



Спекл-интерферометрическая установка для непрерывной регистрации вибрационного состояния конструкций ГТД

А. И. Жужукин	кандидат технических наук, инженер-конструктор; ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара; email: dynvibro@ssau.ru
К. Г. Непеин	начальник отдела; ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара; email: dynvibro@ssau.ru
О. Г. Шарафутдинова	инженер-конструктор; ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара; email: dynvibro@ssau.ru

Разработана спекл-интерферометрическая установка для исследования в автоматическом режиме форм и частот колебаний конструкций газотурбинных двигателей посредством сканирования в заданном диапазоне частот. Для привязки каждого кадра к частоте колебаний объекта сканирование гармоническим сигналом и управление видеопотоком осуществляются с компьютера с помощью одной программы. Результатом работы программы является интерферометрический фильм с информацией о вибрационном состоянии объекта на всех частотах заданного диапазона. Резонансные частоты определяются по статистическому критерию спекл-интерферограмм. С помощью разработанной установки проведены исследования форм и частот колебаний рабочей лопатки компрессора. Проведено исследование перехода колебаний лопатки компрессора направляющего аппарата с одной формы на другую при росте частоты возбуждающего сигнала.

Ключевые слова: цифровая корреляционная спекл-интерферометрия; формы и частоты колебаний; интерферометрический фильм; суперпозиция форм колебаний

Цитирование: Жужукин, А. И. Спекл-интерферометрическая установка для непрерывной регистрации вибрационного состояния конструкций ГТД / А. И. Жужукин, К. Г. Непеин, О. Г. Шарафутдинова // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №2. – С. 29–37. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-29-37

Введение

В настоящее время достигнут значительный прогресс в разработке математических методов численного моделирования и развитии вычислительной техники, что позволяет в большинстве случаев с достаточной точностью определять частоты и формы колебаний деталей и конструкций газотурбинных двигателей (ГТД). Вместе с тем результаты, полученные расчётными методами, требуют экспериментальной верификации, так как при создании численной модели невозможно учесть все реальные условия эксплуатации конструкции и из-за неопределённостей и допущений часто приходится прибегать к упрощениям. Следует отметить также, что в реальных конструкциях при их изготовлении всегда возникают малые от-

личия деталей, вызванные технологическими допусками, неоднородностью материала, технологическими несовершенствами при сборке и т. д. Причём все эти факторы имеют случайный характер, что затрудняет расчёт колебаний конструкций ГТД с помощью численных методов.

В связи с этим экспериментальные исследования вибрационных характеристик деталей и конструкций газотурбинных двигателей, особенно тех, которые подвергаются наибольшим нагрузкам в процессе эксплуатации, являются неперенными и обязательными мероприятиями для повышения работоспособности и надёжности конструкций ГТД.

Основным экспериментальным средством исследования вибрационного состояния деталей и узлов всех типов турбомашин является тензометрирование [1]. Однако при тензометрировании возникает проблема выбора мест расположения тензодатчиков, которые необходимо выбрать таким образом, чтобы получить максимальную информацию об опасных динамических состояниях конструкции. Для решения этой задачи возникает необходимость в предварительном определении собственных форм и частот колебаний исследуемой конструкции в реально возбудимой части спектра. Наиболее полную информацию о колебаниях деталей и узлов ГТД дают классические методы голографической и спекл-интерферометрии [2–6], а также появившиеся в последнее время их цифровые варианты [7–9].

Вместе с тем, хотя набор форм и частот колебаний является важной информацией, в некоторых случаях необходимо проследить за развитием колебаний конструкций ГТД в динамике при изменении частоты вращения ротора, когда падает или растёт частота возбуждающих сил во времени. Это позволяет изучить процесс взаимного перехода форм собственных колебаний при изменении частоты возбуждения, а также более достоверно установить, является ли наблюдаемая интерференционная картина формой колебаний. Как отмечено в [10], достаточно исследовать поведение формы при некотором изменении частоты возбуждения. Если при этом узловые линии не перемещаются, частота является резонансной, в противном случае возбуждается суперпозиция форм.

