

УДК 621.373.8+621.438

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВИБРАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН

© 2014 А. И. Жужукин, В. А. Соляников

ОАО «Кузнецов», г. Самара

В работе рассмотрен метод получения усреднённых во времени спекл-интерферограмм с увеличенным вдвое периодом интерференционных полос. Для реализации этого метода создана оптическая схема, что позволило увеличить допустимые амплитуды колебаний исследуемых деталей. Приведены результаты сравнительных исследований вибрационных характеристик лопатки 5-й ступени компрессора разработанным и традиционным методами. С использованием полученных данных построена эпюра вибросмещений входной кромки лопатки компрессора.

Виброметрия, голографическая и спекл-интерферометрия, лазерные спеклы, спекл – шум.

При разработке и доводке турбомашин по прочности и надёжности возникает проблема исследования вибрационных характеристик как узлов конструкции, так и отдельных её деталей. Наиболее эффективно эта задача решается методами голографической и цифровой спекл-интерферометрии [1-3]. Использование методов голографической интерферометрии при проведении испытаний по исследованию собственных частот и форм колебаний деталей турбомашин ограничено необходимостью использования высоко разрешающих фотохимических материалов, что делает процесс исследования продолжительным, трудоёмким и дорогостоящим. В последнее время широкое развитие получили методы цифровой спекл-интерферометрии, когда формирование спекл-интерферограмм и обработка экспериментальных данных проводятся непосредственно компьютером, связанным с цифровой камерой, которая установлена в выходном плече интерферометра. С помощью методов цифровой спекл-интерферометрии можно бесконтактно и оперативно получать информацию о колебаниях объекта по всей исследуемой поверхности. Для решения широкого класса задач по вибрационному анализу во многих случаях применяется метод усреднения во времени.

Однако такой метод не позволяет проводить исследования вибрационных характеристик деталей с повышенными амплитудами колебаний, особенно на участках поверхности с высоким градиентом вибросмещений, так как в этом случае контрастность интерференционных полос быстро падает с ростом амплитуды колебаний [3]. С целью устранения указанного недостатка в настоящей работе рассматривается метод для исследования колебаний элементов конструкций с высокими градиентами вибросмещений путём снижения чувствительности спекл-интерферометра.

При использовании цифровой спекл-интерферометрии методом усреднения во времени с помощью цифровой камеры регистрируется интерференционная картина двух пучков: спекл-поля, образованного при рассеянии когерентного лазерного излучения на диффузной поверхности исследуемой детали, и опорной волны. В этом случае яркость $B_0(x, y)$ изображения, наблюдаемого на экране монитора, усреднённого за время ввода кадра, имеет вид:

$$B_0(x, y) = b \left[\hat{I}_s + \hat{I}_o + 2 \cdot \left(\sqrt{\hat{I}_s \hat{I}_o} \right) \cos(\varphi_s - \varphi_o) \right], \quad (1)$$

где b - коэффициент, зависящий от параметров системы ввода; $\widehat{I}_s, \widehat{I}_o$ - усреднённая за время ввода интенсивность предметного и опорного пучков в точке (x, y) ; φ_s, φ_o - фаза предметного и опорного пучков в точке (x, y) .

Для вибрирующего объекта:

$$B_1(x, y) = b[\widehat{I}_s + \widehat{I}_o + 2 \cdot (\sqrt{\widehat{I}_s \widehat{I}_o}) J_0\left(\frac{4\pi A}{\lambda}\right) \cos(\varphi_s - \varphi_o)], \quad (2)$$

где J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $A(x, y)$ - амплитуда колебаний поверхности в точке (x, y) ; λ - длина волны используемого лазерного излучения.

Здесь члены $\widehat{I}_s, \widehat{I}_o$ - случайные величины и являются источниками спекл-шумов на спекл-интерферограмме. Информацию об амплитуде колебаний в каждой точке поверхности исследуемой детали содержит член $J_0\left(\frac{4\pi A}{\lambda}\right)$.

