

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ, Ю.Г. ЗОЛОТОЙ, Д.В. ДОВГАНЬ, И.Ю. ЖУК

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рассматривается экспериментальное определение динамических характеристик конструктивных элементов ГТД методом стробоголографической виброметрии в реальном времени. Исключение влияния паразитных полос интерференции и восстановление формы колебаний осуществляется по данным компьютерного фотометрирования интерферограмм при сканировании стробирующим импульсом фазы механических колебаний. Предложенная методика позволяет производить оцифровку интерферограмм без привязки к нулевой полосе и определить спектр собственных частот и форм колебаний конструкции с использованием одной опорной голограммы.

Ключевые слова: *расшифровка голографических интерферограмм, лопатка ГТД, стробоголографическая виброметрия, собственные частоты и формы колебаний.*

Введение

Актуальность задачи определения динамических параметров колебаний элементов конструкций в приоритетных областях современной техники является общеизвестной [1].

Для теоретического решения этих задач эффективно используются современные расчётные методики, в основном базирующиеся на методе конечных элементов (МКЭ), и компьютерные программы ANSYS, COSMOS, NASTRAN, DYNA и др. Известно, что при создании математических моделей для расчёта колебаний элементов ГТД со сложным распределением масс, как правило, приходится прибегать к упрощениям и допущениям. При этом остро стоит вопрос адекватности моделей и достоверности полученных результатов. Исчерпывающий ответ здесь может дать только эксперимент. Достаточно часто экспериментальный метод определения спектра резонансных колебаний деталей ГТД является единственно возможным.

Кроме того, вопросы анализа конечно-элементных схем расчёта динамических параметров деталей со сложным распределением инерционных и жёсткостных характеристик ещё недостаточно полно освещены в специальной литературе. Как следствие, многие исследователи применяют комбинированный экспериментально-расчётный метод, предполагающий экспериментальное определение нескольких резонансных частот и форм колебаний в различных участках спектра. Используя полученные результаты в качестве опорных точек, варьируя тип и количество конечных элементов, изменяя форму

конечного элемента в МКЭ-расчёте, удаётся оптимизировать расчётную модель и достигнуть приемлемой погрешности результата [2].

Поэтому разработка и совершенствование методов исследования резонансных явлений в экспериментальной механике представляются важными и актуальными.

Постановка задачи. Исследование динамических параметров конструкции предполагает определение значений собственных частот в реально возбуждаемой части спектра и соответствующих им форм колебаний (т.е. дислокацию узловых линий и хотя бы качественное распределение амплитуд по исследуемой поверхности).

Наиболее точно экспериментально определять резонансные частоты и формы колебаний позволяет метод голографической интерферометрии (ГИ) [3, 4, 5]. Для изучения вибрации этот метод применяется в трёх вариантах:

- а) метод исследования колебаний в реальном времени;
- б) метод усреднения по времени;
- в) стробоголографический метод.

В варианте исследования колебаний в реальном времени объект помещается в оптическую схему голографического интерферометра и регистрируется на "опорной" голограмме в ненагруженном состоянии. Затем производится его виброн нагружение с плавным изменением частоты и в реальном времени визуально фиксируется процесс возникновения резонансных колебаний. При этом с высокой точностью и достаточно оперативно определяется спектр собственных частот колебаний. Однако точному

определению форм колебаний препятствуют паразитные полосы интерференции, возникающие как следствие мокрой фотохимической обработки и сушки фотослоя. Кроме того, наблюдаемая в реальном времени картина полос интерференции при колебаниях объекта имеет очень низкий контраст [6].

В методе усреднения по времени вибрирующий объект регистрируется на голограмме при освещении непрерывным световым потоком. Такая интерферограмма свободна от паразитных полос и даёт возможность точно определить положения узлов, выделяющихся на изображении объекта в виде ярких линий. Однако оценка соотношения амплитуд в пучностях усложнена резким снижением яркости интерференционной картины с увеличением амплитуды колебаний [7]. На практике удаётся различить полосы не выше 10 порядка.