Для решения этой технической задачи может быть использовано несколько подходов. В работе [11, 12] применялась киноголографическая установка, созданная на базе импульсного рубинового лазера, с частотой съёмки несколько десятков кадров в секунду. Однако наряду с дороговизной и большими техническими трудностями, связанными с созданием голографического фильма, вследствие того, что все интерференционные полосы имеют равную яркость, полоса нулевого порядка неотличима от других интерференционных полос, что в значительной степени усложняет даже качественную трактовку результатов при анализе полученного фильма. В работах [13, 14] использовался метод голографической интерферометрии в реальном времени, когда восстановленное с голограммы изображение объекта в исходном состоянии интерферометрически сравнивается с колеблющимся объектом. Одновременно с этим регистрируется изменяющаяся интерференционная картина, несущая информацию о вибрационном состоянии исследуемого объекта. Недостатком этого метода является низкий контраст интерференционных полос, что снижает информативность исследований. Кроме того, сложность в автоматизации и высокие требования к виброизоляции оптической схемы во многом затрудняют использование классической голографической интерферометрии для определения вибрационных характеристик деталей и узлов ГТД в заводских и производственных условиях. Эти недостатки в значительной мере отсутствуют при использовании цифровых интерферометрических методов. В работе [15] авторы зарегистрировали динамику изменения колебаний объекта в зависимости от роста частоты возбуждения в виде интерферометрического фильма с помощью цифровой голографической интерферометрии. Однако при просмотре фильма, полученного методом усреднения во времени в цифровом варианте, видны только узловые линии на объекте и практически нет информации об амплитудах колебаний в пучностях объекта, так как интерференционные картины в этом случае

имеют квазибинарный вид. При использовании цифрового стробоскопического способа все интерференционные полосы имеют одинаковый контраст, вследствие чего нельзя определить положение узловых линий на колеблющемся объекте.

Цель настоящей работы – показать возможности спекл-интерферометрии для непрерывного исследования в автоматическом режиме колебаний конструкций ГТД в любом заданном диапазоне частот.

Описание установки и экспериментальная часть

Для достижения указанной цели разработана установка на основе метода цифровой корреляционной спекл-интерферометрии (рисунок 1). Используемая оптическая схема интерферометра с диффузным опорным пучком соответствует работе [16].

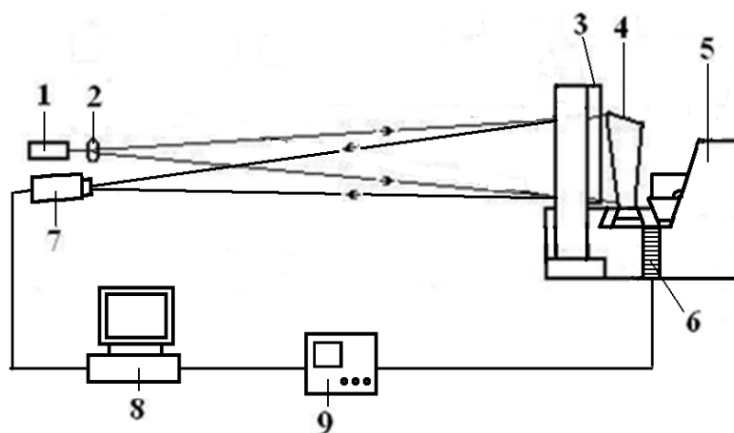
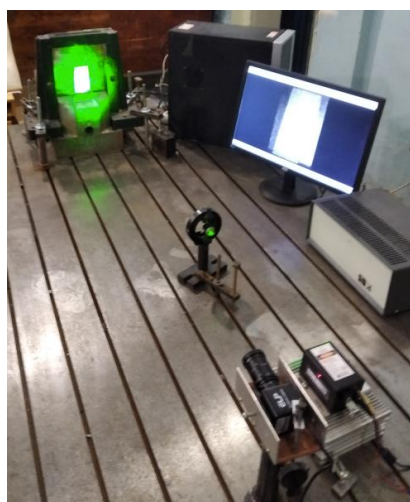


Рисунок 1 – Спекл-интерферометрическая установка для исследования колебаний конструкций ГТД в динамике при изменении частоты: *а* – внешний вид; *б* – оптическая схема.

