

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ<sup>1</sup>, Ю.Г. ЗОЛОТОЙ<sup>1</sup>, Д.В. ДОВГАНЬ<sup>1</sup>, И.Ю. ЖУК<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина<sup>2</sup>Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*Рассмотрено экспериментальное определение динамических характеристик конструктивных элементов ГТД методом электронной спекл-интерферометрии с использованием низкокогерентного лазера. Показан метод определения спектра собственных частот и форм колебаний конструкции в реальном времени путём компьютерной визуализации функции распределения контраста усреднённой по времени электронной спекл-интерферограммы. Приведены интерферограммы форм колебаний лопатки. Показана возможность создания стенда для автоматизированного определения собственных частот и форм колебаний элементов ГТД.*

**Ключевые слова:** лопатка ГТД, спекл-интерферометрия, собственные частоты и формы колебаний.

### Введение

**Постановка проблемы.** Тенденции развития современного газотурбинного двигателестроения характеризуются требованиями экономичности, уменьшением массы конструкции и увеличением нагрузок, действующих на узлы и детали. К основным показателям качества двигателя, характеризующим степень его совершенства, относятся надёжность и ресурс. Улучшение этих показателей связано с необходимостью снижения динамической нагруженности узлов двигателя, так как большинство дефектов ГТД вызвано действием переменных нагрузок, резко возрастающих в условиях резонанса. Рабочая лопатка является одной из наиболее напряжённых и ответственных деталей ГТД. Последствия разрушения лопаток являются очень тяжёлыми для двигателя, вызывая выход из строя моторной установки.

Для задач определения динамических параметров элементов конструкций эффективно используются современные расчётные методики, в основном базирующиеся на методе конечных элементов, и компьютерные программы типа ANSYS, NASTRAN, MATLAB. Известно, что при создании математических моделей для расчёта колебаний элементов ГТД со сложным распределением масс, как правило, приходится прибегать к серьёзным упрощениям и допущениям. При исследовании собственных частот и форм колебаний элементов конструкций со сложным распределением инертных и упругих характеристик экспериментальное решение обычно является единственно возможным.

Исследование динамических параметров конструкции предполагает определение значений собственных частот в возбуждаемой части спектра и соответствующих им форм колебаний.

**Анализ публикаций.** Одним из эффективных экспериментальных методов решения данной задачи являются методы голографической и спекл-интерферометрии. Главным их достоинством является возможность бесконтактного получения информации о вибрационном состоянии всей поверхности исследуемого объекта [1]. Но применение метода голографической интерферометрии по исследованию частот и форм колебаний деталей ГТД ограничено повышенными требованиями к когерентности лазерного излучения, виброизоляции оптической схемы при проведении голографического эксперимента и сложностью использования фотоматериалов с технологией фотохимической обработки [4]. Исключить применение аналоговых фотоматериалов позволяет цифровой голографический интерферометр. Однако, цифровая голография реализуется с применением дорогостоящих систем машинного зрения со специализированным аппаратным и программным обеспечением [5]. Созданные в последнее время системы цифровой спекл-интерферометрии позволяют оперативно проводить исследования вибрационных характеристик деталей ГТД с помощью непрерывного лазера в реальном времени, наблюдая интерференционную картину непосредственно на экране монитора. Это позволило миновать какой-либо промежуточный фоторегистрирующий носитель. Простота реализации, высокая точность измерений, невысокие требования к

когерентности источников излучения, механической стабильности установки делают этот метод особенно перспективным [2, 3].

Современный вариант решения предложен в работе [3], где явление изменения контраста спекл-картины на изображении вибрирующей поверхности используется только для настройки на резонанс, причём для лучшей визуализации контрастных участков, использован эффект мерцания спеклов. Определение формы колебаний осуществляется методом корреляционной спекл-интерферометрии путём вычитания изображений с инвертированной картиной спеклов. Но наблюдать за мерцанием спеклов в виду слабой контрастности картины достаточно сложно, а проводить по несколько съёмки для каждой резонансной частоты затратно по времени.

**Цель работы.** Разработать способ обработки электронных спекл-интерферограм, позволяющий без использования фотохимических процессов, определять спектр собственных частот и форм колебаний элементов ГТД в реальном времени.

