

УДК 539.3

Автоматизированная система анализа многопроекционных голографических интерферрограмм / Д. С. Еленевский, Н. И. Крайнюков, Ю. Н. Шапошников, А. Г. Храмов // Научное приборостроение. — 1993. — Т. 3. — № 1: Дифракционная плоская оптика и обработка изображений. — С. 126—133.

Рассматривается задача расчета полей вибросмещений лопаток компрессора и турбины авиационных двигателей по данным голографической интерферометрии. Приводятся оптическая схема интерферометра и структурная схема автоматизированной системы исследования колебаний. Описаны математические методы обработки изображений и соответствующие алгоритмы, используемые для расчета поля вибросмещений. Приведены результаты экспериментальных исследований. Библ. 8 назв. Ил. 4.

Д. С. Еленевский, Н. И. Крайнюков, Ю. Н. Шапошников, А. Г. Храмов  
(Самарский филиал ЦКБ уникального приборостроения РАН)

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА МНОГОПРОЕКЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

*A computer-aided system has been described for analysis of multiprojection holographic interferograms with reference to the vibroshifts fields taking place during vibrostrength testing of the units and components of aviation engine turbines.*

### Введение

Процесс исследования резонансных частот и формы колебаний деталей авиационных двигателей существенно упростился с появлением такого мощного инструмента исследований, каким является метод усреднения во времени голографической интерферометрии Пауэла и Стетсона [1]. Голографический контроль широко используется в опытном производстве авиационных двигателей при исследованиях различных вариантов и модификаций разрабатываемых деталей и узлов.

Получаемые в процессе таких испытаний интерферограммы содержат информацию как о форме колебаний в явном виде, так и о напряженно-деформированном состоянии объекта исследования в виде распределения интерференционных полос. Извлечение информации о деформациях объекта из изображения интерферограммы позволяет избавиться от трудоемкого процесса тензометрирования.

Проблема извлечения такой информации разбивается на две практически независимые задачи: 1) расчет поля вибросмещений по изображению интерферограммы; 2) расчет по полученным данным деформаций и напряжений исследуемого объекта. Предметом настоящей работы является первая из указанных задач — расчет поля вибросмещений лопаток компрессора и турбины авиационных двигателей. Относительно второй задачи необходимо отметить, что с развитием компьютерной техники и конечно-элементных методов расчета она также успешно решается [2].

### 1. Описание экспериментальной установки

Известно много работ, посвященных расчету смещений поверхности по картине интерференционных полос. Наиболее полный их обзор дан в монографии Шумана и Дюба [3]. Применительно к расчету амплитуд колебаний лопаток двигателей при их вибрационных испытаниях задача существенно упрощается наличием заранее известного положения неподвижных точек лопатки (замковое соединение) и легко определяемого порядкового номера интерференционных полос.

Описываемый в статье расчет амплитуд колебаний лопатки основан на статическом методе определения смещений, предложенном Энносом [4].

Система из трех линейных уравнений

$$\lambda N_i(x, y, z) = A(x, y, z) \cdot K^i(x, y, z), \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света в интерферометре,  $N_i(x, y, z)$  — номер интерференционной полосы,  $A(x, y, z)$  — вектор смещения,  $K^i(x, y, z)$  — вектор чувствительности голографического интерферометра, определяемый как разность векторов освещения  $K_1^i(x, y, z)$  и наблюдения  $K_2^i(x, y, z)$  точки  $(x, y, z)$ , позволяет рассчитать амплитуду колебаний любой точки поверхности. Для полного и точного вычисления вектора вибро смещения  $A(x, y, z)$  необходимо в каждой точке поверхности иметь три достаточно различающихся вектора  $K^i$ .

Мы реализовали простую оптическую схему голографического интерферометра, позволяющего с помощью одной голограммы Френеля одновременно получить три интерферограммы с различающимися векторами чувствительности  $K^i$ , в которых направления освещения  $K_1^i$  и наблюдения  $K_2^i$  точек поверхности совпадают. Интерферометр связан с системой исследования резонансных частот и форм колебаний, включающей устройство крепления и бесконтактного возбуждения резонансных колебаний лопаток.

На рис. 1 приведен общий вид экспериментальной установки для регистрации интерферограмм лопаток авиационных двигателей.