1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – диффузно-рассеивающий элемент; 4 – вибрирующий объект; 5 – универсальное специальное приспособление; 6 – пьезокерамические диски; 7 – видеокамера; 8 – персональная ЭВМ; 9 – усилитель

Когерентный луч лазера 1, расширительная линза 2, диффузно-рассеивающий элемент 3 и исследуемая деталь 4, закреплённая с помощью универсального специального приспособления 5, расположены на одной оптической оси. Видеокамера 7 должна быть максимально приближена к этой оптической оси. В качестве исследуемой детали в данной работе использовалась рабочая лопатка компрессора. Для возбуждения колебаний лопатки внутри универсального специального приспособления 5 вмонтированы пьезокерамические диски 6, что позволяет использовать бесконтактный метод возбуждения колебаний волновой деформацией [17]. При этом методе возбудитель не влияет на собственные частоты и не искажает формы колебаний лопатки. Предотвращается пропуск отдельных форм, который возможен при контактном возбуждении. Универсальное специальное приспособление 5 жёстко крепится к массивной плите интерферометра. В этом случае вместе они составляют единое целое с большой массой (более тонны), что исключает влияние массы лопатки на результаты исследований её собственных частот и форм колебаний [18].

Для возбуждения колебаний лопатки 4 в исследуемом диапазоне частот с ПЭВМ 8 через усилитель 9 в режиме сканирования подаётся гармонический сигнал на встроенный пьезовозбудитель колебаний 6. На фоточувствительной матрице видеокамеры 7 непрерывно регистрируется и вводится в компьютер результирующая интерференционная картина двух спекл-структур, образованных шероховатой поверхностью лопатки 4 и диффузно-

рассеивающим элементом 3. Ввиду того, что генерация гармонического сигнала и управление регистрацией видеопотока осуществляются одной программой, каждый кадр привязан к определённой частоте колебаний объекта. Сканирование в исследуемом диапазоне частот проводится K раз (обычно K от 3 до 5) в автоматическом режиме.

Для кадров, соответствующих одинаковым частотам, находятся всевозможные разности. На каждой частоте число разностных изображений составит [19]:

$$N = 0,5K(K - 1). \quad (1)$$

Распределение яркости в точке (x, y) каждого разностного изображения будет иметь вид [20]:

$$\Delta B_i(x, y) \approx \left| \sqrt{I_s \cdot I_0} J_0 \left(\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot \cos \delta \varphi_i(x, y) \right|, \quad (2)$$

где I_s, I_0 – усреднённая 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; $\delta \varphi_i(x, y)$ – разность фаз между предметным и опорным пучками в точке (x, y) .

Затем эти разностные изображения складываются:

$$B(x, y) = \sum_i^N \Delta B_i(x, y). \quad (3)$$

При сложении используется порог h :

$$B_h(x, y) = \begin{cases} 255, & B(x, y) \geq 255 \\ B(x, y), & h < B(x, y) < 255, \\ B_{\text{ср}}(x, y), & B(x, y) \leq h \end{cases} \quad (4)$$

где $B_{\text{ср}}(x, y)$ – целая часть значения величины $\frac{B(x, y)}{N}$.

Использование порога позволяет снизить шумы в зоне вторичных максимумов функции Бесселя за счёт усреднения. В итоге формируются интерференционные картины, несущие информацию о колебаниях объекта на каждой частоте, которые вводятся в память компьютера и записываются в папку для создания интерферометрического видеофильма.

