с помощью установки на рис. 1, выше, чем это позволяет сделать установка на рис. 2. Однако юстировка оптической схемы ЦСИ на рис. 2 настолько проста, что для регистрации спекл-интерферограмм можно использовать цифровую фотокамеру. Ввиду того что разрешающая способность у большинства фотокамер значительно выше, чем у телекамер, это позволяет повысить контраст интерференционных полос на спекл-интерферограммах, получаемых с помощью ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной как при вибрационных испытаниях, так и при статическом нагружении. В данной работе объектом исследования была лопатка 14 ступени компрессора высотой 26,2 мм и хордой 21,5 мм производства ОАО "КУЗНЕЦОВ". На первом этапе регистрация спекл-интерферограмм проводилась с помощью ЦСИ с разделенными пучками и

гладкой опорной волной телекамерой MTV – 4363 СА, а затем с помощью ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной фотокамерой Canon EOS 1100D. На рис. 3 приведены результаты вибрационных испытаний.

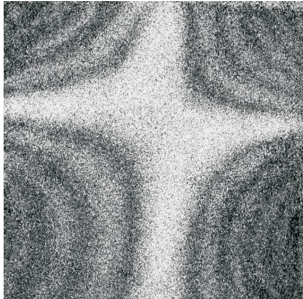
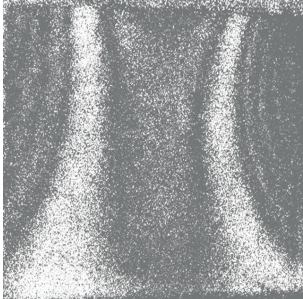
Частота колебаний, Гц	Спекл-интерферограммы получены с помощью ЦСИ на рис. 1 телекамерой MTV- 4363 СА	Спекл-интерферограммы получены с помощью ЦСИ на рис. 2 фотокамерой Canon EOS 1100D
13286		
16908		

Рис. 3. Частоты и формы колебаний 14-й ступени лопатки компрессора

Спекл-интерферограммы получены методом вычитания изображений, примененным в работе [3]. Яркость наблюдаемой на экране монитора интерференционной картины в этом случае описывается 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, $\langle I_S \rangle, \langle I_O \rangle$ — усредненная за время ввода яркость 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) , λ — длина волны лазерного излучения, φ_S, φ_O — фаза предметного и опорного пучков в точке (x, y) .

В случае использования для записи спекл-интерферограмм ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной 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. Для ЦСИ с гладкой опорной волной $\langle I_O \rangle, \varphi_O$ яв-

ляются постоянными величинами. В обоих случаях информацию об амплитуде колебаний в каждой точке поверхности детали содержит член $J_0(\frac{4\pi A}{\lambda})$.

Таким образом, выражение (1) может быть записано:

$$B = 4b \left[J_0^2 \left(\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot N(x, y) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $N(x, y)$ — функция, описывающая спекл-шумы на спекл-интерферограмме.

Числовые значения k_i аргумента функции Бесселя, при которых она обращается в нуль, являются корнями функции Бесселя (а индекс i -номером корня), они заранее известны. Множество точек изображения, в которых функция Бесселя, описывающая форму резонансных колебаний объекта, принимает нулевое значение, представляет собой темные полосы на спекл-интерферограмме.

Приравнивая аргумент функции Бесселя числовым значениям ее корней, получим семейство кривых, в совокупности представляющих собой линии равных амплитуд колебаний исследуемой детали:

$$A_i = \frac{k_i}{4\pi} \cdot \lambda. \quad (3)$$

При количественной интерпретации спекл-интерферограмм погрешность вычисленных по формуле (3) амплитуд колебаний определяется погрешностью определения центров темных полос, которая зависит от уровня спекл-шумов [1].

В узловых линиях $A = 0$. Следовательно, в этих точках $J_0(0) = 1$. На рис. 3 узловые линии представляют собой наиболее яркие светлые полосы. Яркость изображения в области узловых линий, как следует из выражения (2):

$$B = 4b [N(x, y)]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с выражением (4) в областях узловых линий на спекл-интерферограммах яркость изображения определяется присутствующими спекл-шумами. С помощью специально разработанной программы были проведены измерения дисперсии шума в области узловых линий на спекл-интерферограммах, приведенных на рис. 3. Исследования показали, что дисперсия шумов на различных участках узловых линий спекл-интерферограмм, зарегистрированных с помощью ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной (рис. 2) фотокамерой Canon EOS 1100D, в 2,5–3,2 раза ниже, чем на спекл-интерферограммах, полученных с помощью ЦСИ с разделенными пучками и гладкой опорной волной (рис. 1) телекамерой MTV-4363 CA.

