

УДК 621.452.2.03-226-752

doi: 10.32620/akt.2021.4sup2.07

М. Р. ТКАЧ¹, Ю. Г. ЗОЛОТОЙ¹, И. Ю. ЖУК², Ю. Н. ГАЛЫНКИН¹,
А. Ю. ПРОСКУРИН¹, В. С. КЛЮЧНИК¹

¹ *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев*

² *Черноморский национальный университет им. Петра Могилы, Николаев*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМ ЦИФРОВЫМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

В работе отмечены широкие возможности и высокая эффективность вибродиагностики деталей и узлов энергоагрегатов методом электронной спекл-интерферометрии (ЭСИ), показана целесообразность разработки и совершенствования методик получения спекл-интерферограмм вибрирующих объектов. Представлена запатентованная авторами схема цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) для определения динамических параметров изделий. Диффузная опорная волна предельно упрощает его юстировку, преимущественно совмещённые каналы распространения интерферирующих пучков определяют устойчивость к механическим и тепловым возмущениям, а отдельные светодетектор и диффузор позволяют легко оптимизировать оптическую схему под исследуемый объект. Получение спекл-интерферограмм реализовано методами спекл-корреляции и разработанным методом определения контраста динамической картины спеклов. Он не предъявляет особых требований к параметрам видеосистемы, не требует применения специализированной видеокамеры, позволяет путём применения поворотной платформы организовать панорамный обзор колебательных форм ассиметричных конструкций. Применение данного метода в сочетании с предложенной оптической схемой обеспечивает проведение экспресс-анализа изделий во внестеновых условиях. Повышенная помехоустойчивость установки допускает редко реализуемое в интерферометрии определение спектра частот и форм колебаний (СЧФК) образцов при свободных граничных условиях. В работе представлены примеры таких спекл-интерферограмм, целесообразность получения которых важна при резонансном исследовании упругих свойств материала и виброрезонансной дефектоскопии. Внедрённые программно-технические решения повышают разрешение и видимость картин полос, облегчают их количественную интерпретацию и извлечение числовой информации о распределении амплитуд колебаний. Область научных интересов и специфика авторских разработок определили преимущественную адаптацию предлагаемого устройства с комплексом программно-методических разработок к проведению виброиспытаний лопаток газотурбинных двигателей (ГТД).

Ключевые слова: спекл-интерферометрия; голография; рабочая лопатка ГТД; резонансные частоты; интерферограмма.

Введение

В современных условиях надёжность ГТД различного целевого назначения во многом определяется вибрационными газодинамическими нагрузками элементов их проточной части и прежде всего – рабочих лопаток турбин. Эффективность мероприятий по обеспечению допустимого уровня вибрационных нагрузок лопаток обеспечивается достоверностью информации о их резонансных характеристиках [1]. Определение частотного и модального спектров лопаток позволяет на стадиях проектирования и доводки ГТД выявить диапазоны резонансных частот вращения, зоны опасных напряжений, провести их диагностику [2]. Изменение СЧФК может служить надёжным диагностическим признаком появления или развития дефекта конструкции. По-

этому при изготовлении или ремонте лопаток турбин достаточно часто требуется серийный контроль резонансного спектра в условиях производственной лаборатории.

Максимально эффективными методами неразрушающего контроля динамических параметров деталей являются методы голографической [3] и электронной спекл-интерферометрии [4]. Но при соизмеримой информативности метод ЭСИ принципиально проще в реализации и несравнимо менее трудоёмкий. Формирование интерферограммы непосредственно в памяти компьютера, без регистрации на промежуточном носителе, обеспечивает серийный экспресс-контроль деталей и оперативный анализ результатов.

Применяемая в большинстве ЦСИ оптическая схема с отдельным распространением интерфери-

рующих пучков и гладкой опорной волной [5] достаточно сложна в юстировке, содержит много оптических элементов, весьма чувствительна к механическим и температурным возмущениям, что предполагает проведение испытаний только в условиях специализированной лаборатории.

При испытаниях конструкции с физической или геометрической асимметрией (оболочки переменной толщины, охлаждаемые лопасти, детали с вырезами и подкреплениями) оценка распределения амплитуд в колебательной моде часто требует её кругового обзора. Предложенный для таких исследований панорамный интерферометр с гладкой опорной волной и разветвлённой оптической схемой [6] характеризуется высокой чувствительностью к помехам и достаточно сложен при настройке.

Высокой помехоустойчивостью обладает ЦСИ с диффузной опорной волной и совмещёнными пучками, в котором светоделитель выполнен в виде пропускающего диффузора со слабо рассеивающей поверхностью, смонтированного на прецизионной подвижке непосредственно перед испытуемой деталью [7]. Спекл-модулированную опорную волну здесь формирует диффузная составляющая излучения, отражённого светоделителем. Нормальные и касательные перемещения диффузора позволяют получить регулируемый фазовый сдвиг в опорном пучке и повысить соотношение сигнал/шум путём цифрового интегрирования постоянного полезного сигнала и флуктуирующей помехи. Совмещение светоделителя и диффузора минимизирует количество оптических элементов и повышает помехоустойчивость интерферометра, однако создаёт проблемы согласования длин и интенсивностей интерферирующих пучков. Кроме того, освещение и наблюдение объекта через рассеиватель, хоть и слабодиффузный, приводит к некоторому снижению контраста и ухудшению позиционирования полос, усложняя количественную интерпретацию интерферограмм.

