

---

*УДК 621.373*

## **Мобильный спекл – интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестендовых условиях**

А. И. Жужукин

### **Аннотация**

Разработан компактный спекл – интерферометр, не требующий сложной юстировки и позволяющий исследовать вибрационные характеристики объектов без использования интерферометрического стола. Приведены спекл - интерферограммы форм колебаний лопатки 7 ступени компрессора, полученные по схеме с гладкой опорной волной и с помощью разработанной схемы. Подтверждена идентичность полученных результатов. Проведены исследования вибрационных характеристик колеса компрессора и соплового аппарата во внестендовых условиях.

### **Ключевые слова**

формы колебаний; спекл – интерферометрия; лазерные спеклы; голографическая интерферометрия.

При создании новых машин и механизмов первостепенное значение имеет обеспечение их вибрационной прочности. Особенно остро эта проблема стоит при разработке авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Эффективным методом её решения является принцип поузловой доводки на конструкционную прочность и надёжность[1]. Одной из основных задач, во многом определяющей результативность поузловой доводки, является исследование вибрационных характеристик деталей и узлов – в первую очередь определение их собственных частот и форм колебаний, а также вибросмещений, деформаций и напряжений при резонансных колебаниях.

Наиболее полную информацию о колебаниях деталей ГТД дают методы голографической[2] и спекл – интерферометрии[3-6]. Главным достоинством

голографических и спекл – интерферометрических методов является возможность одновременного получения информации о вибрационном состоянии всей поверхности исследуемой детали сколь угодно сложной конструкции. Однако применение метода голографической интерферометрии по исследованию частот и форм колебаний деталей ГТД ограничено повышенными требованиями к виброизоляции оптической схемы при проведении голографического эксперимента. Кроме того, необходимость использования фотоматериалов с присущей им технологией фотохимической обработки затрудняет процесс оперативного контроля исследуемых объектов и его автоматизацию.

Созданные в последние десятилетия системы цифровой спекл – интерферометрии (ЦСИ) позволяют оперативно проводить исследования вибрационных характеристик деталей ГТД с помощью непрерывного лазера в реальном времени, регистрируя интерференционную картину непосредственно на экране монитора, минуя какой – либо промежуточный фоторегистрирующий носитель. Однако в основе спекл – интерферометров, приведённых в [3-5], лежит оптическая схема с разделёнными пучками и гладкой опорной волной, которая сложна при юстировке, и для размещения её оптических элементов возникает необходимость в использовании интерферометрического стола. Это ограничивает возможности применения таких установок для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД только условиями специализированной лаборатории.

С целью расширения возможностей применения ЦСИ для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестендовых условиях разработана установка с непрерывным лазером на основе оптической схемы интерферометра с совмещёнными пучками и диффузной опорной волной, которая схематически представлена на рис. 1.