Применение созданной установки позволяет в автоматическом режиме определять формы и частоты колебаний деталей ГТД в любом заданном диапазоне частот, что снижает трудоёмкость и сокращает время проведения вибрационных испытаний. На рисунке 2 показаны результаты исследования форм и частот колебаний рабочей лопатки компрессора в диапазоне от 200 до 4600 Гц. Резонансные частоты определяются по статистическим характеристикам спекл-интерферограмм. В качестве статистической характеристики σ в данной работе использовалась величина среднеквадратического отклонения между спекл-полями, образованными поверхностью неподвижной и колеблющейся на разных частотах лопатки.

Расчёт величины σ проводился не по всему кадру, а только по точкам, принадлежащим поверхности лопатки. Значения резонансных частот определяются автоматически по положению максимумов на рисунке 2 и приведены в таблице 1.

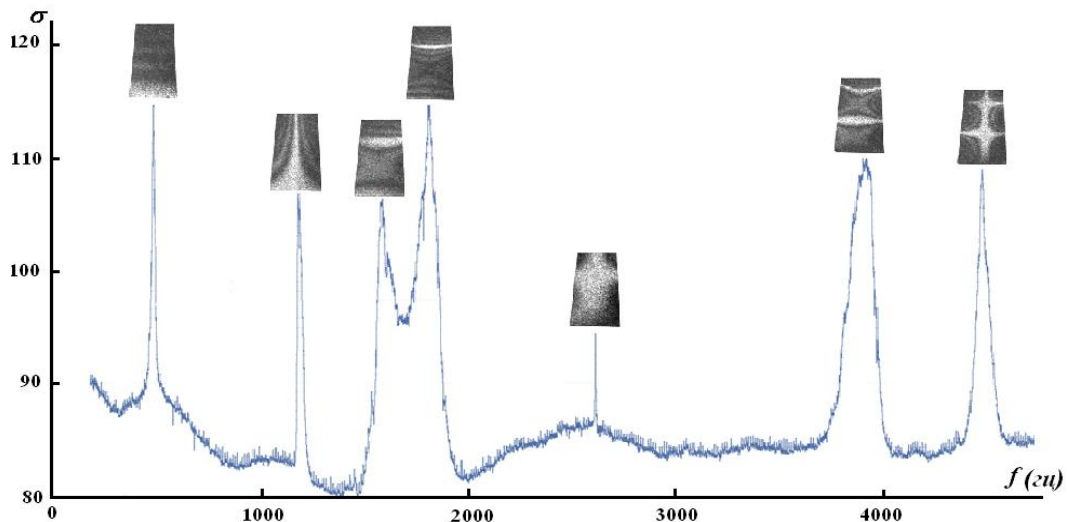


Рисунок 2 – График зависимости величины σ на поверхности вибрирующей лопадки от частоты колебаний

Таблица 1 – Собственные частоты рабочей лопадки компрессора

Форма	F_{10}	F_{11}	F_{20}	F_{21}	F_{30}	F_{31}
Частота, Гц по значению σ	399	1175	1565 1782	2620	3901	4458
Частота, Гц по фигуре Лиссажу	395	1164	1547 1767	2606	3893	4414

Как следует из этой таблицы, расхождение полученных с помощью созданной установки частот с результатами определения резонансов по фигуре Лиссажу не превышает 1,1%.

Важной особенностью созданной установки является возможность регистрации в автоматическом режиме поведения исследуемой детали при изменении частоты в динамике. На рисунке 3 представлены отдельные стоп-кадры интерферометрического фильма, иллюстрирующего процесс взаимного перехода форм колебаний лопадки направляющего аппарата при изменении частоты возбуждения.