В данной работе предложена и реализована методология создания и рассмотрены особенности применения многофункционального помехоустойчивого ЦСИ с высокой вариативностью оптической схемы, позволяющего оптимизировать технологический процесс исследования частот и форм колебаний лопаток ГТД при резонансной вибрации методом ЭСИ.

1. Экспериментальная установка

Большинство обозначенных проблем создания и использования ЦСИ решаются путём разделения функций светоделителя и диффузора между элемен-

тами интерферометра при сохранении его помехоустойчивости [8].

В оптической схеме луч лазера 1 после расширения объективом 2 проходит через светоделитель 3 и в направлении единичного вектора освещения e_0 освещает объект 4 (рис. 1).

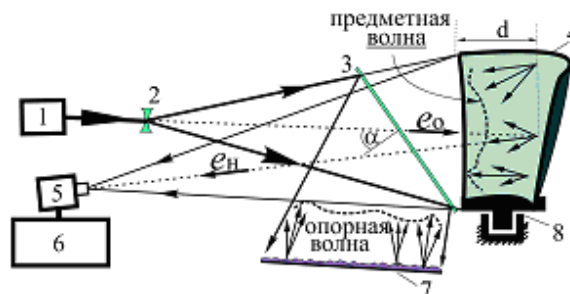


Рис. 1. Оптическая схема установки на базе ЦСИ:
 1 – лазер; 2 – расширитель пучка;
 3 – светоделитель; 4 – объект испытаний;
 5 – видеокамера; 6 – компьютер; 7 – диффузор;
 8 – поворотная платформа

Светоделителем служит прозрачная стеклянная плоскопараллельная пластинка, расположенная максимально близко к объекту. Рассеянная объектная волна проходит через светоделитель в направлении единичного вектора наблюдения e_n . Свет, отражённый стеклянной пластинкой, рассеивается отражающим диффузором 7 и, после повторного отражения светоделителем формирует опорную волну, совмещённую с объектной. Оба диффузных пучка фокусируются объективом на плоскости видеоматрицы и интерферируют с образованием результирующего спекл-поля. Видеокамера 5 работает в режиме веб-камеры и в реальном времени передаёт на компьютер 6 видеопоток 25 кадров в секунду разрешением 720x576 точек с разбиением по яркости на 256 градаций. Яркость точек цифрового изображения $V(x, y)$ пропорциональна интенсивности $I(x, y)$ отображаемых спеклов:

$$V(x, y) = K \cdot I(x, y), \quad (1)$$

где (x, y) – экранные координаты отображающего пикселя;

K – коэффициент пропорциональности, определяемый параметрами видеосистемы.

Устройство перемещения диффузора обеспечивает сдвиг в своей плоскости при реализации методики снижения спекл-шума, и малые низкочастотные нормальные колебания для получения периодического регулируемого фазового сдвига интерферирующих волн.

Геометрические параметры оптической схемы (см. рис. 1) позволяют векторы освещения e_o и наблюдения e_n считать коллинеарными для всех точек объекта. Чувствительность установки к помехам благодаря преимущественно совмещенным каналам распространения интерферирующих волн практически соответствует помехоустойчивости интерферометра в работе [6].

Однако:

- исключено рассеяние освещающей и предметной световых волн в пропускающем диффузоре;
- соотношение интенсивностей интерферирующих спекл-полей достаточно просто оптимизируется изменением угла α (см. рис. 1);
- равенство длин опорного и предметного пучков достигается изменением расстояния между диффузором 7 и светоделителем 3.

1.1. Сравнительный анализ методов получения спекл-интерферограмм

Суммирование когерентных волновых фронтов образует на матрице камеры результирующее спекл-поле согласно выражению [4]:

$$I(x, y) = I_R(x, y) + I_S(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_S(x, y)} \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} C(x, y) \cdot U(x, y) + \varphi(x, y)\right), \quad (2)$$

где $I_R(x, y)$ – локальные интенсивности опорной и предметной световых волн,

$\varphi(x, y)$ – их начальная разность фаз,

$U(x, y)$ – вектор перемещения точки,

$C(x, y) = (e_o - e_n)$ – вектор чувствительности интерферометра,

λ – длина волны излучения лазера.

При гармонической вибрации точек объекта

$$U(x, y, t) = U(x, y) \sin \frac{2\pi}{T} t$$

яркость изображения флуктуирующих спеклов при $\tau \gg T$ усредняется инертным видеосенсором согласно выражению [9]:

$$B_\tau(x, y) = K(I_R(x, y) + I_S(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_S(x, y)} \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} C(x, y) A(x, y)\right) \cos \varphi(x, y)), \quad (3)$$

где $A(x, y)$ – вектор амплитуды колебаний,

J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Предполагая, что $A(x, y) \parallel C(x, y)$ с учётом геометрии оптической схемы получим:

$$B_\tau(x, y) = K(I_R(x, y) + I_S(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_S(x, y)} \times \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y)\right) \cos \varphi(x, y)). \quad (4)$$

В данном выражении регулярные полосы колебательной формы зашифрованы случайным распределением параметров $I_R(x, y)$, $I_S(x, y)$, $\varphi(x, y)$ и вариациями контраста спеклов. Декодирование видеопотока изображений (4) реализовано методом корреляционного сравнения спекл-полей для двух состояний объекта [9] и методом определения контраста динамической картины спеклов [10]. Оба метода позволяют в условиях плавного сканирования частоты вибровозбуждения наблюдать в реальном времени изменение амплитуды колебаний по всей видимой поверхности объекта и регистрировать СЧФК. Следует отметить, что помехоустойчивость и уровень технических требований к аппаратурному обеспечению стенда определяются не только конфигурацией интерферометра, но и методом получения интерферограмм.