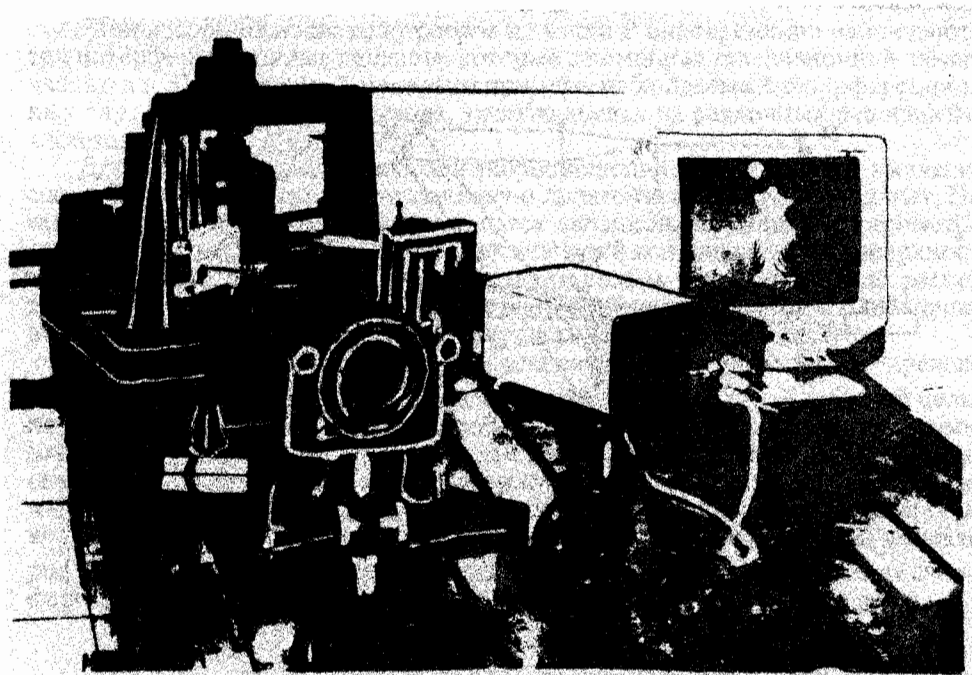


Рис. 1. Экспериментальная установка для регистрации голографических интерферограмм лопаток авиационных двигателей.

Принципиальная оптическая схема интерферометра и структурная схема системы исследования колебаний представлены на рис. 2. Исследуемая лопатка В с помощью специальных зажимных элементов, имитирующих ее крепление в рабочем колесе двигателя, устанавливается в устройство UV, в которое вмонтирован пьезоэлектрический возбудитель колебаний. Возбуждение колебаний и фиксация резонансных частот осуществляются с помощью звукового генератора SG, микрофона MS, индикатора IS уровня сигнала отклика, осциллографа OS и частотомера FM. Подробно система, процессы возбуждения колебаний и регистрации интерферограмм описаны нами в [5]. Отметим только, что интерферограммы могут регистрироваться как методом усреднения во времени, так и стробоголографическим методом, т. е. интерференционные полосы описываются либо функцией Бесселя первого рода нулевого порядка, либо функцией косинуса. Для освещения и наблюдения объекта по трем направлениям используют дополнительные зеркала M1 и M2, расположенные вблизи исследуемой лопатки. Объектный пучок формируется таким образом, что он освещает лопатку и дополнительные зеркала. Последние установлены так, что отраженный от них пучок освещает перо лопатки. Непременным условием работы такой схемы является необходимость нанесения на поверхность лопатки ретроотражающего покрытия, которое практически полностью отражает освещающий лопатку пучок обратно на источник S освещения [6]. Другой особенностью выбранной схемы интерферометра является наличие светоделиителя BS1 в плече расширенного объектного пучка, установленного так, чтобы точка P наблюдения восстановленного с голограммы изображения совпала с точкой S источника освещения.