### Методика проведения эксперимента

При когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких, например, как шероховатая поверхность или прозрачная среда с флуктуирующим в пространстве показателем преломления, в рассеянном поле формируется спекл-

структура [2]. Такая же нерегулярная картина спеклов возникает на сетчатке глаза или в плоскости светочувствительной матрицы, регистрирующей этот объект. Совмещая данное световое поле и когерентный опорный пучок (гладкий или диффузный), получим результирующую спекл-картину. При этом, яркость каждого зерна определяется разностью фаз складываемых световых волн и при смещении объекта будет изменяться. В данной работе объектом исследования была лопатка компрессора ГТД производства «Заря-Машпроект» высотой 54 мм и хордой 37 мм, изображённая на рис. 1.

Оптическая схема интерферометра соответствует работе [3] рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид лопатки

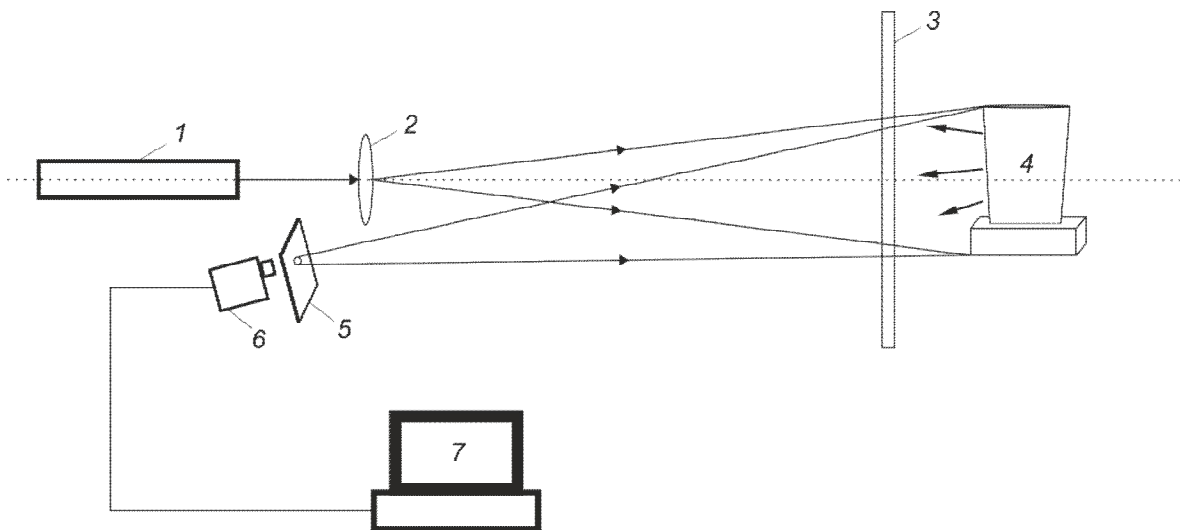


Рис. 2. Оптическая схема установки:

1 – лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – диффузор, 4 – диафрагма, 5 – камера, 6 – камера, 7 – ПЭВМ

В качестве источника света применялся лазер 1 мощностью излучения 50 мВт,  $\lambda = 0.532$  мкм и длиной когерентности порядка 5 см, луч которого через расширительную линзу 2 и диффузор 3 освещает вибрирующую лопатку 4. Вибровозбуждение исследуемой конструкции осуществляется пьезоке-

рамическим вибропреобразователем, на который подаётся синусоидальный сигнал звукового генератора, усиленный усилителем низкой частоты. Диффузор 3 выполнен из листового материала, характеризующийся слабой диффузностью. Некоторая часть (10-20%) излучения рассеивается диффузором