Корреляционное сравнение цифровых спеклограмм производится способом поэлементного вычитания изображений, а яркость полос соответствует модулю их разности [9].

В первом варианте получения разностной спекл-интерферограммы в качестве опорного изображения служит предварительно зафиксированная спеклограмма покоящегося объекта

$$B_0(x, y) = K(I_R(x, y) + I_S(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_S(x, y)} \cos \varphi(x, y)), \quad (5)$$

из которой поочередно вычитаются спеклограммы видеопотока (4).

В результате яркость $B_{II}(x, y)$ точек изображения разностных интерферограмм определяется зависимостью:

$$B_{II}(x, y) = 2K\sqrt{I_R(x, y)I_S(x, y)} \times \cos \varphi(x, y) \left(1 - J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y)\right)\right), \quad (6)$$

представленной после нормировки средней яркости к единице кривой 1 (рис. 2). В отличие от привычной интерферограммы она имеет обращённую яркость (узловым линиям соответствуют самые тём-

ные полосы), и для удобства наблюдения её целесообразно инвертировать программными средствами. Цену полосы приближённо можно принимать равной $\frac{\lambda}{2}$ [3], а для более точного определения амплитуды следует использовать соотношение (6), или его графическое представление (см. рис. 2, кривая 1).

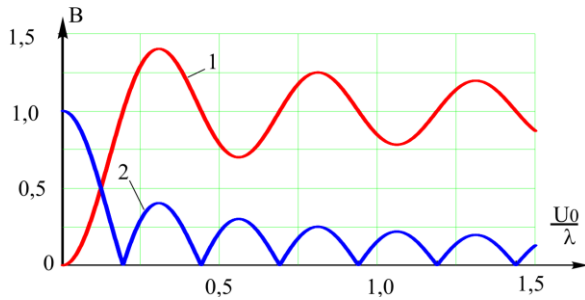


Рис. 2. Распределение яркости на усредненной по времени спекл-интерферограмме:
1 – по зависимости (6);
2 – по зависимостям (7) или (10)

Частота следования интерферограмм с кадровой частотой видеокамеры (в нашем случае 25 кадров/с) позволяет оперативно регистрировать изменение форм колебаний при достаточно быстром изменении их амплитуды. Однако длительное и непрерывное сканирование модального спектра сопровождается эффектом накопления механических и тепловых погрешностей значений $I_R(x, y)$, $I_S(x, y)$ и особенно $\varphi(x, y)$ вследствие механических и тепловых воздействий на элементы стенда, что приводит к искажению полос и снижению их контраста. Обеспечение качества интерферограмм требует периодического прерывания сканирования спектра с целью обновления опорного изображения, и дополнительных мер по устранению помех.

Второй вариант разностной спекл-интерферограммы реализуется вычитанием двух усреднённых по времени спеклограмм (4), отличающихся полуволновым фазовым сдвигом опорной и предметной волн. Для этого диффузор 7 (см. рис. 1) совершает возвратно-поступательное движение в нормальном направлении с частотой 2...4 Гц. Вычитание спекл-изображений, соответствующих экстремальным значениям фазового сдвига $\Delta\varphi = \pi$ рад, формирует интерферограмму согласно соотношению:

$$V_{И}(x, y) = 4K \sqrt{I_R(x, y) I_S(x, y)} \times \left| J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right) \cos \varphi(x, y) \right| \quad (7)$$

Эта зависимость с нормированной к единице максимальной яркостью приведена на рис. 2 – кривая 2. Цену полосы здесь предварительно можно принимать равной $\frac{\lambda}{4}$ [4], а уточнённые значения амплитуд определяются равенством:

$$\frac{4\pi}{\lambda} (A)_k = n_k, \quad (8)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – номер нуля функции Бесселя, т.е. номер тёмной полосы (начиная от узла),

$(A)_k$ – амплитуда колебаний её срединных точек,

n_k – значение аргумента функции Бесселя в этом нуле.

Автоматическое обновление опорного кадра через каждый полупериод колебаний диффузора устраняет эффект накопления погрешностей, но предъявляет жёсткие требования к стабильности фазового сдвига и синхронизации его амплитудных значений с моментами регистрации вычитаемых изображений. Для исключения хаотичных осцилляций положения и видности полос интерферограммы целесообразно применение специализированной видеокамеры с функцией внешней синхронизации.

Применение корреляционных методик при испытаниях больших объектов проблематично из-за сложностей реализации прецизионного возвратно-поступательного перемещения диффузора и высокой чувствительности крупногабаритных светоделиителя и диффузора к низкочастотным воздействиям. Для повышения помехоустойчивости ЦСИ в этом случае можно использовать программные методы с алгоритмом статистического накопления разности фаз опорной и предметной волн [11].

В большинстве наших исследований для получения интерферограмм использован метод определения контраста динамической картины спеклов. Здесь мерой амплитуды вибрации поверхности является динамический контраст $V_D(x, y)$ цифрового изображения флуктуирующих спеклов, а интерферограмма воспроизводится согласно соотношению [10, 12]:

$$V_{И}(x, y) = \beta V_D(x, y),$$

где β – коэффициент яркости воспроизводимой картины полос.