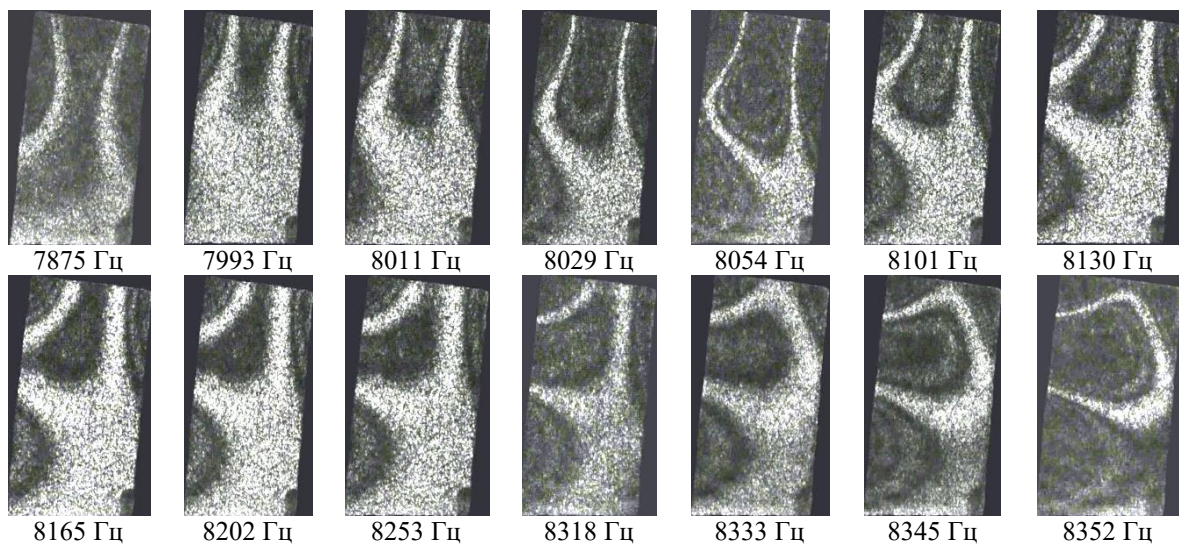


Рисунок 3 – Визуализация процесса перехода колебаний лопадки направляющего аппарата компрессора с формы F_{12} на форму F_{30} при изменении частоты

Уровень возбуждения лопатки задается с компьютера и в данном случае на всех частотах одинаков. Классическими резонансами здесь являются лишь $f=7875\text{Гц}$ и $f=8352\text{Гц}$, однако в промежутке между этими частотами узловые линии плавно перемещаются, что, как отмечено выше, свидетельствует о наличии суперпозиции форм. Это показывает, что информация о колебаниях лопатки между резонансами также может быть полезной, так как в некоторых случаях, например, при $f=8054\text{Гц}$, колебания, скорее всего, не являются чистым резонансом, тем не менее, на этой частоте на торце лопатки могут возникать высокие напряжения. Конечно, гораздо чаще резонансные формы проявляются последовательно, и в диапазоне между их частотами лопатка вибрирует только на вынужденных колебаниях, но на некоторых лопатках, когда частоты ортогональных форм близки, может наблюдаться суперпозиция форм.

Заключение

1. Разработана спекл-интерферометрическая установка, позволяющая в автоматическом режиме регистрировать формы колебаний конструкций ГТД в любом заданном диапазоне частот. Конечные результаты записываются в папку с интерференционными картинками, несущими информацию о вибрационном состоянии исследуемого объекта на всех частотах заданного диапазона, а также в виде интерферометрического фильма. Резонансные частоты определяются по статистической характеристике спекл-структуры, образованной шероховатой поверхностью исследуемого объекта.

2. На примере рабочей лопатки компрессора экспериментально показано, что расхождение полученных значений резонансных частот по сравнению с предварительно проведенными исследованиями поиска резонансов по фигурам Лиссажу не превышает 1,1%.

3. На основе анализа полученного с помощью разработанной установки интерферометрического фильма на лопатке компрессора направляющего аппарата выявлен случай возбуждения суперпозиции форм F_{12} и F_{30} , а также зарегистрирован процесс перехода колебаний лопатки с формы F_{12} на форму F_{30} при возрастании частоты возбуждающей силы.