Повышения контраста полос достигают применением стробоскопического метода съёмки [8], экспонируя голограмму световыми импульсами, синхронизированными с амплитудными отклонениями вибрирующей детали. При высокой скважности стробирования яркость и контрастность интерферограммы возрастают и её можно рассматривать как двухэкспозиционную [6]. Это позволяет оценить распределение амплитуд колебаний по вибрирующей поверхности, но зачастую осложняет идентификацию нулевой полосы. На наш взгляд, максимальную информативность обеспечивает комплекс-

ное использование всех трёх методов. Однако такая постановка эксперимента является достаточно сложным, трудоёмким и дорогостоящим процессом. К примеру, для определения форм колебаний турбинной лопатки или цапфы высокооборотного подшипника в реально возбуждаемой области спектра потребуется запись 15 – 30 голограмм.

Цель работы: разработать способ обработки результатов, позволяющий определить спектр собственных частот и форм колебаний конструкции в реальном времени с использованием одной опорной голограммы.

Решить эту задачу нам удалось с помощью цифровой видеозаписи стробоинтерферограммы в реальном времени при плавном смещении момента запуска стробирующего импульса относительно фазы механических колебаний с последующей компьютерной обработкой видеофайла.

Экспериментальная установка

Голографический стенд смонтирован на массивной виброзащищённой плите. В качестве источника когерентного излучения использован He-Ne лазер ЛГН-215 с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм и мощностью излучения 50 мВт.

Оптическая схема голографического интерферометра и блок-схема аппаратного комплекса представлены на рис. 1.

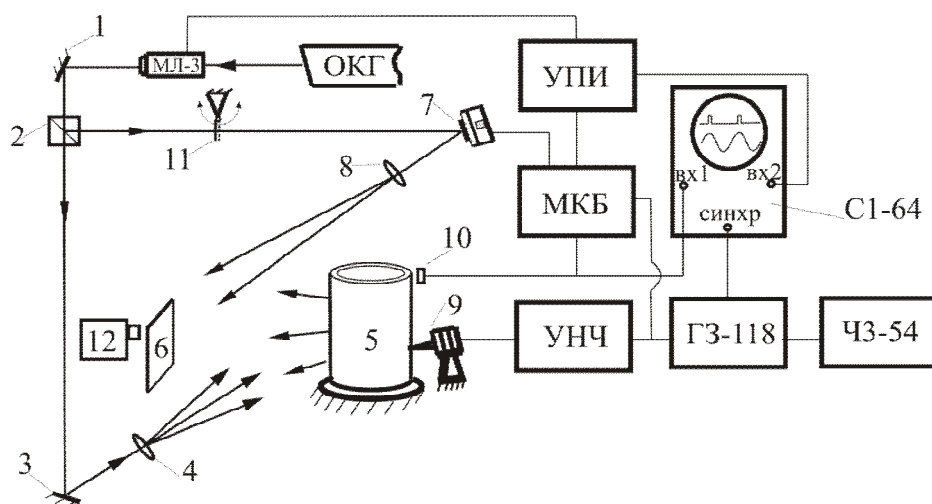


Рис. 1. Оптическая схема голографического интерферометра

и блок-схема аппаратного комплекса экспериментального стенда:

- ОКГ – He-Ne лазер ЛГН-215; МЛ-3 – электрооптический модулятор излучения;
 УПИ – усилитель прямоугольных импульсов; МКБ – микроконтроллерный блок управления;
 С1-64 – двухлучевой осциллограф; УНЧ – усилитель низкой частоты; ГЗ-118 – звуковой генератор;
 ЧЗ-54 – частотомер; 1,3 – плоские зеркала; 2 – светоделитель; 4,8 – микрообъективы;
 5 – исследуемый объект; 6 – голограмма; 7 – плоское подвижное зеркало;
 9 – вибропреобразователь; 10 – вибродатчик; 11 – убирающийся нейтральный светофильтр;
 12 – видеокамера

Луч лазера проходит через электрооптический модулятор МЛ-3, отражается зеркалом (1) и светоделителем (2) делится на два луча. Проходящий луч после отражения зеркалом (3) и расширения микрообъективом (4) освещает объект (5). Рассеянный им свет образует предметную волну, фиксируемую голограммой (6). Луч, отражённый светоделителем, направляется зеркалом (7) на микрообъектив (8) и в области голограммы создаёт сферическую опорную волну. Зеркало (7) смонтировано на упругой ферромагнитной мембране электродинамической головки. При плавном изменении тока в катушке динамика происходит плавное смещение зеркала на 2-3 мкм в направлении нормали. Таким образом, в опорной волне по отношению к предметной возникает плавное изменяющийся фазовый сдвиг.