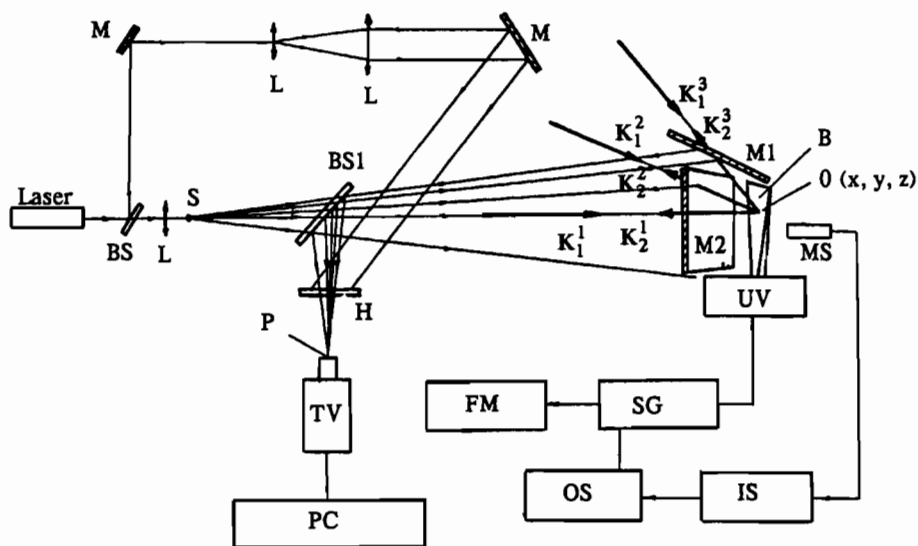


Рис. 2. Оптическая и структурная схема системы исследования колебаний лопаток.  
Объяснение в тексте.

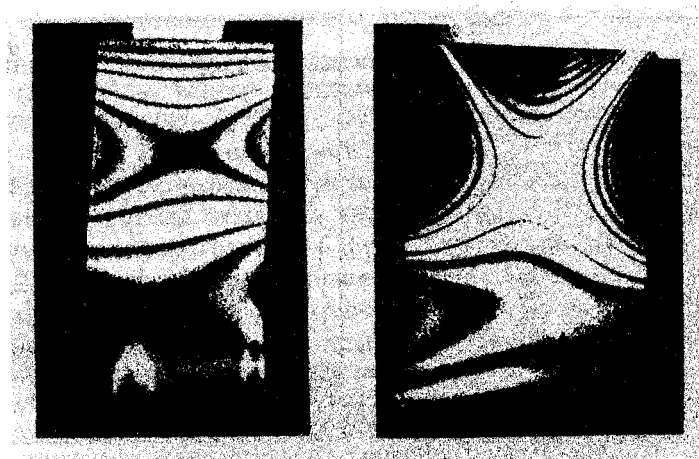


Рис. 3. Примеры интерферограмм лопаток.

Таким образом, например, точка  $O(x, y, z)$  на поверхности исследуемой лопатки освещается (вектора  $K_1^1, K_1^2, K_1^3$ ) и наблюдается (вектора  $K_2^1, K_2^2, K_2^3$ ) по взаимно совпадающим направлениям, что значительно упрощает последующий расчет векторов чувствительности  $K^i$ .

При восстановлении голограммы из точки  $P$  одновременно наблюдаются три интерференционные картины, которые с помощью телевизионной камеры вводятся в ЭВМ. На рис. 3 показаны примеры наблюдаемых интерференционных картин лопатки компрессора, колеблющейся на различных резонансных частотах.

Для проведения расчетов полей вибросмещений лопатки удобно в качестве системы координат взять ортогональную лопаточную систему координат. Поскольку в процессе изготовления лопаток авиационных двигателей геометрические размеры задаются в виде таблиц значений координат точек поверхности по определенным сечениям, то предварительным условием начала расчета вибросмещений является ввод в ЭВМ координат точек сечений и моделирование поверхности, которое осуществляется сплайн-аппроксимацией.

Следующим шагом в процессе расчета вибросмещений является определение ориентации каждого из трех векторов чувствительности  $K^i$ . С этой целью на поверхность исследуемой лопатки наносятся четыре реперные точки, координаты которых известны в результате физических измерений. По взаимной ориентации этих точек на каждой из интерференционных картин, наблюдаемых из точки  $P$ , легко рассчитать координаты этой точки в локальной системе координат каждой из картин, а следовательно, ориентацию каждого из векторов  $K^i$ . Результаты восстановления фазовой функции по наблюдаемой интерферограмме представлены на рис. 4.