Локальный контраст $V(x, y)$ спеклограммы в точке с координатами (x, y) определяется относительной среднеквадратичной дисперсией яркости $\sigma_B(x, y)$ пикселей изображения в её окрестности [13]:

$$V(x, y) = \frac{\sigma_B(x, y)}{\langle B \rangle(x, y)}, \quad (9)$$

где $\langle B \rangle(x, y)$ – средняя яркость принадлежащих окрестности пикселей.

Из соотношения (3) следует, что кроме распределения амплитуд колебаний на пространственный контраст (9) влияют и другие факторы, не связанные с вибрацией [12]. В результате глубина модуляции контраста амплитудным сигналом незначительная [3], а конечные размеры расчётной области приводят к низкому разрешению и высокой зашумлённости синтезированной интерферограммы. Существенно снизить влияние указанных факторов позволило определение динамического контраста $V_D(x, y)$ каждого единичного пиксела, зависящего только от амплитуды колебаний $A(x, y)$ отображаемой точки. Величина $V_D(x, y)$ вычисляется для последовательности значений динамической яркости $V_D[x, y, \varphi(x, y)]$ пиксела, возникающей в процессе временной трансформации результирующей спекл-картины при фиксированной амплитуде колебаний и плавном изменении разности фаз от 0 до π [12]. В пределах области изменения динамической яркости $\Delta V_D(x, y)$ её значения равновероятны и, согласно закону равномерного распределения [14], их среднеквадратичная дисперсия:

$$\sigma_{V_D}(x, y) = \frac{\Delta V_D(x, y)}{2\sqrt{3}}.$$

Средняя яркость пикселей $\langle B \rangle(x, y)$ от амплитуды вибрации не зависит и при исследовании СЧФК учитывать её зависимость от координат (x, y) не рационально [12]. Тогда, согласно (9), справедливо соотношение:

$$V_D(x, y) \sim \Delta V_D(x, y).$$

Определяя $\Delta V_D(x, y)$, как разность значений выражения (4) при условии $\cos \varphi(x, y) = \pm 1$ и $A(x, y) = \text{const}$ получим:

$$\Delta V_D(x, y) = 4K \sqrt{I_R(x, y) I_S(x, y)} \left| J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right) \right|.$$

В итоге, синтезируемая интерферограмма приобретает вид:

$$V_I(x, y) = \beta \Delta V_D(x, y) = \beta 4K \sqrt{I_R(x, y) I_S(x, y)} \left| J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right) \right|. \quad (10)$$

Она аналогична изображению (7), соответствует кривой 2 (см. рис. 2) и формуле (8), но содержит больше информативных пикселей, так как в отличие от (6) и (7), т.к. в ней "шумовой" множитель $|\cos \varphi(x, y)| \equiv 1$.

Практическая реализация метода состоит в пиксельном экспериментальном определении значений $\Delta V_D(x, y)$ и формировании картины полос (10). С этой целью регистрируется видеопоток изображений (4), на которых при низкочастотных нормальных колебаниях диффузора 7 возникает эффект мерцающих спеклов. Оптимальный размах колебаний должен обеспечивать полный, но желательно, однократный цикл изменения их яркости ($\Delta \varphi \approx 2\pi$ рад). Компьютерная программа в реальном времени фотометрирует несколько последовательных кадров буфера, анализирует дискретно заданные функции $V_D[x, y, \varphi(x, y)]$ каждого пиксела, определяет массив значений $\Delta V_D(x, y)$, и воспроизводит спекл-интерферограмму (10). Для корректного определения функции $V_D[x, y, \varphi(x, y)]$ на периоде её изменения должны присутствовать не менее 6-и равномерно распределённых измерений яркости пиксела. То есть, при видеопотоке 25 кадров в секунду и объёме обрабатываемого буфера 6-8 спеклограмм частота модуляции сдвига фаз составит 4-3Гц. С такой же частотой будут обновляться изображения формы колебаний, что вполне достаточно для сканирования резонансного спектра в реальном времени. Какая-либо синхронизация модуляции фазового сдвига с регистрацией спеклограмм и применение специализированной видеокамеры при этом не требуется. Кроме того, картина полос вычисляется обработкой всех изображений буфера, усредняя и сглаживая влияние случайных возмущений, но увеличение объёма буфера увеличивает инертность отклика установки на изменение амплитуды колебаний. В сочетании с предложенной оптической схемой (см. рис. 1) метод может работать в помехоустойчивом режиме, без жёстких мер виброзащиты и, при необходимости, позволяет вместо регулируемого использовать пассивный сдвиг фаз интерферирующих волн за счёт механической неустойчивости элементов интерферометра.

Контролируемый объект монтируется с соблюдением условий его крепления в процессе эксплуатации, но помехоустойчивый режим работы установки допускает использование и редко реализуемых в интерферометрии свободных граничных условий. Они максимально корректно моделируются в эксперименте, что позволяет обеспечить определение упругих констант материала [15] или де-

фектоскопию изделий виброрезонансным методом. Серия интерферограмм колебаний ряда деталей при свободных граничных условиях: – плоского стержня при оценке анизотропии его свойств, лопаток турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД) при их дефектоскопии представлены на рис. 3. Стержень и лопатка ТВД опираются на мягкие силиконовые стойки, а лопатка ТНД подвешена на гибкой нити в районе корневого сечения.