Для повышения контраста интерференционных полос на изображении, описываемом выражением (2), в цифровой спекл-интерферометрии методом вычитания спекл-изображений устраняют постоянную составляющую, а именно сумму $\widehat{I}_s + \widehat{I}_o$, не несущую информацию о колебаниях поверхности объекта. С этой целью регистрируют ещё одно изображение, которое отличается тем, что фаза опорного пучка смещена на π . После чего яркость вибрирующего объекта описывается:

$$B_2(x, y) = b[\widehat{I}_s + \widehat{I}_o + 2 \cdot (\sqrt{\widehat{I}_s \widehat{I}_o}) J_0\left(\frac{4\pi A}{\lambda}\right) \cos(\varphi_s - \varphi_o + \pi)]. \quad (3)$$

Затем при помощи алгоритма находят разностное изображение по модулю:

$$\Delta B = |B_1 - B_2|. \quad (4)$$

В этом случае яркость изображения наблюдаемой на экране монитора интерференционной картины определяется выражением [3]:

$$\Delta B = 4b \left| \left(\sqrt{\widehat{I}_s \widehat{I}_o} \right) J_0 \left[\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right] \cos(\varphi_s - \varphi_o) \right|. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что яркость светлых полос быстро падает в соответствии с функцией Бесселя и практически невозможно исследовать объекты с высоким градиентом виброремещений.

В настоящей работе использован другой способ устранения суммы $\widehat{I}_s + \widehat{I}_o$. В качестве результирующего изображения берётся:

$$\Delta B = |B_0 - B_1|. \quad (6)$$

Тогда яркость разностного изображения будет описываться:

$$\Delta B = 4b \left| \left(\sqrt{\widehat{I}_s \widehat{I}_o} \right) \left\{ 1 - J_0 \left[\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right] \right\} \cos(\varphi_s - \varphi_o) \right|. \quad (7)$$

В выражении (7) интерференционные полосы описываются функцией $\left\{ 1 - J_0 \left[\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right] \right\}$. Это аналогично методу реального времени в голографической интерферометрии. График этой функции представлен на рис.1.

Для реализации этого метода необходимо обеспечить стабильность разности фаз $(\varphi_s - \varphi_o)$ между предметным и опорным пучками во время эксперимента при формировании изображений $B_0(x, y)$ и $B_1(x, y)$. В связи с этим использована оптическая схема спекл-интерферометра, рассмотренная в работе [4] для исследования статических деформаций лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) (рис.2).

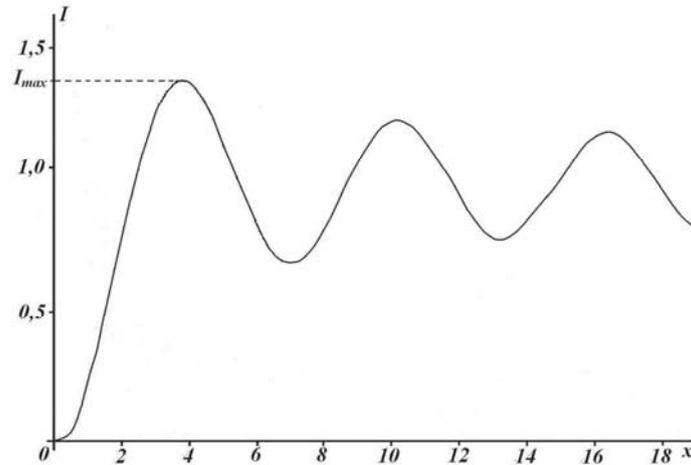


Рис.1. Функция распределения яркости интерференционных полос при вычислении спекл-интерферограммы по формуле (6)

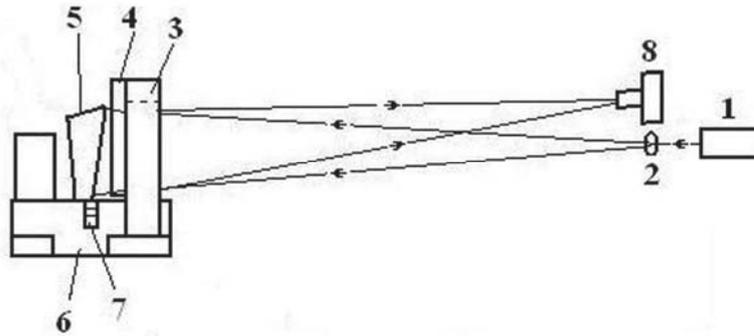


Рис.2. Оптическая схема спекл-интерферометра для исследования колебаний деталей газотурбинных двигателей:

- 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – держатель диффузора; 4 – диффузор;
5 – исследуемая деталь; 6 – зажимное устройство;
7 – пьезовозбудитель; 8 – фотокамера

Стабильность разности фаз ($\varphi_s - \varphi_o$) здесь обеспечивается за счёт жёсткости конструкции, исключающей взаимные перемещения диффузора 4 и исследуемой детали 5.

В результате получена спекл-интерферограмма (рис.3), интерференционные полосы которой описываются выражением (7).

Отличительной особенностью такой спекл-интерферограммы является то обстоятельство, что узловые линии здесь представляют собой наиболее тёмные полосы. Проведя инверсию изображения, получаем более привычный вид спекл-интерферограммы (рис.4).

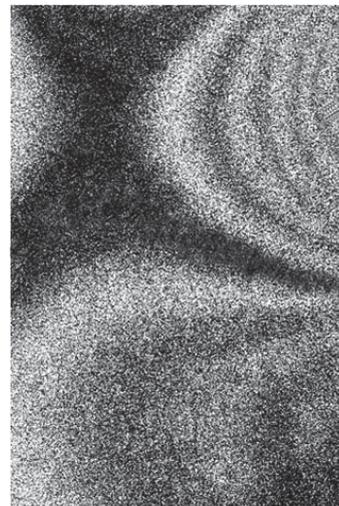


Рис. 3. Спекл-интерферограмма колеблющейся на частоте 7973 Гц металлической пластины, вычисленная по формуле (6)



Рис.4. Инвертированное изображение спекл-интерферограммы

Здесь узловые линии являются наиболее светлыми. Распределение яркости интерференционных полос получен-

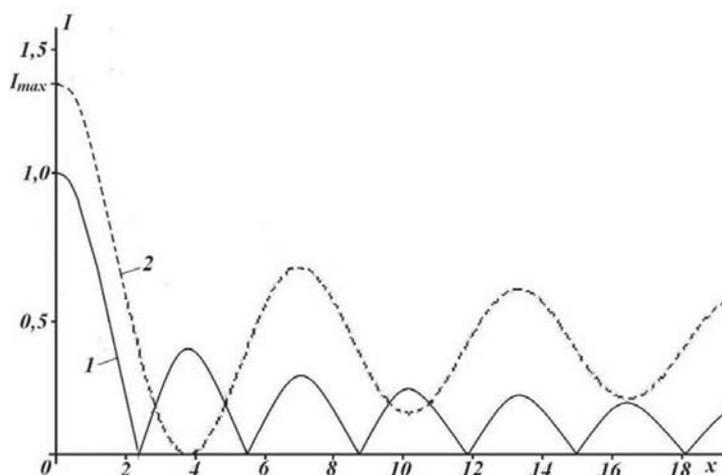


Рис.5. Функция распределения яркости интерференционных полос: кривая 1 при вычислении спекл-интерферограммы по формуле (4); кривая 2 при вычислении спекл-интерферограммы по формуле (6) с последующей инверсией

На рис. 6, а и б входная кромка лопатки слева. Положение узловой линии на всей поверхности лопатки не изменилось, что следует из рис. 5. Ввиду того, что период интерференционных полос при вычислении спекл-интерферограммы по формуле (6) вдвое больше, число интерференционных полос на спекл-интерферограмме рис.6, б меньше, чем на спекл-интерферограмме, вычисленной традиционным способом по формуле (4) (рис.6, а). Это свойство оказывается полезным при получении информации о

ной таким способом спекл-интерферограммы показано на рис.5.

Сравнивая зависимости 1 и 2 (рис.5), можно сделать вывод о том, что контраст наблюдаемых интерференционных полос при использовании выражения (6) несколько ниже, а период интерференционных полос в два раза больше.