Запись голограммы производится в сходящихся пучках. Крепление фотопластины позволяет после фотохимической обработки восстановить её в положении экспонирования с интерферометрической точностью.

Вибровозбуждение исследуемой конструкции осуществляется пьезокерамическим вибропреобразователем (9), на который подаётся синусоидальный сигнал звукового генератора (ЗГ), усиленный усилителем низкой частоты (УНЧ). Частота колебаний определяется с помощью электронного частотомера.

Модуляция лазерного излучения производится электрооптическим модулятором, на который подаются прямоугольные импульсы регулируемой скважности, усиленные до полуволнового напряжения усилителем прямоугольных импульсов (УПИ). Временная задержка стробирующих импульсов относительно фазы механических колебаний контролируется с помощью двулучевого осциллографа, на первый вход которого подаются импульсы с УПИ, а на второй вход – сигнал с бесконтактного вибродатчика (10) индукционного или ёмкостного типа. Попутно контролируется степень кратности частоты возбуждаемых колебаний по отношению к частоте ЗГ.

Для реализации предложенного метода оцифровки интерферограмм разработан и создан электронный блок (МКБ), состоящий из нескольких микроконтроллерных устройств.

1. Устройство формирования стробирующих импульсов позволяет получить прямоугольные импульсы длительностью от 0,5с до 10^{-6} с. Запуск устройства производится синусоидальным сигналом ЗГ. При изменении частоты задающего сигнала скважность импульсов поддерживается постоянной. Устройство может быть запрограммировано на плавное сканирование стробирующим импульсом фазы механических колебаний объекта. После усиления УПИ импульсы подаются на модулятор луча.

2. Устройство формирования плавно изменяющегося фазового сдвига в опорной волне создаёт ток в катушке динамика зеркала (6), изменяющийся по линейному закону.

3. Управляющий контроллер запускает работу первых двух устройств по заданной программе.

Методика проведения эксперимента

После установки объекта исследования в оптической схеме интерферометра регистрируется его опорная голограмма в исходном ненагруженном состоянии. С целью получения максимального контраста «живых» полос при наблюдении интерферограммы в реальном времени соотношение интенсивностей опорной и предметной волны должны быть примерно 3:1 на этапе записи голограммы и 10:1 при её восстановлении. Поэтому, при экспонировании голограммы в тракт опорного пучка вводится нейтральный светофильтр (11), который затем убирается при наблюдении интерферограмм.

Непосредственно за голограммой устанавливается видеокамера (12), позволяющая наблюдать интерферограмму на экране компьютера и производить её видеозапись.

Для определения резонансной частоты включается вибровозбуждение и плавно изменяется его частота. В момент возникновения резонанса резкое возрастание амплитуд колебаний исследуемой детали приводит к размытию паразитных полос во всех точках её поверхности за исключением тех, которые соответствуют узлам колебаний. Измерив частоту сигнала задающего генератора с помощью частотомера и проверив кратность частоты сигнала с вибродатчика по отношению к частоте генератора, с высокой точностью получим значение собственной частоты исследуемого объекта.

Для определения формы колебаний сначала включается модуляция излучения лазера и стробирующие импульсы синхронизируются с одним из двух моментов амплитудного отклонения объекта. Амплитуда колебаний подбирается такой, чтобы в местах максимальной плотности полос они уверенно разрешались матрицей видеокамеры.

Затем видеокамера включается на запись, а контроллерный блок выполняет следующие операции:

1. В опорный пучок вводится плавно изменяющийся фазовый сдвиг такой, чтобы через каждый пиксель записываемого изображения прошло 2-3 полосы. Записанный при этом видеофайл назовём тестовым файлом 1.