4. Применение разработанной установки позволяет исключить пропуски при поиске резонансных частот, снизить трудоёмкость проведения вибропрочностных исследований, сократить сроки проведения испытаний. В силу того, что установка работает в автоматическом режиме, оператор не подвергается воздействию акустического шума от колеблющегося исследуемого объекта, оказывающего физиологическое и раздражающее воздействие на человека.

Список использованных источников

1. Иванов, В. П. Колебания рабочих колёс турбомашин / В. П. Иванов. – Москва : Машиностроение, 1983. – 224 с.
2. Макаева, Р. Х. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии / Р. Х. Макаева, А. Х. Каримов, А. М. Царёва. – Казань : Изд – во Казан. гос. техн. ун - та, 2011. – 242 с.
3. Селезнёв, В. Г. Особенности анализа результатов стендовых испытаний рабочих колёс турбомашин / В. Г. Селезнёв, Ю. И. Павлов, О. И. Ильинская // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 1. – С. 93-100.
4. Селезнев, В. Г. Голографическая интерферометрия и ротор статорное взаимодействие при анализе колебаний рабочих колёс турбомашин / В. Г. Селезнев, Ю. И. Головченко // Динамика и виброакустика. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 26-30.
5. Гусев, М. Е. Применение методов цифровой голографической интерферометрии для регистрации наноперемещений / М. Е. Гусев, И. Ю. Гусева, И. В. Алексеенко, В. С. Гуревич, А. М. Исаев, В. И. Редкоречев // Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. – 2011. – Вып. 4. – С. 85-89.

6. Jones, R. Holographic and Speckle Interferometry / R. Jones, C. Wykes. – 2nd ed. – UK : Cambridge University, 1989. – Chap. 3.
7. Jueptner, W. Digital Holography / W. Jueptner, U. Schnars. – Berlin: Springer Verlag, 2004.
8. Schnars, U. Digital holography / U. Schnars, W. Jueptner. – Springer, 2005.
9. Redkorechev, V. I. Picoseconds three-color digital holographic interferometry / V. I. Redkorechev, I. A. Kulagin, V. S. Gurevich, M. E. Gusev, Yu. N. Zakharov // Techn. Program. Int. Conf. "Laser Optics 2008". – St. Petersburg, 2008, June 23-28. – p. 52.
10. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест. – Москва : Мир, 1982. – 504 с.
11. Комар, В. Г. О системе голографического кинематографа, предназначенного для исследования и контроля интерференционным методом деформаций и напряжений вибрирующих изделий / В. Г. Комар, О. Б. Серов, В. А. Скибин, В. Г. Селезнев, Д. С. Еленевский, И. Г. Сипухин, Ю. Н. Шапошников, А. Н. Машковцев // Труды НИКФИ. – Москва : НИКФИ, 1982. – С. 5-13.
12. Еленевский, Д. С. Некоторые вопросы применения импульсного лазера для исследования колебаний крупногабаритных колес вентилятора / Д. С. Еленевский, В. Г. Комар, В. Г. Селезнев, Ю. Н. Шапошников // Труды ЦИАМ. – Москва : ЦИАМ, №1160, 1986. – С. 6-12.
13. Патент 2188390 Российская Федерация, G 01 В 9/027 Способ голографической интерферометрии в реальном времени : заявлено 25.01.2000 : опубликовано 27.08.2002 / Британ А. С., Леванов Д. В. ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Авиадвигатель". – 5 с.
14. Ткач, М. Р. Автоматизация определения собственных частот и форм колебаний элементов турбин малой мощности / М. Р. Ткач, Д. В. Довгань, Ю. Г. Золотой, И. Ю. Жук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 9 (106). – С. 242-248.
15. Гусев, М. Е. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерений наноперемещений / М. Е. Гусев, А. А. Воронин, В. С. Гуревич, А. М. Исаев, И. В. Алексеев, В. И. Редкоречев // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2, №1. – С. 23-30.
16. Жужукин, А. И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестендовых условиях / А. И. Жужукин // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – № 48.
17. Еленевский, Д. С. Поузловая отработка вибропрочности лопаток турбины ГТД / Д. С. Еленевский // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов. – КуАИ, 1981. – С. 29-41.
18. Федорченко, Д. Г. Прочностная доводка и устранение основных дефектов ГТД / Д. Г. Федорченко, Е. П. Кочеров. – Самара : Издатель Исакова Т. С. (БИЮР), 2022. – 431 с.
19. Ивченко, А. В. Сравнительное исследование эффективности работы помехоустойчивых алгоритмов для повышения контраста спекл-интерферограмм при их регистрации методом усреднения во времени / А. В. Ивченко, А. И. Жужукин // Компьютерная оптика. – 2024. – Т.48, №6. – С. 878-888.
20. Комаров, С. Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл - интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени : диссертация ... кандидата технических наук / Комаров Сергей Юрьевич. – Самара, 2004 г.