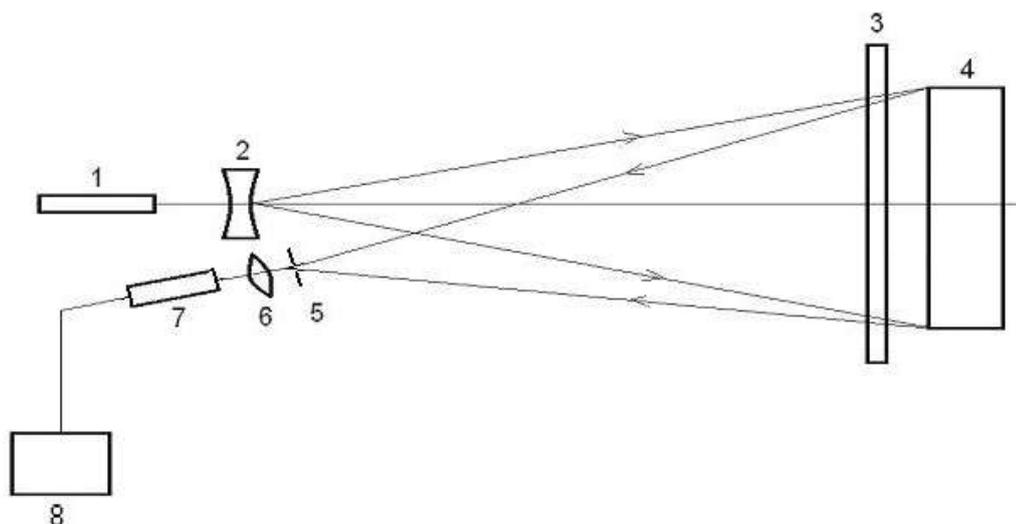


Рис. 1. Оптическая схема ЦСИ с совмещёнными пучками и диффузной опорной волной: 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – диффузор; 4 – вибрирующий объект; 5 – диафрагма объектива; 6 – объектив телекамеры; 7 – телекамера; 8 – персональная ЭВМ

Когерентный луч лазера 1 через расширительную линзу 2 и диффузор 3 освещает вибрирующий объект 4. Диффузор 3 выполнен в виде оптически прозрачной пластины, характеризующейся слабой диффузностью. Некоторая часть излучения рассеивается диффузором 3, что приводит к образованию спекл - картины. Остальная часть излучения идёт на освещение вибрирующего объекта 4, в результате чего формируется другая спекл – картина, образованная рассеиванием света шероховатой поверхностью объекта 4. Степень диффузности диффузора 3 подбирается таким образом, чтобы интенсивности спекл – картин от диффузора 3 и поверхности исследуемого объекта 4 были примерно одинаковыми. С помощью объектива 6 на светочувствительную матрицу телекамеры 7 попадают спекл – поля, образованные диффузором 3 и поверхностью объекта 4. В результате чего на светочувствительной матрице возникает интерференция этих спекл - полей. Диафрагма 5 устанавливается таким образом, чтобы средний размер спеклов был не меньше размера элементарной ячейки фотодиодной матрицы телекамеры 7. Расстояние между диффузором 3 и исследуемым вибрирующим объектом 4 не должно превышать половины длины когерентности используемого лазерного излучения. Для гелий – неоновых лазеров это расстояние выбирается 10 – 20 мм. В случае использования твердотельного лазера LCS – DTL – 317 это расстояние может быть 10 – 15 см. Телекамера 7 соединена с персональной ЭВМ 8 и должна быть расположена как можно ближе к оптической оси. В случае периодических перемещений или в случае случайных колебаний диффузора 3 вдоль оптической оси в узлах вибрирующего объекта 4 интерференционная картина спеклов будет меняться, так как изменяется оптическая разность хода между диффузором и объектом, а в пучностях колебаний объекта корреляция спеклов будет нарушена, и картина спеклов меняться не будет.

При колебаниях объекта на резонансной частоте, яркость наблюдаемого на экране монитора усреднённого за время ввода с помощью телекамеры (40 мс) спекл – изображения в любой точке экрана  $(x, y)$ , для случая, когда вектор освещения и наблюдения близки к нормали по отношению к поверхности исследуемого объекта, опишется выражением:

$$B(x, y) = b \left[ \langle I_s \rangle + \langle I_o \rangle + 2\sqrt{\langle I_s \rangle \langle I_o \rangle} \cdot J_0 \left( \frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot \cos(\varphi_s - \varphi_o) \right] \quad (1)$$

Здесь  $b$  - коэффициент, зависящий от параметров системы ввода,

$\langle I_s \rangle, \langle I_o \rangle$  - усреднённая за время ввода яркость предметного и опорного пучков,  
 $J_0$  - функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  
 $A(x, y)$  - амплитуда колебаний поверхности в точке  $(x, y)$ ,  
 $\lambda$  - длина волны используемого лазерного излучения,  
 $\varphi_s, \varphi_o$  - фаза предметного и опорного пучков в точке  $(x, y)$ .