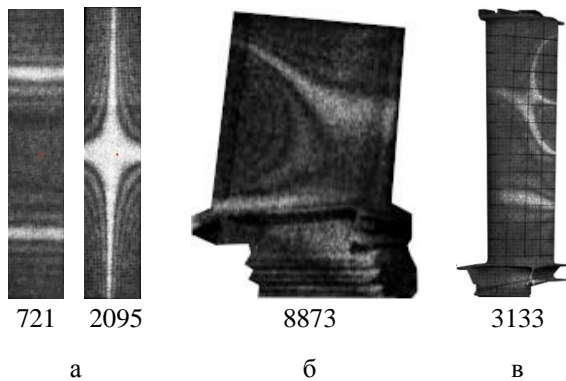


Рис. 3. Формы и частоты (Гц) колебаний объектов при свободных граничных условиях:
 а – определение упругих свойств плоского анизотропного стержня;
 б – виброрезонансная дефектоскопия лопатки ТВД;
 в – виброрезонансная дефектоскопия лопатки ТНД

Возбуждение колебаний образцов осуществляется приклеенным к поверхности миниатюрным биморфным пьезоэлементом. Эксперименты проведены без применения специальных мер виброзащиты.

1.2. Некоторые особенности работы стенда

Помехоустойчивый режим работы стенда имеет важное значение при исследовании асимметричных форм колебаний конструкций. Он позволяет проводить панорамный обзор вибрирующего объекта без усложнения оптической схемы, размещая деталь вместе с опорным приспособлением и устройством вибровозбуждения на поворотном механизме 8 (см. рис. 1). Задача решается путём оперативной регистрации серии интерферограмм при ступенчатом повороте конструкции. Важно, чтобы конструкция поворотной платформы и стабильность вибровозбуждения обеспечивали неизменность режима колебаний на протяжении всего цикла контроля формы. Дискретность угла поворота выбирается с учётом изменения ориентации вектора чувствительности интерферометра относительно поверхности объекта. При исследовании лопатки ГТД вращение осуществляется вокруг неподвижной оси, проходящей через центры тяжести корневого и верхнего поперечных сечений, а вектор чувствительности к

этой оси перпендикулярен. Такая ориентация лопатки и малая кривизна продольных сечений позволяет изменением угла поворота реализовать чувствительность интерферометра к нормальным колебаниям практически всех точек поверхности.

На рис. 4 приведен пример двусторонней регистрации колебательной формы охлаждаемой турбинной лопатки (с внутренними каналами) (а) на частоте 14,3 кГц со стороны спинки (б), и со стороны корыта (в). Изображения сопряжены по выходной кромке. Явные различия в распределении узловых линий появляются из-за нарушения сплошности пера каналами охлаждения и могут сигнализировать о возможных структурных изменениях материала лопатки.

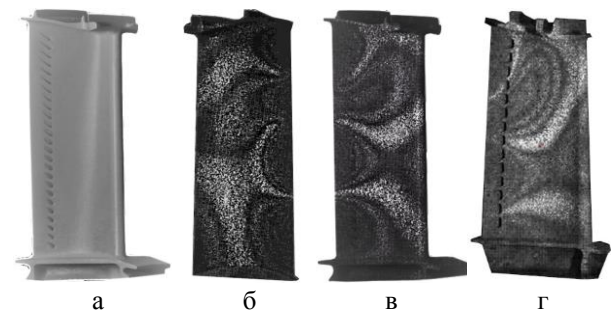


Рис. 4. Примеры интерферограмм колебаний лопатки:
 а – базовое изображение в белом свете;
 б, в – интерферограммы формы колебаний спинки (б) и корыта (в), синтезированные согласно интерференционному сигналу (10);
 г – базовое изображение, промодулированное интерференционным сигналом (13)

Спрогнозировать дислокацию таких возможных усталостных явлений позволяет количественный анализ изображений колебательных форм с целью определения зон экстремальных виброрезонансов [2]. Но численная интерпретация интерферограмм требует повышенного разрешения картины полос и уточнённого их позиционирования относительно объекта. Действительно, структура выражений (6), (7) и (10) говорит о том, что регулярная картина интерференции промодулирована мультипликативным шумом результирующего спекл-поля $\left| \sqrt{I_R(x,y)I_S(x,y)} \cos \varphi(x,y) \right|$, на фоне которого присутствует низкоконтрастное изображение детали $\sqrt{I_S(x,y)}$. Спеклистая структура снижает и без того низкий контраст этого изображения и повышает уровень шума информативной системы полос. Поэтому в программно-методическом обеспечении установки предусмотрена возможность улучшения визуализации рельефа исследуемых поверхностей и

повышения соотношения сигнал/шум спекл-интерферограмм.

Для повышения качества изображения предмета в программе вместо воспроизведения изображения интерференционного сигнала (6), (7) или (10) предусмотрена возможность модуляции этим сигналом базового изображения исследуемой поверхности согласно соотношению [12]:

$$V_{\text{би}}(x, y) = \frac{V_{\text{и}}(x, y)}{256} V_{\text{б}}(x, y), \quad (11)$$

где $V_{\text{б}}(x, y)$ – базовое изображение объекта, полученное в белом свете,

$V_{\text{и}}(x, y)$ – изображение интерферограммы (6), (7) или (10),

$V_{\text{би}}(x, y)$ – базовое изображение объекта, промодулированное интерференционным сигналом.