Speckle interferometer setup for continuous recording of GTE structure vibration states

A. I. Zhuzhukin | Candidate of Science (Engineering), Design Engineer;
PJSC “UEC-Kuznetsov”, Samara, Russian Federation;
email: dynvibro@ssau.ru

K. G. Nepein | Head of Research and Development Division;
PJSC “UEC-Kuznetsov”, Samara, Russian Federation;
email: dynvibro@ssau.ru

O. G. Sharafutdinova | Design Engineer;
PJSC “UEC-Kuznetsov”, Samara, Russian Federation;
email: dynvibro@ssau.ru

The developed speckle interferometer setup is intended for automatic study of vibration modes and frequencies of gas turbine engine structures by scanning in a given frequency range. The correlation of each snapshot with a specific vibration frequency of the object is provided through harmonic signal scanning and video stream control using a single computer program. The program result is an interferometric film with information on the object vibration state at all frequencies in a given range. Resonance frequencies are determined by the statistical criterion of speckle interferograms. The developed setup was used to investigate compressor blade vibration modes and frequencies. The transition of compressor guide vane vibration from one mode to another with an increase in the exciting signal frequency was studied.

Keywords: digital correlation speckle interferometry, vibration modes and frequencies, interferometric film, superposition of vibration modes

Citation: Zhuzhukin, A. I., Nepein, K. G. and Sharafutdinova, O. G. (2025), “Speckle interferometer setup for continuous recording of GTE structure vibration states”, *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 2, pp. 29-37. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-29-37. (In Russian; abstract in English)

References

1. Ivanov, V. P. (1983), *Kolebaniya rabochikh koles turbomashin* [Vibrations of turbomachine working wheels], Mashinostroenie, Moscow. (In Russian)
2. Makaeva, R. Kh., Karimov, A. Kh. and Tsareva, A. M. (2011), *Diagnostika detaley i uzlov turbomashin po ikh vibratsionnym kharakteristikam s primeneniem golograficheskoy interferometrii* [Diagnostics of turbomachine parts and units by their vibration characteristics using holographic interferometry], Publishing House of Kazan. state tech. univ., Kazan. (In Russian)
3. Seleznev, V. G., Pavlov, Yu. I. and Ilyinskaya, O. I. (2015), “Analysis peculiarities of turbomachine working wheels bench tests results”, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, no. 1, pp. 93-100. (In Russian)
4. Seleznev, V. G. and Golovchenko, Yu. I. (2018), “Application of holographic interferometry for study rotor stator interaction in turbomachines”, *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 4, no. 3, pp. 26-30. (In Russian)
5. Gusev, M. E., Guseva, I. Yu., Alekseenko, I. V., Gurevich, V. S., Isaev, A. M. and Redkorechev, V. I. (2011), “Application of digital holographic interferometry methods for recording nanodisplacements”, *Vestnik Baltiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta* [Bulletin of the Immanuel Kant Baltic State University], Issue 4, pp. 85-89. (In Russian)
6. Jones, R. and Wykes, C. (1989), *Holographic and Speckle Interferometry*, 2nded., Cambridge University, Cambridge, UK Chap. 3.
7. Jueptner, W. and Schnars, U. (2004), *Digital Holography*, Springer Verlag, Berlin.