2. В течении 15-20 сек осуществляется плавное смещение стробирующего импульса относительно фазы механических колебаний на половину

периода. Записанное на этом видеофайле движение картины интерференции соответствует её изменению при смещении точек поверхности объекта от одного амплитудного положения до другого. Записанный файл назовём рабочим файлом. Отдельные его кадры и соответствующие им положения стробирующего импульса представлены на рис 2.

3. Повторяется операция пункта 1. Записанный при этом файл назовём тестовым файлом 2.

4. Стробирующий импульс скачком смещается относительно своего конечного положения на четверть периода и повторяется операция пункта 1. Записанный при этом файл назовём тестовым файлом 3.

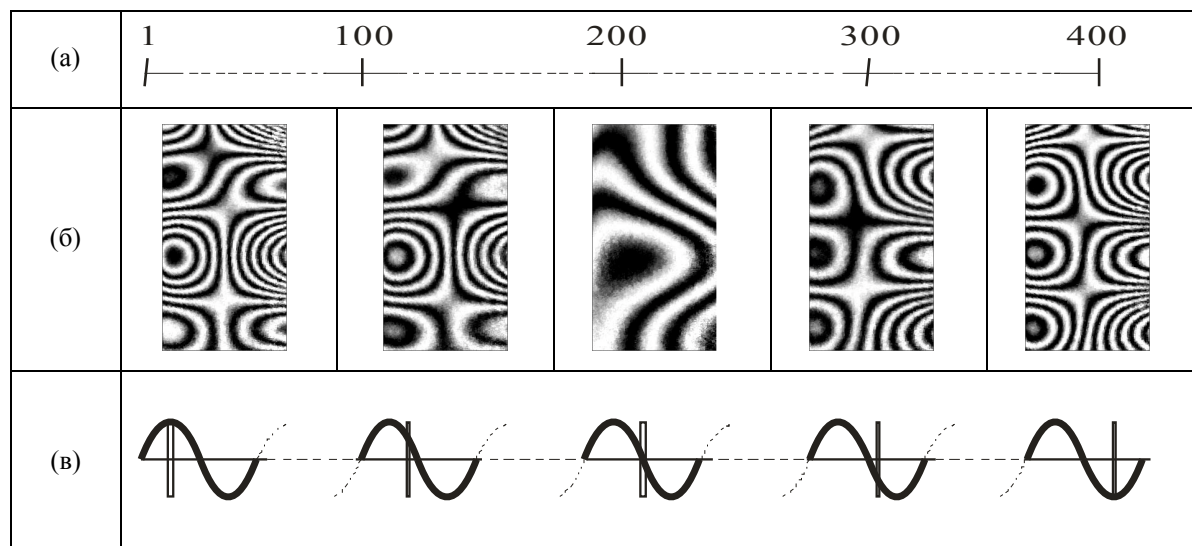


Рис. 2. Вид интерферограммы в зависимости от положения стробирующего импульса:

(а) – номер кадра; (б) – вид интерферограммы; (в) – положение стробирующего импульса

Методика и компьютерная программа оцифровки интерферограмм

Предложенный нами принцип оцифровки интерферограммы и исключения из неё неконтролируемых искажений, вносимых паразитными полосами, состоит в следующем. Записанная на первом кадре рабочего видеофайла интерферограмма соответствует первому амплитудному состоянию объекта и в каждой точке исследуемой поверхности описывается соотношением[8]:

$$\overline{K}\overline{U}_1 = (N_1 - \delta/2\pi)\lambda, \quad (1)$$

где $\overline{K}$ – вектор чувствительности интерферометра;

$\overline{U}_1$ – первое амплитудное вибро смещение в данной точке;

N_1 – порядок интерференционной полосы в первом амплитудном состоянии для данной точки, δ – неконтролируемое фазовое смещение в восстановленной опорной голограммой световой волне (паразитные полосы);

λ – длина волны излучения лазера.

На последнем кадре этого видеофайла интерферограмма соответствует второму амплитудному состоянию объекта и описывается уравнением:

$$\overline{K}\overline{U}_2 = (N_2 - \delta/2\pi)\lambda, \quad (2)$$

где $\overline{U}_2$ – амплитудное смещение;

N_2 – амплитудное смещение и порядок интерференционной полосы во втором амплитудном состоянии.