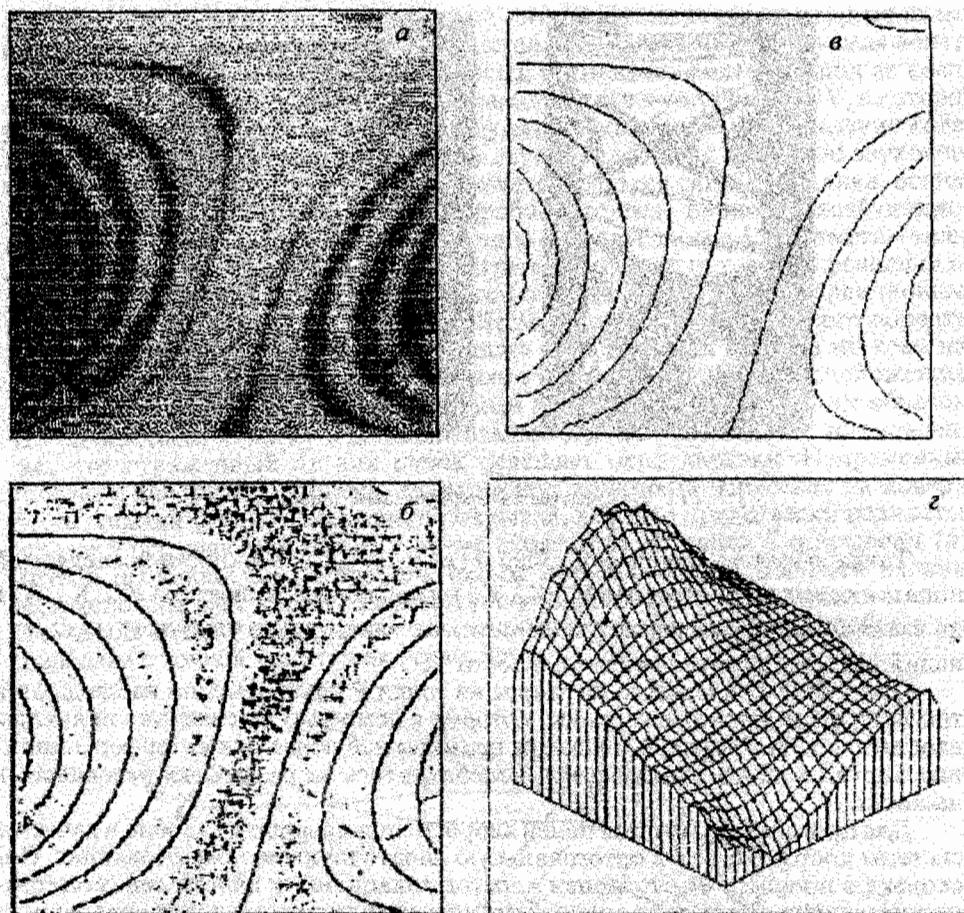


Рис. 4. Этапы обработки интерферограмм лопаток.  
 а — исходное изображение, б — выделение центров полос, в — скелетизация,  
 г — фазовая функция.

## 2. Математические методы и алгоритмы анализа интерферограмм

Распределение яркости точек изображения интерферограммы для методов усреднения во времени и строболографического метода можно описать следующими соотношениями [7]:

$$I^i(\mathbf{u}) = I_0 J_0^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \mathbf{K}^i(x, y, z) \cdot \mathbf{A}(x, y, z) \right], \quad (2)$$

$$I^i(\mathbf{u}) = I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \mathbf{K}^i(x, y, z) \cdot \mathbf{A}(x, y, z) \right], \quad (3)$$

где  $(x, y, z)$  — декартовы координаты точки объекта,  $u = (u_1, u_2)$  — декартовы координаты в плоскости изображения,  $K^i(x, y, z)$  — вектор чувствительности,  $A(x, y, z)$  — вектор смещения точки объекта,  $\lambda$  — длина волны когерентного источника,  $J_0(\cdot)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $i$  — номер интерферограммы.

Задача анализа интерферограмм заключается в восстановлении поля вибросмещений (т. е. поля амплитуд вибрации)  $A(x, y, z)$  по наблюдаемому изображению интерферограммы — функции яркости  $I(u)$  из уравнений (2) или (3). Для полного восстановления вектора смещений  $A(x, y, z)$  необходимо как минимум три интерферограммы ( $i = 1, 2, 3$ ).

Как показали проведенные исследования, наиболее надежным и устойчивым к помехам является следующий подход к решению поставленной задачи [8]. Сначала методами цифровой обработки изображений выделяются линии экстремумов на изображении интерферограммы  $I(u)$ , т. е. множества точек  $u$ , соответствующие минимумам или максимумам функции яркости интерференционной картины. На линиях экстремумов выполняются следующие соотношения:

$$\frac{\pi}{\lambda} K^i(x, y, z) \cdot A(x, y, z) = \varphi_m^i, \quad u^i \in U_m^i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где  $\varphi_m^i$  — точки экстремумов функции  $J_0^2(\varphi)$  для метода усреднения во времени или функции  $\cos^2(\varphi)$  для стробоголографического метода регистрации интерферограммы;  $U_m^i$  — множества точек экстремумов.