В ходе дальнейших испытаний исследуемая лопатка подвергалась статическому нагружению. Использование приведенного на рис. 1 ЦСИ с разделенными пучками и гладкой опорной волной при исследовании статических нагрузок затруднено необходимостью обеспечения надежной виброизоляции оптических элементов, что приводит к значительному усложнению эксперимента. В связи с этим использовалась установка, приведенная на рис. 2, которая, как показано в работе [7], обладает значительно большей устойчивостью к внешним случайным воздействиям. Результаты статических испытаний представлены на рис. 4.

По формуле $d = \frac{\lambda}{2}n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) вычисляются деформационные перемещения в центрах темных полос. По формуле $d = \frac{\lambda}{2}(n + \frac{1}{2})$ могут быть получены деформационные перемещения в центрах светлых полос. При этом деформационные перемещения верхней кромки лопатки в эксперименте, приведенном на рис. 4, a , составляют 3,8 мкм, а в эксперименте на рис. 4, b — 5,1 мкм, что соответствовало

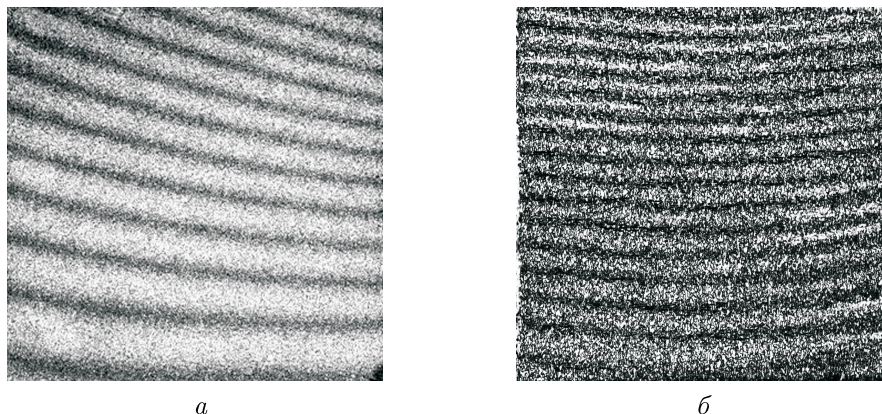


Рис. 4. Спекл-интерферограммы деформационного поля перемещений лопатки 14-ступени компрессора при различных нагружениях, полученные с помощью ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной фотокамерой Canon EOS 1100D

показаниям микрометрического винта устройства нагружения, установленного со стороны спинки лопатки.

Таким образом, для исследования вибрационных характеристик деталей энергетических установок находят применение как ЦСИ с разделенными пучками и гладкой опорной волной, так и ЦСИ с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной. При этом ЦСИ с совмещенными пучками позволяет для регистрации спекл-интерферограмм использовать фотокамеру, что дает возможность при исследовании вибраций снизить дисперсию спекл-шума в 2,5–3,2 раза. Использование этой установки при исследовании статических нагрузок также предпочтительнее, так как это позволяет значительно упростить эксперимент.

Литература

- [1] Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 175 с.
- [2] Макаева Р.Х. Использование голографической интерферометрии для диагностики технического состояния деталей турбомашин // Известия вузов. Сер.: Авиационная техника. 2008. № 2. С. 72–74.
- [3] Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
- [4] Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 1. С. 134–136.
- [5] Осипов М.Н., Попов М.А. Измерение малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31(4). С. 55–57.
- [6] Жужукин А.И., Соляников В.А. Особенности применения цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл-интерферометра для виброметрии деталей газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4. С. 192–195.

- [7] Жужукин А.И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестендовых условиях // Труды МАИ. 2011. № 48.

Поступила в редакцию 12/XI/2013;
в окончательном варианте — 12/XI/2013.

APPLICATION OF SPECKLE INTERFEROMETRY FOR THE INVESTIGATION OF VIBRATIONS AND STATIC DEFORMATIONS OF ELEMENTS OF ENERGY INSTALLATIONS

© 2013 A.I. Zhuzhukin²

The article deals with the development of digital speckle interferometer with superimposed bundles and speckle modulated reference wave for the study of vibration characteristics and deformation displacements of elements of energy installations excited by statistic loadings. It is experimentally established that at vibration studies thanks to the possibility of using in optical scheme of digital camera in speckle interferograms obtained with the use of interferometer showed that dispersion of speckle noise is from 2.5 up to 3.2 times lower than in speckle interferograms obtained with the traditionally used interferometers with separated bundles and smooth reference wave.

Key words: vibrometry, deformation displacements, holographic and speckle interferometry, laser speckles, speckle-noise.

Paper received 12/XI/2013.
Paper accepted 12/XI/2013.

²Zhuzhukin Anatoliy Ivanovich (cntkknio@yandex.ru), design engineer of the design research department, "KUZNETSOV" Samara, 433009, Russian Federation.