Для получения высококонтрастной картины полос применяется метод вычитания изображений [6]. Для этого спекл – изображение, соответствующее выражению (1), заносится в память компьютера. С помощью специального приспособления фаза опорного пучка сдвигается на  $180^\circ$ , как осуществлено в [3]. На экране монитора при этом наблюдается интерференционная картина аналогичная первой, но на месте светлых спеклов размещаются тёмные и наоборот. Далее второе изображение вычитается по модулю из первого, хранящегося в памяти. В результате на экране монитора наблюдается изображение контрастной интерференционной картины, которая может быть описана выражением:

$$B = 4b \left[ \langle I_s \rangle \langle I_o \rangle J_0^2 \left( \frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cdot \cos^2(\varphi_s - \varphi_o) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Величины  $\langle I_s(x, y) \rangle, \langle I_o(x, y) \rangle, \varphi_s(x, y), \varphi_o(x, y)$  в случае использования оптической схемы на рис.1 являются случайными.

Сдвиг фаз на  $180^\circ$  между предметным и опорным пучками в схеме на рис.1 может быть осуществлён путём сдвига диффузора 3 вдоль оптической оси [7]. Однако эта схема эффективно работает и при использовании метода описанного в [4], когда фазовый сдвиг реализуется за счет нестабильности оптических элементов из-за случайных колебаний оптической схемы. В этом случае расстояние между диффузором 3 и вибрирующим объектом 4 меняется случайным образом из-за естественного шума в городских условиях. Результирующая спекл – интерферограмма колеблющегося объекта получается в результате статистического накопления разности фаз между предметным и опорным пучками, возникающей в условиях отсутствия виброизоляции оптической схемы. Ввиду того, что в основе разработанного спекл – интерферометра находится оптическая схема с совмещёнными пучками, он обладает большей помехоустойчивостью по сравнению с установками, применяемыми в [4,5].

С помощью разработанной установки (рис. 1) были исследованы колебания лопатки компрессора 7 ступени газотурбинного двигателя. Возбуждение колебаний лопатки и отыскание резонансов осуществлялось, как описано в [1]. На рис. 2

представлены частоты и формы колебаний лопатки, полученные с помощью спекл - интерферометра с гладкой опорной волной и с помощью разработанной установки.

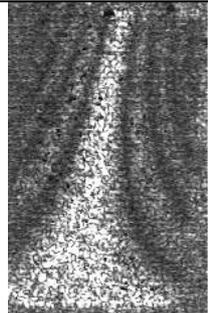
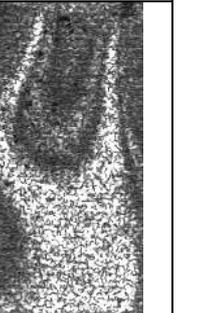
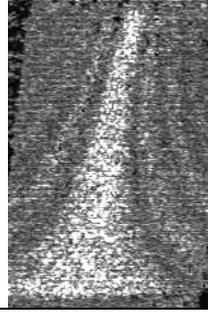
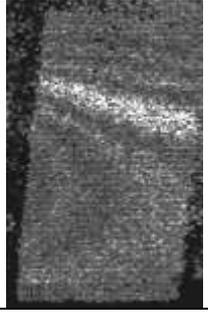
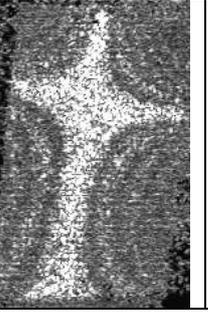
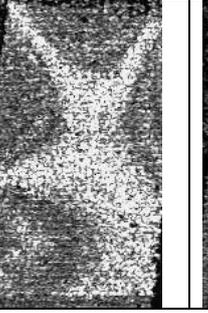
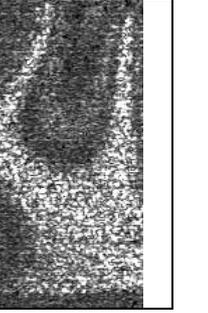
Частоты колебаний Гц	1895	3245	4694	7371	7624
Формы получены с помощью ЦСИ с гладкой опорной волной					
Формы получены с помощью ЦСИ на рис.1.					