На рис. 4, в приведена интерферограмма колебательной моды лопатки, полученная из соотношения (10), а на рис. 5, г – интерферограмма аналогичной моды, полученная согласно алгоритму (11). Во втором варианте улучшение позиционирования полос несомненно.

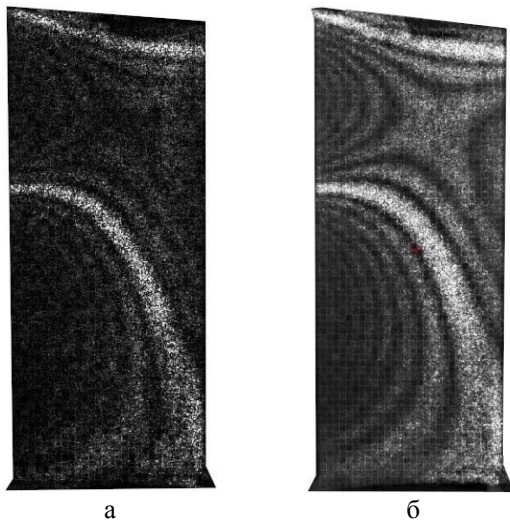


Рис. 5. Усредненные по времени интерферограммы колебательной формы лопатки ГТД:

а – одинарное изображение;
б – пятикадровое усреднение шумов и улучшение позиционирования формы

Для снижения спекл-шума в установке использован метод многокадрового усреднения N изображений идентичной картины полос с некоррелируемыми шумами, увеличивающий соотношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз [6].

Многokратное изменение опорного спекл-поля реализовано малыми поперечными ступенчатыми

перемещениями диффузора 7 (см. рис. 1), превышающими размер спекла. Получение N интерферограмм и последующее их усреднение производится автоматически на этапе окончательной регистрации выявленной колебательной формы. Методики снижения спекл-шума и улучшения позиционирования полос могут применяться комплексно.

На рис. 5, а представлено одинарное изображение спекл-интерферограммы связанных колебаний лопатки ГТД, а на рис. 5, б – результат комплексного применения пятикадрового её усреднения и методики улучшения позиционирования формы. Сравнение наглядно иллюстрирует эффективность методики.

Заключение

На базе предложенного спекл-интерферометра с диффузным опорным пучком создано многофункциональное устройство для определения вибрационных характеристик элементов конструкций. Оптическая схема с совмещёнными каналами обладает высокой помехоустойчивостью, а разделённые светоделиитель и диффузор существенно упрощают оптимизацию интенсивностей и длин опорного и предметного пучков, особенно при использовании низкокогерентного лазера.

Сравнительный анализ реализованных в установке способов получения интерферограмм показывает, что методы спекл-корреляции целесообразно применять для изучения нестационарных процессов, когда инертность отклика устройства на изменение амплитуд колебаний должна быть минимальной. Но при установившихся колебаниях следует отдать предпочтение методу определения контраста спеклов, как менее чувствительному к внешним возмущениям, допускающего при нестабильности интерферометра работу в режиме пассивного фазового сдвига, и не требующему применения специализированной видеокамеры. Реализованный метод снижения спекл-шума и уточнённое позиционирование картины интерференции относительно объекта повышают разрешение интерфрограммы и значительно упрощают их количественную интерпретацию. Опыт эксплуатации предлагаемого устройства показал высокую его эффективность в качестве универсального инструмента вибродиагностики ответственных элементов машин. Применительно к лопаткам установка позволяет провести комплекс исследований по определению СЧФК, включая серийный экспресс-контроль и деффектоскопию аварийных образцов, что важно на этапе проектирования и доводки ГТД.

Литература

1. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Макаева, Р. Х. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии [Текст] : монография / Р. Х. Макаева, А. Х. Каримов, А. М. Царева. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – 242 с.
3. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест. – М. : Мир, 1982. – 504 с.
4. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия [Текст] / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М. : Мир, 1986. – 328 с.
5. Жужукин, А. И. Применение спекл-интерферометрии для исследования колебаний крупногабаритных конструкций газотурбинных двигателей [Текст] / А. И. Жужукин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 66–74. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74.
6. Жужукин, А. И. Спекл интерферометр для панорамного исследования колебаний турбинных лопаток [Текст] / А. И. Жужукин, В. А. Соляников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – С. 59-62.
7. Жужукин, А. И. Виброметрическая установка для получения спекл-интерферограмм с высоким разрешением [Текст] / А. И. Жужукин, В. А. Соляников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – С. 210–213.
8. Пат. UA 146326 Україна. Пристрій з підвищеною заводстійкістю для дослідження коливань конструкцій методом електронної спекл-інтерферометрії [Текст] / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотий, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін, І. Ю. Жук, В. С. Ключник. - № u2020 06205 ; заявл. 25.09.2020; опубл. 10.02.2021. – Бюл. № 6.
9. Жужукин, А. И. Метод уменьшения чувствительности спекл-интерферометра при исследовании вибраций деталей турбомашин [Текст] / А. И. Жужукин, В. А. Соляников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара : ОАО «Кузнецов», 2014. – № 1(43). – С. 194–200.
10. Пат. UA 103068 Україна. Спосіб визначення частот і форм резонансних коливань лопаток ГТД методом спекл-інтерферометрії [Текст] / Ткач М. Р., Золотий Ю. Г., Довгань Д. В., Жук І. Ю. - № 103068 ; опубл. 10.12.2015.
11. Комаров, Ю. С. Помехоустойчивый цифровой спекл – интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени [Текст] : дис. ... канд.тех. наук / Ю. С. Комаров. - Самара, 2004. – 234 с.
12. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic Complex [Text] / M. Tkach [et al.] // Integrated Com-

puter Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021. – vol. 188. – P. 277-289. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.