Вычитая (2) из (1), получим:

$$\overline{K}(\overline{U}_1 - \overline{U}_2) = (N_1 - N_2)\lambda. \quad (3)$$

В силу малости колебаний их можно считать линейными, поэтому $\overline{U}_1 = -\overline{U}_2 = \overline{U}$ – амплитуда малых колебаний. Тогда:

$$\overline{K}\overline{U} = (N_1 - N_2)\lambda, \quad (4)$$

Таким образом, проекция вибро смещения на направление вектора чувствительности интерферометра определяется в каждой точке поверхности исследуемой детали количеством полос $N = N_1 - N_2$, прошедших через неё за время сканирования стробирующим импульсом фазы колебаний объекта в пределах полупериода, от одного амплитудного состояния до другого.

Значение N можно определить, фотометрируя каждый пиксель интерферограммы на всех кадрах рабочего видеофайла. Типичный вид зависимости яркости пикселя от номера кадра приведен на рис. 3. Очевидно, что N будет равно количеству периодов изменения яркости на этом графике. Заметим, что в данной методике при подсчёте порядков полос нет

привязки к нулевой полосе, и оцифровка может быть произведена, если нулевая полоса вовсе отсутствует в поле зрения интерферограммы.

Тестовые файлы 1, 2, 3 используются для определения знаков порядков полос и определения размаха яркости каждого пикселя изображения. Тогда

реконструкция свободной от паразитных полос интерференционной картины сводится к вычислению нормированного к единице значения яркости I каждого пикселя изображения из соотношения [7]:

$$I = 0,5(1 + \cos(N\pi)) . \quad (5)$$

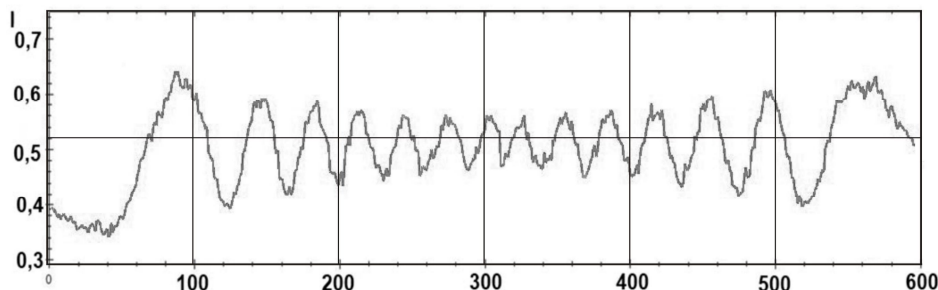


Рис. 3. Зависимость яркости одного из пикселей кинограммы от номера кадра

По кинограмме, элементы которой представлены на рис. 2, в соответствии с данной методикой произведено восстановление формы колебаний цилиндрической цапфы, вибрирующей по форме с 4-мя узловыми окружностями. Результат компьютерного восстановления формы колебаний представлен на рис. 4 (а).

Для сравнения на рис. 4 (б) приведена оптическая стробоинтерферограмма, зарегистрированная на этой же частоте (участок восстановления выделен пунктирной линией).

Очевидно хорошее соответствие картин распределения амплитуд.

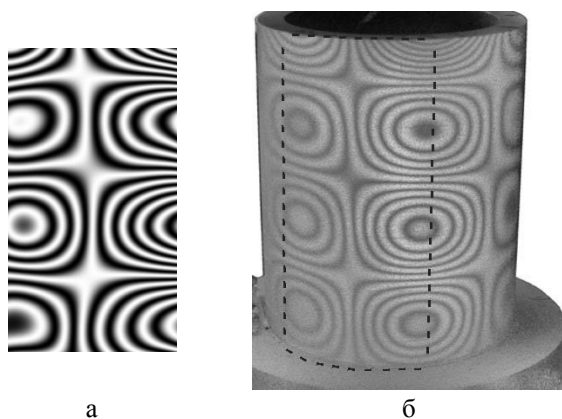


Рис. 4. Форма колебаний толстостенной цилиндрической цапфы на частоте 23912 Гц: а – восстановленная по кинограмме в реальном времени; б – полученная стробоголографическим методом

Выводы

1. Разработан метод исследования форм резонансных колебаний деталей ГТД, позволяющий определять спектр собственных частот и форм

колебаний конструкции путём видеорегистрации в реальном времени изменяющейся картины интерференции при стробированном излучении лазера.