Рис.2. Частоты и формы колебаний лопатки 7 ступени компрессора ГТД

В обоих приведённых случаях формы колебаний лопатки снимались в условиях отсутствия виброизоляции оптической схемы с использованием метода статистического накопления разности фаз. Для регистрации спекл-изображений объекта в эксперименте использовалась телевизионная камера MTV – 4363 СА, обеспечивающая регистрацию в стандартном телевизионном формате 640x480 со скоростью 25 кадров в секунду. Для формирования проходящего на светочувствительную площадку телекамеры спекл-изображения объекта использовался объектив «TAMRON» с переменным фокусным расстоянием  $f = 28 - 80$  мм. Как видно из рис. 2, разработанная установка, представленная на рис.1, позволяет регистрировать чёткие картины форм колебаний лопатки. При этом достигается полная идентичность получаемых интерференционных спекл – картин.

Ввиду компактности, простоты юстировки и высокой устойчивости к внешним вибрациям разработанная установка позволяет проводить исследования вибрационных характеристик конструкции или любой части её поверхности во внестеновых условиях без использования интерферометрического стола. На рис. 3 показано использование разработанной установки для исследования вибрационных характеристик колеса компрессора ГТД на отдельном участке поверхности.

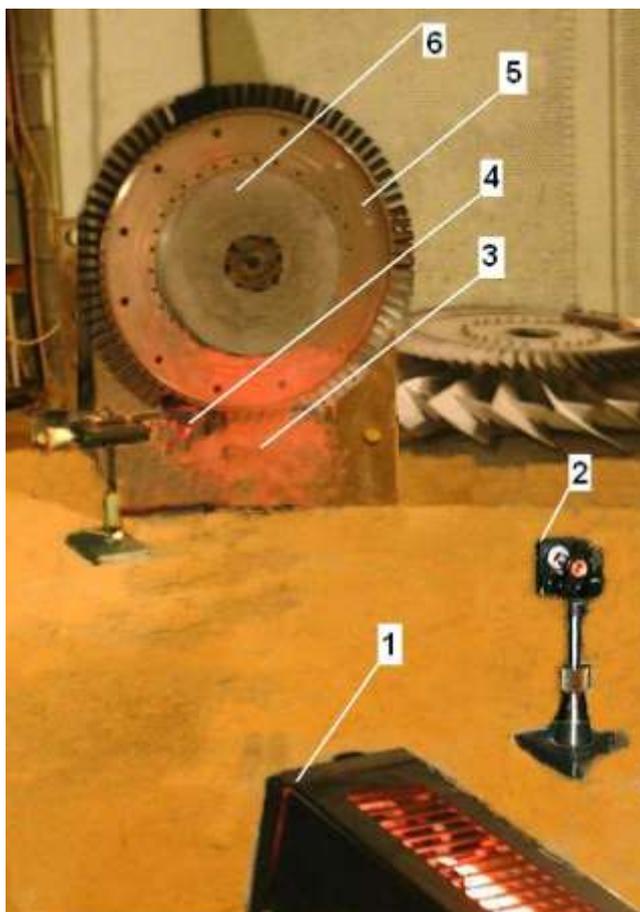


Рис.3 Общий вид спекл – интерферометра для исследования вибраций колеса компрессора на участке поверхности: 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – диффузор; 4 – держатели диффузора; 5 - исследуемый объект; 6 - крепёжная шайба

Колесо жёстко крепится по центральному отверстию к массивному угольнику, который размещается на полу. Исследования проводились без использования интерферометрического стола в условиях отсутствия виброизоляции с применением алгоритма статистического накопления разности фаз. Возбуждение колебаний колеса осуществлялось в осевом направлении с задней стороны колеса с помощью пьезовибратора. На рис.4 показаны формы колебаний освещённого участка (рис.3) колеса компрессора на различных частотах.