13. Гудмен, Дж. Статистическая оптика [Текст] / Дж. Гудмен. – М. : Мир. – 1988. – 528 с.

14. Гусак, А. А. Теория вероятностей [Текст] : справ. пособие к решению задач / А. А. Гусак, Е. А. Бричикова. – Мн. : ТетраСистемс, 2000. – 288 с.

15. Нухамкин, М. Ш. Применение экспериментального модального анализа для идентификации параметров модели слоистого углепластика [Текст] / М. Ш. Нухамкин, Д. Г. Соломонов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2017. – № 51. – С. 124-135.

References

1. Birger, I. A. Raschet na prochnost' detalej mashin [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.
2. Makaeva, R. H., Karimov, A. H., Careva, A. M. Diagnostika detalej i uzlov turbomashin po ih vibracionnym harakteristikam s primeneniem golograficheskoj interferometrii [Diagnostics of parts and assemblies of turbomachines by their vibration characteristics using holographic interferometry]. Kazan, Kazan Publishing House. state tech. University, 2011. 242 p.
3. Vest, Ch. Golograficheskaja interferometrija [Holographic interferometry]. Moscow, Mir Publ., 1982. 504 p.
4. Jones, R., Wykes, K. Golograficheskaja i spekl-interferometrija [Holographic and speckle interferometry]. Moscow, Mir Publ., 1986. 328 p.
5. Zhuzhukin, A. I. Primenenie spekl-interferometrii dlja issledovanija kolebanij krupnogabaritnyh konstrukcij gazoturbinnih dvigatelej [The use of speckle interferometry for the study of oscillations of large-sized structures of gas turbine engines]. The bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Mechanical engineering, 2017, no. 3, pp. 66-74. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74.
6. Zhuzhukin, A. I., Soljannikov, V. A. Spekl interferometr dlja panoramnogo issledovanija kolebanij turbinnih lopatok [Speckle interferometer for panoramic investigation of turbine blade oscillations]. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, pp. 59–62.
7. Zhuzhukin, A. I., Soljannikov, V. A. Vibrometricheskaja ustanovka dlja poluchenija spekl-interferogramm s vysokim razresheniem [Vibrometric setup for obtaining high-resolution speckle interferograms]. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 210–213.
8. Tkach, M. R., Zolotoj, Ju. G., Proskurin, A. Ju., Galinkin, Ju. M., Zhuk, I. Ju., Kluchnyk, V. S. Pry`strij z pidvy`shhenoyu zavadosstijkistyu dlya doslidzhennya

koly`van` konstrukcij metodom elektronnoyi spekl-interferometriyi [Device with increased noise immunity for the study of vibrations of structures by electronic speckle interferometry]. Patent UA, № 146326, 2021.

9. Zhuzhukin, A. I., Soljannikov, V. A. Metod umen'shenija chuvstvitel'nosti spekl-interferometra pri issledovanii vibracij detalej turbomashin [A method for reducing the sensitivity of a speckle interferometer in the study of vibrations of parts of turbomachines]. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, Samara, OAO Kuznetsov Publ., 2014, no. 1 (43), pp. 194-200.

10. Tkach, M. R., Zolotiy, Yu. G., Dovgan, D. V., Guk, I. Yu. *Sposib vy`znachennya chastot i form rezonansny`x koly`van` lopatok GTD metodom spekl-interferometriyi* [Method of determining of forms of resonant vibrations shapes of blades of gas turbine engine by speckle interferogram]. Patent UA, №103068. 2015.

11. Komarov, Ju. S. *Pomehoustojchivyj cifrovoj spekl-interferometr dlja vibrometrii obektov na osnove metoda usrednenija po vremeni*. Diss. k. t. n. [Noise-resistant digital speckle-interferometer for vibrometry of

objects on the basis of the method of averaging in time PhD diss.]. Samara, 2004. 234 p.

12. Tkach, M. et al. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic Complex. In: *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 188, pp. 277-289. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.

13. Gudmen, J. *Statisticheskaja optika* [Statistical optics]. Moscow, Mir Publ., 1988. 528 p.

14. Gusak, A. A., Brichikova, E. A. *Teoriya veroyatnostej* [A reference manual for solving problems]. Minsk, TetraSystems Publ., 2000. 288 p.

15. Nihamkin, M. Sh., Solomonov, D. G. Prime-nenie jeksperimental'nogo modal'nogo analiza dlja identifikacii parametrov modeli sloistogo ugleplastika [Application of Experimental Modal Analysis to Identify the Parameters of the Laminated CFRP Model]. *PNRPU Bulletin. Aerospace engineering*, Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2017, no. 51, pp. 124-135.