3, что приводит к образованию опорного спекл-поля на матрице видеокамеры 6. Остальная часть излучения идёт на освещение вибрирующего объекта 4, в результате чего формируется предметная спекл-картина, образованная рассеиванием света шероховатой поверхностью лопатки 4. В итоге на светочувствительной матрице возникает интерференция этих спекл-полей. Пространственное совмещение опорной и предметной волн существенно повышает помехоустойчивость оптической схемы и не требует применения специальных мер виброзащиты измерительного стенда. Диафрагма 5 устанавливается таким образом, чтобы средний размер спеклов занимал несколько пикселей матрицы камеры 6. В работе использовалась DV камера SONY DCR-TRV с разрешением 720x576. Расстояние между диффузором 3 и исследуемым объектом 4 не должно превышать половины длины когерентности используемого лазерного излучения. Камера 6 соединена с ПК 7 и должна быть расположена как можно ближе к оптической оси. При возбуждении колебаний лопатки контраст спекл-картины и корреляция спеклов на передаваемом в компьютер изображении являются функцией амплитуды колебаний. Действительно, если в данную точку изображения на матрице камеры от покоящейся поверхности диффузора приходит свет интенсивностью  $I_R$  и фазой  $\varphi_R$ , а от покоящейся исследуемой поверхности свет интенсивностью  $I_S$  и фазой  $\varphi_S$ , то интенсивность этой точки в стационарном результирующем спекл-поле составит:

$$I = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R \cdot I_S} \cos(\varphi_R - \varphi_S).$$

При гармонической вибрации данной точки объекта согласно закону  $u = u_0 \sin \omega t$  инерционный сенсор усреднит эту интенсивность по промежутку времени  $\tau$  экспонирования кадра ( $\tau \gg \frac{2\pi}{\omega}$ ), т.е [2]

$$I_\tau = I_R + I_S + \frac{2}{\tau} \sqrt{I_R \cdot I_S} \int_0^\tau \cos \left[ \varphi_R - \varphi_S + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot U_0 \sin \omega t \right] dt.$$

Или

$$I_\tau = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R \cdot I_S} \cdot J_0^2 \left( \frac{4\pi U_0}{\lambda} \right) \cos(\varphi_R - \varphi_S), \quad (1)$$

где  $J_0^2$  – квадрат функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Эта функция является осциллирующей с резко убывающей амплитудой осцилляции.

Контраст спеклов также будет изменяться при изменении функции Бесселя. Если в (1)  $J_0^2 = 0$ , то интенсивность меняется только при изменении величин  $I_S$  и  $I_R$ , тогда как при максимальном значе-

нии  $J_0^2$  интенсивность меняется при изменении величин  $I_S$ ,  $I_R$  и  $2\sqrt{I_R I_S} \cos(\varphi_R - \varphi_S)$ .

Таким образом минимальный контраст соответствует условию[2]:

$$U_0 = n \frac{\lambda}{4} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

Определить формы колебаний и получить их изображение по полосам равного контраста очень сложно по причине низкой видимости полос. Если согласно [3] диффузор 3 привести в колебательное движение в нормальном к нему направлении с амплитудой примерно  $0.5\lambda$ , что бы яркость спеклов инвертировалась с частотой 1-2 Гц, то мерцающие спеклы позволяют наблюдать полосы нулевого и в лучшем случае первого порядков. Улучшить визуализацию и получить фотоизображение формы колебаний по распределению контраста в спекл-картине удалось с помощью компьютерной обработки.

При отсутствии вибрации лопатки наблюдаем мерцание спеклов по всей поверхности лопатки, но при высокочастотной вибрации объекта происходит смазывание спеклов. Определение формы колебаний основано на эффекте того, что на резонансной частоте в узлах колебаний перемещения отсутствуют (наблюдается мерцание спеклов).

Компьютерная программа выделяет мерцающие пиксели и накладывает соответствующую им маску, в результате чего мы получаем форму колебаний. Определение мерцающих спеклов основано на изменении яркости соответствующих пикселей. Т.к. вычисление значения яркости для цветовой модели RGB ( $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ ) требует дополнительных вычислительных затрат анализ проводился только для одной цветовой составляющей – цвета лазера. Изменение каждой составляющей цвета лежит в диапазоне 0 до 255 для 24 и 32 битных изображений. Следовательно, отношение размаха яркости ко всему диапазону составит  $\frac{\max - \min}{255} 100\%$ . Оптимальный размер буфера составил 8 кадров, что позволяет обновлять картину форм колебаний порядка трёх раз в секунду. Блок схема работы программы представлена на рис. 3. Внешний вид программы обработки приведён на рис. 4.