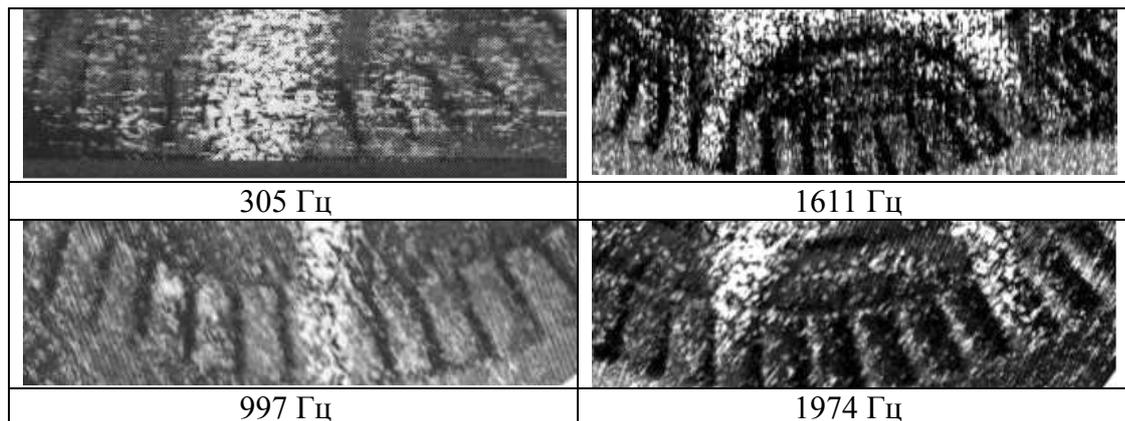


Рис.4 Частоты и формы колебаний участка поверхности колеса компрессора

На колесе компрессора лопатки могут колебаться по разным формам. Ввиду высокой мобильности данной схемы для более детального изучения колебаний отдельных лопаток телекамера может быть расположена ближе к исследуемой детали. При этом дополнительной юстировки оптической схемы не требуется, кроме настройки фотографической резкости.

На рис. 5 представлены результаты исследования вибрационных характеристик участка колеса соплового аппарата ГТД.