Надійшла до редакції 03.06.2021, розглянута на редколегії 20.08.2021

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН ЗАВАДОСТІЙКИМ ЦИФРОВИМ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРОМ

М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотий, І. Ю. Жук, Ю. М. Галинкін, А. Ю. Прокурін, В. С. Ключник

В роботі відзначені широкі можливості і висока ефективність вібродіагностики деталей і вузлів енергоагрегатів методом електронної спекл-інтерферометрії (ЕСІ), показана доцільність розробки і вдосконалення методик отримання спекл-інтерферограм віброуючих об'єктів. Представлена запатентована авторами схема цифрового спекл-інтерферометра (ЦСІ) для визначення динамічних параметрів виробів. Дифузна опорна хвиля гранично спрощує його юстування, переважно суміщені канали поширення інтерферуючих пучків визначають стійкість до механічних і теплових збурень, а роздільні світлоділитель і дифузор дозволяють легко оптимізувати оптичну схему під досліджуваній об'єкт. Отримання спекл-інтерферограми реалізовано методами спекл-кореляції і розробленим методом визначення контрасту динамічної картини спеклів. Він не пред'являє особливих вимог до параметрів відеосистеми, не вимагає застосування спеціалізованої відеокамери, дозволяє шляхом застосування поворотної платформи організувати панорамний огляд коливальних форм асиметричних конструкцій. Застосування даного методу в поєднанні з запропонованою оптичною схемою забезпечує проведення експрес-аналізу виробів у позастендових умовах. Підвищена стійкість установки дозволяє визначення спектру частот і форм коливань (СЧФК) зразків при вільних граничних умовах, що рідко реалізується в інтерферометрії. В роботі представлені приклади таких спекл-інтерферограм, доцільність отримання яких важлива при резонансному дослідженні пружних властивостей матеріалу і вібро-резонансній дефектоскопії. Вбудовані програмно-технічні рішення підвищують роздільну здатність та видимість картин смуг, полегшують їх кількісну інтерпретацію і витяг числової інформації про розподіл амплітуд коливань. Область наукових інтересів і специфіка авторських розробок визначили переважну адаптацію запропонованого пристрою з комплексом програмно методичних розробок до проведення вібровипробування лопаток газотурбінних двигунів (ГТД).

Ключові слова: спекл-інтерферометрія; голографія; лопатки ГТД; резонансні частоти; інтерферограма.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF TURBINE BLADES WITH AN IMMUNITY DIGITAL SPECKLE INTERFEROMETER

M. Tkach, Yu. Zolotoy, I. Zhuk, Yu. Halynkin, A. Proskurin, V. Kluchnik

The paper notes the wide possibilities and high efficiency of vibration diagnostics of parts and assemblies of power units by the method of electronic speckle interferometry (ESI), shows the feasibility of developing and improving methods for obtaining speckle interferograms of vibrating objects. A patented by the authors' scheme of a digital speckle interferometer (DSI) for determining the dynamic parameters of products is presented. The diffuse reference wave greatly simplifies its alignment, mainly the aligned channels of propagation of interfering beams determine the resistance to mechanical and thermal disturbances, and the separate beam splitter and diffuser make it

easy to optimize the optical scheme for the object under study. Speckle interferograms are obtained by speckle correlation methods and a developed method for determining the contrast of the dynamic speckle pattern. It does not impose special requirements on the parameters of the video system, does not require the use of a specialized video camera, and allows, by using a rotary platform, to organize a panoramic view of the oscillatory forms of asymmetric structures. The use of this method in combination with the proposed optical scheme provides an express analysis of products in off-bench conditions. The increased noise immunity of the installation allows the determination of the spectrum of frequencies and vibration modes (SFVM) of samples under free boundary conditions, which is rarely realized in interferometry. The paper presents examples of such speckle interferograms, the expediency of obtaining which is important in the resonance study of the elastic properties of the material and vibration resonance flaw detection. The implemented software and hardware solutions increase the resolution and visibility of the band patterns; facilitate their quantitative interpretation and the extraction of numerical information on the distribution of vibration amplitudes. The area of scientific interests and the specificity of the author's developments have determined the preferential adaptation of the proposed device with a complex of software and methodological developments for vibration testing of gas turbine engine (GTE) blades.

Keywords: speckle interferometry; holography; GTE blades; resonant frequencies; interferogram.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Золотой Юрий Григорьевич – зав. лаб. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Жук Ирина Юриевна – ст. преп. каф. гигиены, социальной медицины, общественного здоровья и медицинской информатики, Черноморский национальный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина.

Галинкин Юрий Николаевич – канд. техн. наук, преп. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Проскурин Аркадий Юрійович – канд. техн. наук, доц. каф. «Двигатели внутреннего сгорания, установки и техническая эксплуатация», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Ключник Владимир Сергеевич – асп. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Mykhaylo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4944-7113, Scopus Author ID: 57202210289, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=XqfGS0wAAAAJ>.

Yurii Zlotoy – head of laboratory of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: goldspekl@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6292-6624.

Irina Zhuk - Senior Lecturer, Department of Hygiene, Social Medicine, Public Health and Medical Informatics, Petro Mohyla Black Sea National University, Nikolaev, Ukraine, e-mail: iryna.zhuk@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7350-1944, Scopus Author ID: 57217606530, <https://scholar.google.com/citations?user=SRUBfdoAAAAJ>

Yurii Halynkin – Candidate of Engineering Sciences, Lecturer of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5272-4156, Scopus Author ID: 57204396250, https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=ix_y1CwAAAAJ

Arkadii Proskurin – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5225-6767, Scopus Author ID: 57203617130, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=LCGxGC8AAAAJ>

Vladimir Kluchnik – PhD student of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: vladimir.kluchnyk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1928-7681.