2. Показана возможность определения всего реально возбуждаемого спектра собственных частот и форм колебаний ГТД с помощью одной голограммы лопатки в ненагруженном состоянии. При этом существенно уменьшена трудоёмкость эксперимента и количество регистрируемых голограмм.

3. Выявлена возможность исключения влияния неизбежных технологических погрешностей наблюдения в реальном времени и восстановления свободных от искажений форм колебаний элементов ГТД.

Полученные в результате реализации приведенного метода данные лежат в основе определения деформаций и напряжений в элементах ГТД без привязки к областям детали с нулевыми виброперемещениями (см. рис. 4).

Литература

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей: Под ред. д-ра техн. наук, проф. И.А. Биргера и д-ра техн. наук, проф. Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Макаева Р.Х. Определение вибрационных характеристик дисков постоянной толщины экспериментально-расчетным методом с применением голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, А.М. Царева, А.Х. Каримов // Голография в России и за рубежом. Наука и практика: Сб. трудов четвертой Междунар. науч.-практич. конф. – М., 2007. – С. 116-118.
3. Springer Handbook of experimental solid mechanics. – Springer. 2008 ISBN: 978-0-387-26883-5.
4. Kreis Thomas. Handbook of Holographic Interferometry. Optical and Digital Methods / Thomas

Kreis. – 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2005 ISBN: 3-527-40546-1.

5. Исследование вибрационных характеристик деталей и узлов двигателей методом голографической интерферометрии при их диагностике / Р.Х. Макаева, М.Г. Хабибуллин, Л.В. Горюнов, А.Х. Каримов. – Казань: Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н.Туполева, 1998. – 55 с.

6. Островский Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев. – М.: Наука, 1988. – 248 с.

7. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест. – М.: Мир., 1982. – 504 с.

8. Экспериментальная механика: В 2-х кн.: пер с англ./: под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – Кн. 1. – 616 с. – Кн. 2. – 552 с.

Поступила в редакцию 6.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ГТД МЕТОДОМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

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

Розглядається експериментальне визначення динамічних характеристик конструкційних елементів ГТД методом стробоголографічної віброметрії в реальному часі. Виключення впливу паразитних смуг інтерференції та відновлення форми коливань здійснюється за даними комп'ютерного фотометрування інтерферограм при скануванні стробуючим імпульсом фази механічних коливань. Запропонована методика дозволяє проводити оцифровку інтерферограм без прив'язки до нульової смуги та визначати спектр власних частот і форм коливань конструкції з використанням однієї опорної голограми.

Ключові слова: розшифровка голографічних інтерферограм, лопатка ГТД, стробоголографічна віброметрія, власні частоти та форми коливань.

STUDY OF VIBRATION FORMS OF GTE ELEMENTS BY METHODS OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY IN REAL TIME

M.R. Tkach, J.G. Zolotoi, D.V. Dovgan, I.J. Zhuk

The experimental determination of dynamic parameters of GTE elements using holographic vibrometry in real time are considered. The influence of parasitic interference fringes is excluded and recovery modes of vibration is carried out according to the computer by scanning photometry interferograms strobe pulse phase of the mechanical vibrations. The method of interferogram digitization allows without reference to the zero fringe and to determine the spectrum of natural frequencies and modes of vibration of construction using one reference hologram is presented.

Key words: decoding holographic interferograms, GTE blade, strobogolographic vibrometry, self-resonant frequency, the vibration forms.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tkach@mksat.net.

Золотой Юрий Григорьевич – ст. преподаватель, зав. лаб. лазерных средств измерений Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: goldspekl@ukr.net.

Довгань Дмитрий Витальевич – м.н.с. Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dovband@trion.mk.ua.

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