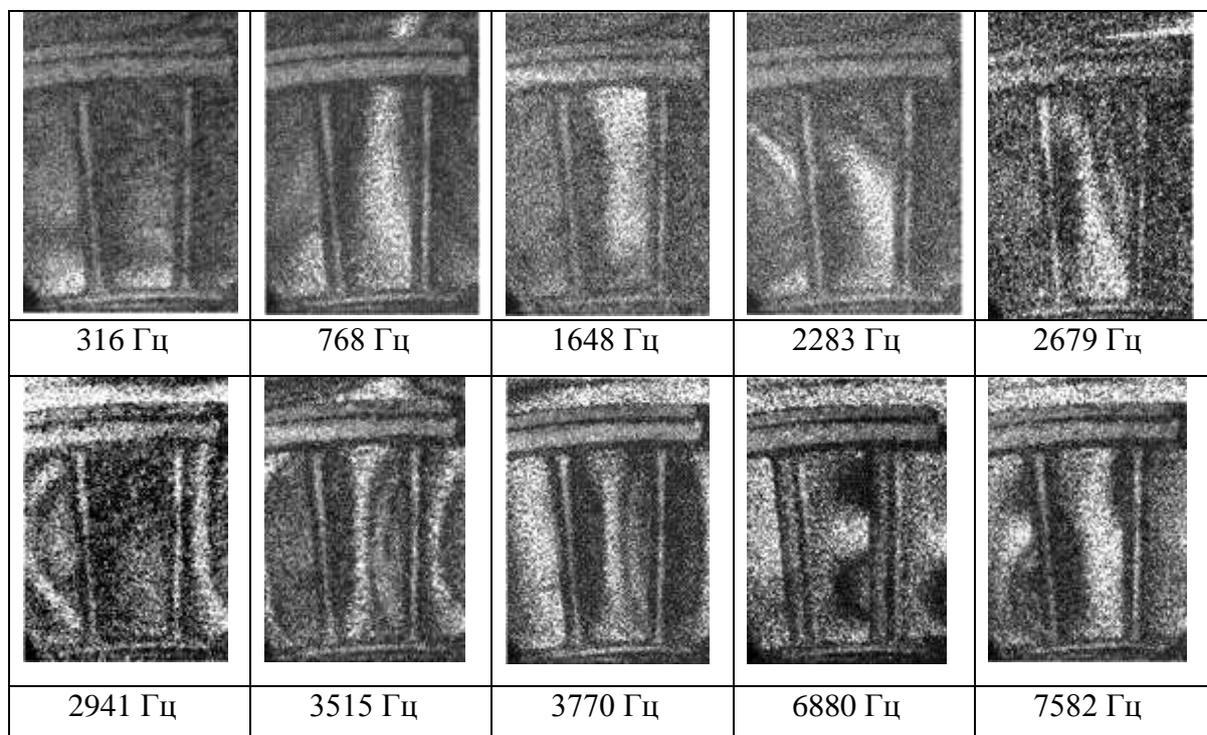


Рис.5 Частоты и формы колебаний участка поверхности соплового аппарата

Проведённые исследования показывают, что колебания отдельных лопаток соплового аппарата в различных случаях могут совпадать, а могут отличаться друг от друга. На частоте  $F = 316$  Гц все лопатки исследуемого участка колеблются по основной форме. На остальных частотах лопатки совершают в основном крутильные колебания. При этом амплитуды и формы колебаний отдельных лопаток в значительной степени отличаются. На частотах  $F = 6880$  Гц и  $F = 7582$  Гц лопатки начинают совершать изгибные колебания с различными амплитудами. Таким образом, разработанная установка позволяет исследовать колебания любого участка поверхности натуральных объектов во внестендовых условиях.

### **Выводы:**

1. Разработана оптическая схема цифрового спекл – интерферометра, отличающегося компактностью и высоким уровнем помехоустойчивости.
2. Экспериментально доказана идентичность интерференционных картин, получаемых с помощью разработанной мобильной установки и с помощью спекл – интерферометра с гладким опорным пучком.
3. Проведённые эксперименты подтвердили возможность применения разработанного спекл – интерферометра с непрерывным лазером для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД во внестендовых условиях без использования интерферометрического стола.

### **Библиографический список**

1. Еленевский Д.С. Поузловая отработка вибропрочности лопаток турбины ГТД.// Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов.- Куйбышев: КуАИ, 1981. С.29 - 41.
2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии// Известия вузов. Авиационная техника. 2007. №1. С.78 – 80.
3. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н.. Лазерно – компьютерная система анализа спекл – интерферограмм вибрирующих объектов// Известия Самарского центра РАН. 1999. № 1. С.134 – 136.
4. Комаров С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл – интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени// Дисс. на соискание уч.степени канд.тех. наук. - Самара, 2004. 234 с.

5. Журавлёв О.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н., Быстров Н.Д., Долгов А.И. Особенности цифрового спекл – интерферометра для определения вибрационных характеристик высоконагруженных элементов авиационного топливного насоса// Известия вузов. Авиационная техника. 2009. №4. С.57 – 59.
6. Джоунс Р., Уайкс К.. Голографическая и спекл – интерферометрия. – М.: Мир, 1986 г. 328 с.
7. Жужукин А.И.. Устройство для исследования форм колебаний. Патент РФ № 71429 G 01 H 9/00. Опубликовано 10.03.2008. Бюл. №7. С.1012.

**Сведения об авторе:**

Жужукин Анатолий Иванович, соискатель, инженер – конструктор ОАО «КУЗНЕЦОВ»,  
г. Самара.

e-mail: [cntkknio@yandex.ru](mailto:cntkknio@yandex.ru)