В ходе дальнейших испытаний были проведены и исследованы вибрационные характеристики лопатки 5-й ступени компрессора одного из авиационных ГТД семейства «НК». На рис.6 приведены спекл-интерферограммы колеблющейся с одинаковой амплитудой и одинаковой частотой лопатки компрессора, полученные как традиционным методом по формуле (4), так и предложенным в настоящей работе методом вычисления спекл-интерферограммы по формуле (6).

вибрациях участков исследуемой детали с высоким градиентом вибросмещений. Так по спекл-интерферограмме на рис. 6, а невозможно вычислить амплитуду колебаний верхней части входной кромки лопатки ввиду высокой частоты интерференционных полос. В то время как с помощью спекл-интерферограммы на рис. 6, б это легко сделать. На рис. 7 показана эпюра вибросмещений входной кромки лопатки, построенная с использованием рис. 6, а и б.

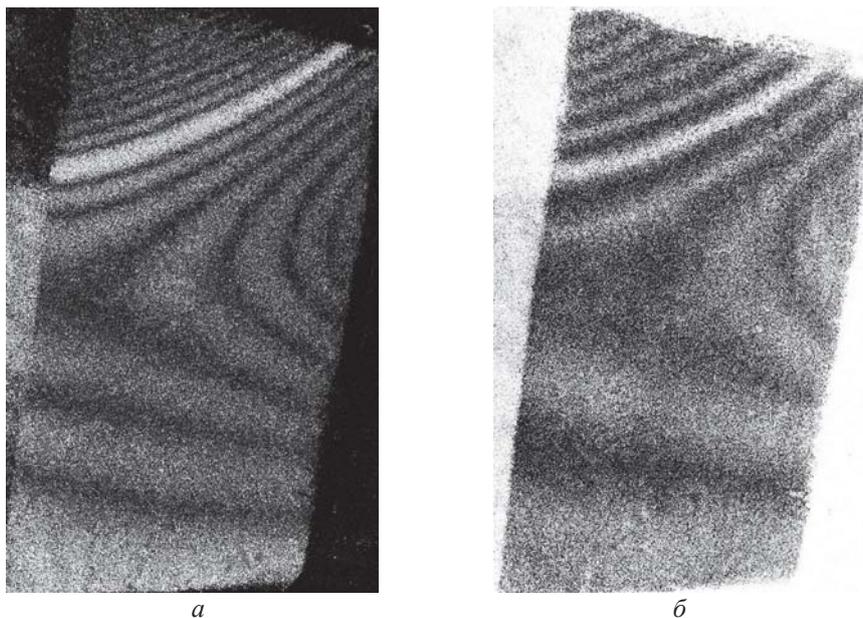


Рис.6. Спекл-интерферограммы колеблющейся на частоте 1323 Гц лопатки 5-й ступени компрессора, вычисленные: а - по формуле (4); б – по формуле (6) с последующей инверсией

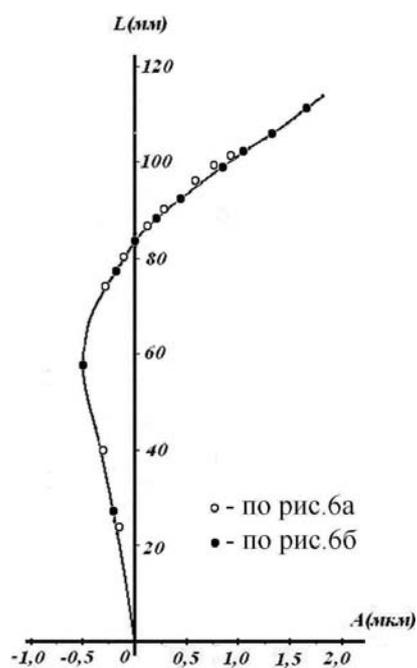


Рис.7. Эюра вибросмещений входной кромки лопатки 5-й ступени компрессора

Амплитуда колебаний при построении эюры вычислялась как описано в работе [5]. Из рис.7 видно, что значения амплитуды колебаний, полученные из рис.6, а и б, лежат на одной кривой. Незначительные отклонения в отдельных точках

связаны с погрешностью определения центров тёмных полос. Спекл-интерферограмма на рис.6, а позволяет на нижней части входной кромки ($L < 100$ мм) построить эюру вибросмещений более точно, ввиду большего числа экспериментальных данных. Однако при $L > 100$ мм информацию об амплитудах колебаний лопатки можно получить только по рис. 6, б.