Методика получения форм колебаний позволила проводить эксперимент на базе низкокогерентного лазера и наблюдать в режиме реального времени изменяющуюся картину спеклов на мониторе ПК. При некоторой доработке оптической схемы и создании электронного контролирующего блока возможна дальнейшая доработка метода. При резонансных колебаниях амплитуда вибрации лопатки

резко возрастает, это создаёт перспективу для реализации автоматического определения частот. В качестве генератора возбуждения колебаний целесообразно использовать ПК. Все это, создает основу полной автоматизации экспериментальных исследо-

ваний.

Результаты испытаний резонансных колебаний компрессорной лопатки ГТД приведены на рисунке. Выявлено 10 форм и соответствующих частот резонансных колебаний (рис. 5).

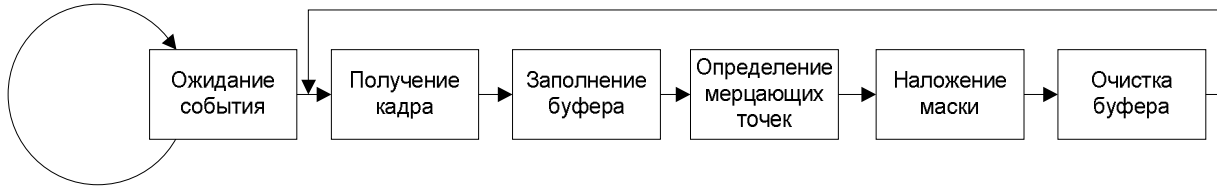


Рис. 3. Блок-схема работы программы



Рис. 4. Внешний вид окна программы регистрации

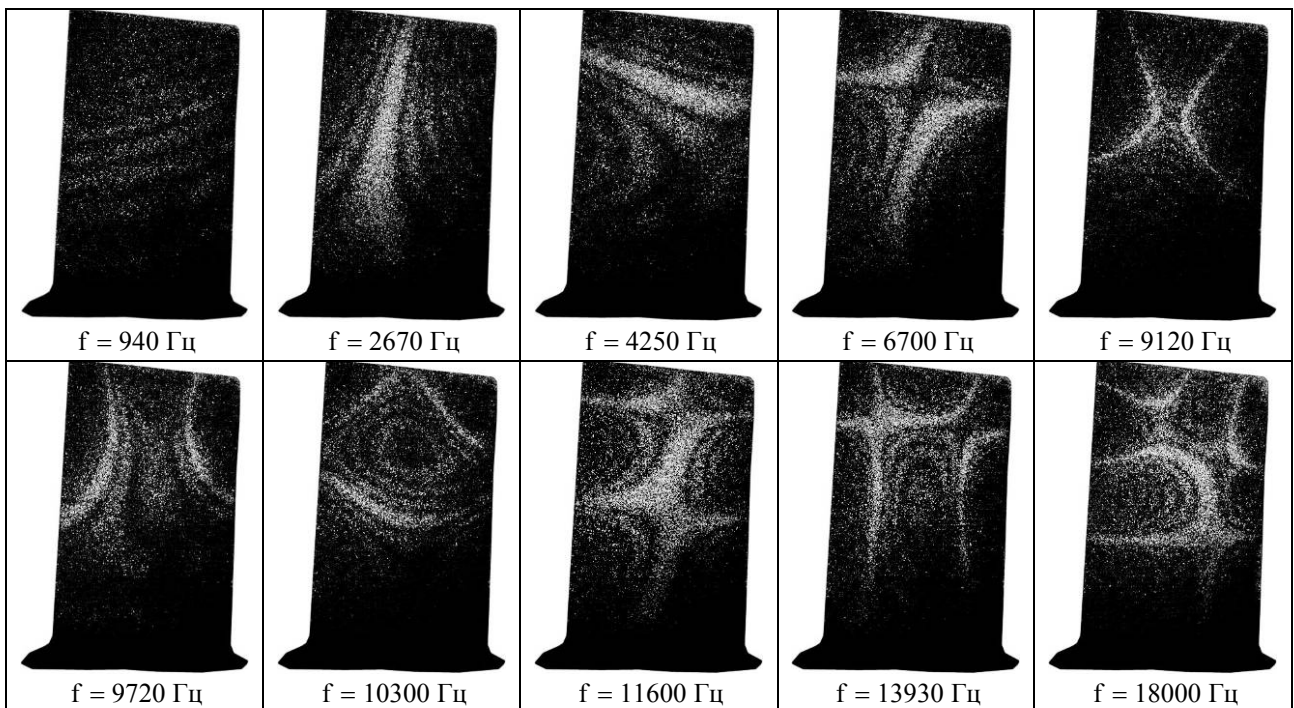


Рис. 5. Формы колебаний лопатки

## Выводы

1. Создан стенд для определения собственных частот и форм колебаний лопаток ГТД методом электронной спекл-интерферометрии.
2. Доработанный метод позволяет проводить исследования с использованием низкокогерентного лазера.
3. Разработана методика и создана компьютерная программа для определения в реальном времени резонансных частот и форм колебаний элементов ГТД с использованием функции изменения контраста усреднённой по времени электронной спекл-интерферограммы.
4. Показана возможность создания автоматизированного стенда для поиска собственных частот и форм колебаний элементов ГТД.
5. Определены собственные частоты и формы колебаний компрессорной лопатки ГТД.

## Литература

1. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
2. Джоунс Р. Голографическая и спекл-интерферометрия [Текст] / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Жужукин, А.И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестеновых условиях [Текст] / А.И. Жужукин // Электронный журнал «Труды МАИ». – М., 2011. – Вып. № 48. – С. 37 – 41.
4. Исследование форм собственных колебаний элементов ГТД методом голографической интерферометрии в реальном времени [Текст] / М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотой, Д.В. Довгань, И.Ю. Жук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 8985). – С. 51 – 56.
5. Цифровой голографический интерферометр [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://holotrend.ru/cgi.php>. – 14.04.2012 г.