8. Schnars, U. and Jupter, W. (2005), *Digital holography*, Springer.
9. Redkorechev, V. I., Kulagin, I. A., Gurevich, V. S., Gusev, M. E. and Zakharov, Yu. N. (2008), "Picoseconds three-color digital holographic interferometry", *Techn. Program. Int. Conf. "Laser Optics 2008"*, June 23-28, St. Petersburg, p. 52.
10. West, C. (1979), *Holographic interferometry*, Wiley, New York.
11. Komar, V. G., Serov, O. B., Skibin, V. A., Seleznev, V. G., Elenevsky, D. S., Sipukhin, I. G., Shaposhnikov, Yu. N. and Mashkovtsev, A. N. (1982), "About the holographic cinematography system designed to study and control vibrating object deformations and stresses through interference method application", *Trudy NIKFI* [Proceedings of NIKFI], NIKFI, Moscow, pp. 5-13. (In Russian)
12. Elenevsky, D. S., Komar, V. G., Seleznev, V. G. and Shaposhnikov, Yu. N. (1986), "Some issues of a pulsed laser application for investigating large-sized fan wheel vibrations", *Trudy CIAM* [Proceedings of CIAM], CIAM, Moscow, no. 1160, pp. 6-12. (In Russian)
13. Britan, A. S. and Levanov, D. V. (2002), *Sposob golograficheskoy interferometrii v realnom vremeni* [Method real time holographic interferometry in], Russian Federation, Pat. № 2188390, 5 p. (In Russian)
14. Tkach, M. R., Dovgan, D. V., Zolotoy, Yu. G. and Zhuk, I. Yu. (2013), "Automation of determining vibration modes and natural frequencies of low-power turbine elements", *Aviatzionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aviation and space engineering and technology], no. 9 (106), pp. 242-248. (In Russian)
15. Gusev, M. E., Voronin, A. A., Gurevich, V. S., Isaev, A. M., Alekseenko, I. V. and Redkorechev, V. I. (2011), "Methods of digital holographic interferometry and their application to measurements of nanodisplacements", *Nanosystemy: fizika, khimiya, matematika* [Nanosystems: physics, chemistry, mathematics], vol. 2, no. 1, pp. 23-30. (In Russian)
16. Zhuzhukin, A. I. (2011), "Mobile speckle interferometer for studying vibration modes of vibrating objects in off-bench conditions", *Electronic journal "Trudy MAI"* [Electronic journal "Proceedings of MAI"], no. 48. (In Russian)
17. Elenevsky, S. D. (1981), "Unit-by-unit testing on vibration resistance for the turbine blades of gas turbine engine", *Vibracionnaya prochnost' i nadezhnost' dvigatelej i sistem letatel'nyh apparatov* [Vibration strength and reliability of aircraft engines and aircraft systems], KuAI, Issue 8, pp.29-41. (In Russian)
18. Fedorchenko, D. G. and Kocherov, E. P. (2022), *Prochnostnaya dovodka i ustraneniye osnovnykh defektov GTD* [Gas turbine engine strength development and elimination of main defects], Publisher Isakova T. S. (BIUR), Samara. (In Russian)
19. Ivchenko, A. V. and Zhuzhukin, A. I. (2024), "Comparative study of the efficiency of noise-proof algorithms in improving the contrast of speckle interferograms registered by the time-average method", *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], vol. 48, no. 6, pp. 878-888. (In Russian)
20. Komarov, S. Yu. (2004), *Noise-immune digital speckle interferometer for object vibrometry based on the time-average method*, Ph. D. Thesis, Samara, Russian Federation. (In Russian)