Выводы

1. Разработаны метод получения спекл-интерферограмм с увеличенным вдвое периодом интерференционных полос и методика проведения испытаний, позволяющие проводить исследования колебаний элементов конструкций с высоким градиентом вибросмещений.

2. Для реализации разработанного метода использован спекл-интерферометр.

3. Разработанный метод апробирован при исследовании вибрационных характеристик лопатки 5-й ступени компрессора одного из авиационных ГТД семейства «НК».

Библиографический список

1. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царёва А.М. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. №1. С. 78-80.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
3. Комаров С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени: Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2004. 234 с.
4. Жужукин А.И., Соляников В.А. Применение цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл-интерферометра для исследования статических деформаций деталей газотурбинных двигателей // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. №4(35). С. 155-161.
5. Жужукин, А.И., Соляников В.А. Спекл-интерферометр для панорамного исследования колебаний турбинных лопаток // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, №6. С. 59-62.

Информация об авторах

Жужукин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, инженер-конструктор конструкторского научно-исследовательского отделения, ОАО «Кузнецов». E-mail: cntkknio@yandex.ru. Область научных интересов: голографическая и спекл-интерферометрия.

Соляников Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения ОАО «Кузнецов». Область научных интересов: поузловая доводка турбомашин по параметрам прочности, надёжности и ресурсу.

METHOD OF REDUCING SPECKLE-INTERFEROMETER SENSITIVITY FOR THE STUDY OF TURBOMACHINE ELEMENTS VIBRATION

© 2014 A. I. Zhuzhukin, V. A. Solyannikov

Open Joint Stock Company “Kuznetsov”, Samara, Russian Federation

The article deals with the development of a method for obtaining time-averaged speckle-interferograms with a two-fold period of interference bands. An optical scheme allowing the increase of permissible vibration amplitudes of the analysed elements has been developed. Vibration characteristics of compressor stage 5 blades are subjected to comparative analysis with the use of both the developed method and the traditional methods. The diagram of compressor blade leading edge vibrodisplacements is made up on the basis of the data obtained.

Vibrometry, holographic and speckle interferometry, laser speckles, speckle-noise.

References

1. Makaeva R.Kh., Karimov A.Kh., Tsareva A.M. Determination of GTE part vibration characteristics by the holographic interferometry method // Russian Aeronautics. 2007. V. 50, no.1. P. 110-113.
2. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. M.: Mir Publ., 1986. 328 p.
3. Komarov S.Yu. Pomekhostoychivyy tsifrovoy spekl-interferometr dlya vibrometrii ob"ektov na osnove metoda

usredneniya vo vremeni. Diss. cand. techn. nauk [Interference Immune Speckle Interferometer for Vibrometry of Objects Based upon Time Average Method. Cand.eng. sci. diss]. Samara, 2004. 234 p.

4. Zhuzhukin A.I., Solyannikov V.A. Using a digital camera in a speckle – interferometer optical scheme for the analysis of static deformations in gas turbine engine

elements // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2012. T.35, no.4. P.155-161 (In Russ.).

5. Zhuzhukin A.I., Solyannikov V.A. Speckle-interferometer for the panoramic study of the blades turbine oscillations // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2012. V. 14, no.6. P. 59-62(In Russ.).

About the authors

Zhuzhukin Anatoly Ivanovich, Candidate of Science (Engineering), Design Engineer of the Design Research Department, Open Joint Stock Company “Kuznetsov”. E-mail: cntkknio@yandex.ru. Area of research: holographic and speckle-interferometry.

Solyannikov Victor Anatolyevich, Candidate of Science (Engineering), Head of the Design Research Department, Open Joint Stock Company “Kuznetsov”. Area of research: operational development of gas turbine engine elements in terms of their service life, reliability and strength parameters.