Поступила в редакцию 21.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.

### ВИЗНАЧЕННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ФОРМ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ГТД МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

*М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотий, Д.В. Довгань, І.Ю. Жук*

Розглядається експериментальне визначення динамічних характеристик конструкційних елементів ГТД методом електронної спекл-інтерферометрії. Запропонована методика дозволяє в реальному часі визначати спектр власних частот і форм коливань конструкції шляхом комп'ютерної візуалізації функції розподілу контрасту усередненої за часом електронної спекл-інтерферограми з використанням низькокогерентного лазера. Наведено отримані інтерферограми форм коливань лопатки. Показана можливість створення автоматизованого стенду для пошуку власних частот і форм коливань елементів ГТД.

**Ключові слова:** лопатка ГТД, спекл-інтерферометрія, власні частоти та форми коливань.

### DEFINITION THE DYNAMIC PARAMETERS OF GTE ELEMENTS IN REAL-TIME BY ELECTRONIC SPECKLE INTERFEROMETRY

*M.R. Tkach, Y.G. Zolotiy, D.V. Dovgan, I.Y. Guk*

Experimental determination of dynamic parameters of GTE elements by electronic speckle interferometry is considered. The proposed method allows real-time to determine the spectrum of the own frequencies and vibration shapes of the construction by using PC visualization of the contrast distribution function in time-averaged electronic speckle interferograms with using a low-coherence laser. The possibility of creating an automated stand to find the dynamic parameters GTE elements is described.

**Key words:** GTE blade, speckle interferometry, the self-resonant frequencies and mode shapes.

**Ткач Михаил Романович** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com.

**Золотой Юрий Григорьевич** – ст. преподаватель, зав. лабораторией лазерных средств измерений Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: yurii.zolotyi@nuos.edu.ua.

**Довгань Дмитрий Витальевич** – младший научный сотрудник, Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dmytro.dovgan@nuos.edu.ua.

**Жук Ирина Юрьевна** – ст. преподаватель, Черноморского государственного университета им. Петра Могилы, Николаев, Украина, e-mail: goldspekl@ukr.net.