Для нахождения поля вектора смещения  $A(x, y, z)$  к уравнению (4) необходимо добавить уравнение, связывающее координаты на поверхности исследуемого объекта и координаты точек на изображении интерферограммы (уравнение геометрической привязки)

$$u^i = P^i(x, y, z), \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Кроме того, необходимо учесть уравнение, описывающее поверхность исследуемого объекта

$$F(x, y, z) = 0. \quad (6)$$

Решение системы уравнений (4)–(6) позволяет рассчитать векторное поле смещений  $A(x, y, z)$  в точках, соответствующих линиям экстремумов на интерферограмме. Значение поля смещений в остальных точках можно получить, используя различные методы интерполяции функции трех переменных.

В рассмотренном подходе наиболее трудоемким с точки зрения обработки является первый этап, заключающийся в выделении и нумерации линий экстремумов на изображении интерферограммы. Сложность выделения линий экстремумов обусловлена наличием значительных помех и искажений при регистрации интерферограммы (нелинейность устройства ввода изображений в память компьютера, неравномерная контрастность, спекл-шум и т. п.).

В [8] предложено использовать метод локальной квадратичной аппроксимации для выделения линий экстремумов.

Основная идея метода локальной квадратичной аппроксимации заключается в аппроксимации по методу наименьших квадратов функции яркости изображения в пределах некоторой области скользящего "окна" поверхностью второго порядка и определении положения главной оси этой поверхности. Если главная ось проходит достаточно близко от текущего положения центра "окна", то считается, что центральная точка лежит на линии экстремумов.

Очевидно, что рассмотренный метод позволяет обойтись без предварительной линейной фильтрации, так как локальная аппроксимация квадратичной поверхностью обладает сглаживающими свойствами. Однако может потребоваться последующая логическая фильтрация бинарного изображения для получения линий единичной толщины и восстановления связности линий.

Для получения линий единичной толщины используется логический фильтр с маской  $3 \times 3$ . Значение центрального элемента "окна" задается в виде таблицы из 256 элементов (восемь граничных элементов "окна"). Таблица составлена таким образом, чтобы сохранялись линии, имеющие единичную (один пиксел) толщину и обеспечивалась 8-точечная связность.

Уравнение геометрической привязки (5) полностью определяется геометрическими параметрами оптической схемы восстановления интерферограммы и устройства ввода изображений в память компьютера. Однако на практике чрезвычайно сложно точно измерить эти геометрические параметры. Поэтому предлагается использовать метод опорных точек (маркеров), наносимых на исследуемый объект и имеющих известные (измеренные) координаты  $(x, y, z)$ . Так как маркеры видны и на изображении интерферограммы, то легко измерить их "экранные" координаты  $u = (u_1, u_2)$ .

В параксиальном приближении преобразования центрального проецирования связь между указанными системами координат (5) является линейной

$$\begin{aligned} u_1 &= ax + by + cz + d, \\ u_2 &= ex + fy + gz + h. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты привязки  $a, b, c, d, e, f, g, h$  находятся из (7) методом наименьших квадратов. Число опорных точек (маркеров) должно быть не менее четырех.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Powell R. L., Stetson K. A. // J. Opt. Soc. Amer., 1965. Vol. 55. P. 1593.
2. Березин А. И., Давыдов А. Н. Расчетно-экспериментальная оценка напряжений лопаток компрессора при колебаниях на собственных формах: Тезисы докл. XII Всес. научно-техн. конф. "Конструкционная прочность двигателей". Куйбышев, 1990.
3. Schuman W., Dubas M. Holographic Interferometry. From the Scape of Deformation Analysis of Opaque Bodies. Springer-Verlag, 1979.
4. Ennos A. E. // J. Sci. Instrum. 1968. P. 731.



5. Еленевский Д. С., Бекбулатов Р. С., Шапочников Ю. Н. и др. // Проблемы прочности. 1976. N 5. С. 95.
6. Fagan W. F., Weddel P., McCracken W. // Opt. and Laser Technol. 1972. Vol. 4. P. 167.
7. Островский Ю. И., Щепков В. П., Яковлев В. В. Голографические методы измерения деформаций. М., 1988.
8. Храмов А. Г. // Оптическая запись и обработка информации : Сб. науч. трудов. Куйбышев, 1988. С.123—128.

*Рукопись поступила 25.01.93*