

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ГОЛОГРАФИИ

Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н.

Научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Цифровые голографические интерферометры являются простым и надежным инструментом исследования вибраций различных конструкций. Они нашли широкое применение в процессе поузловой доводки авиационных двигателей, в частности, при исследовании динамических характеристик лопаток компрессора и турбины [1].

Поскольку конструктивная динамика диска с лопатками во многом определяет прочностные свойства современных двигателей, важным представляется распространение методов цифровой голографии на исследование колебаний облопаченных дисков компрессоров и турбин в процессе вращения. Это позволит получить наиболее полную информацию о влиянии вращения на колебательные процессы, происходящие в таких объектах.

Однако чтобы осуществить такие исследования необходимо решить ряд проблем, связанных с тем, что интерферометр, если не принимать специальных мер, чувствителен как к колебательному, так и к вращательному движениям объекта [1]. Интерференционная картина при регистрации колеблющегося вращающегося объекта привязана к результирующему смещению каждой точки объекта, и выделить изменение фазы полос, вызванное только вибрацией, не представляется возможным. Действительно, легко показать, что яркость $B(x,y)$ изображения вибрирующего вращающегося объекта на экране монитора цифрового голографического интерферометра будет зависеть как от амплитуды $A(x,y)$ вибрации так и величины $L(x,y)$ смещения точки (x,y) поверхности из-за вращения объекта:

$$B \approx \sqrt{I_o I_s} \left| \cos(\Delta\varphi) \cos(\bar{L}\bar{K} / 2) J_0(\bar{A}\bar{K}) \right|, \quad (1)$$

где K – вектор чувствительности интерферометра, $\Delta\varphi$ – разность фаз опорного и объектного пучков в рассматриваемой точке.

Ясно, что метод усреднения во времени является неподходящим для регистрации колебаний объектов в процессе вращения, так как за время T регистрации кадра изображения (40 мс) смещение $L=2\Omega RT$ точек поверхности, лежащих даже на малом расстоянии R от оси вращения будет слишком велико даже при низких частотах Ω вращения.

Голографическую регистрацию вращающихся объектов можно осуществить, если в качестве источника излучения в цифровом интерфе-

рометре использовать импульсный лазер с модулированной добротностью. Длительность импульсов таких лазеров не превышает десятков наносекунд [2]. Тем не менее, даже при использовании импульсного излучения необходимо минимизировать чувствительность голографического интерферометра к вращательному движению.

Анализ оптических схем показывает, что голографический интерферометр имеет минимальную чувствительность к вращательному движению, если ось вращения объекта совпадает с направлением вектора чувствительности K голографического интерферометра [3.4]. Зная предельные размеры объекта, можно оценить предельные скорости вращения, при которых возможно получение цифровой голограммы излучением лазера с определенной длительностью импульса в таком интерферометре. Известно, что цифровая интерференционная картина объекта, движущегося во время экспонирования, может быть получена в том случае, если за время экспонирования корреляция спеклов изображения объекта в плоскости регистрации голограммы, не нарушается [1]. Поскольку средний размер спеклов в плоскости регистрации приблизительно равен $1,22N\lambda$, где N - числовая апертура объектива телекамеры, λ - длина волны излучения лазера в интерферометре, можно получить условие для голографической регистрации вращающегося объекта:

$$2\Omega R \leq 1,22(N\lambda) \frac{\lambda}{mT}, \quad (2)$$

где m - увеличение объекта при регистрации.

Это выражение ограничивает размеры и скорости вращения объектов, получение цифровых голограмм которых возможно при определенной длительности T лазерных импульсов.

Основная задача, которую необходимо решить при исследовании колебаний вращающихся объектов, - устранение смещения поверхности объекта из-за вращения за время между двумя лазерными импульсами, формирующими интерферограмму. Действительно, так как длительность лазерных импульсов находится на уровне десятков наносекунд, то, используя оптическую схему малочувствительную к вращению, можно зарегистрировать голограмму вращающегося объекта. При исследовании колебаний вращающийся объект, чтобы сформировать интерферограмму, необходимо регистрировать двумя лазерными импульсами в разных фазах колебания. Время между регистрацией двух последовательных кадров изображений не может быть меньше времени формирования кадра изображения телевизионной камерой. Это приводит к появлению интерференционных полос, связанных с вращением, даже если интерферометр малочувствителен к вращению.

Для устранения интерференционных полос из-за вращения объекта за время между двумя лазерными импульсами в цифровой голографии можно также как и в классической голографической интерферометрии использовать деротацию изображения или синхронизацию запуска лазера с фазой вращения [5-7].

Деротатор изображения пропускающего или отражательного типа, представляет собой оптико-механическую систему, в основе которой, обычно, лежит оборачивающая призма. Деротатор размещается в предметной ветви интерферометра и вращается синхронно с объектом со скоростью равной половине скорости вращения объекта. Деротатор, если обеспечена его полная механическая стабильность и точная синхронизация скорости вращения с вращением объекта, позволяет получить в плоскости регистрации неподвижное изображение вращающегося объекта.

Обеспечение точной синхронизации скоростей вращения призмы и объекта, их строгой соосности, устранение биений при вращении и высокие требования к изготовлению оптических элементов деротатора являются технически сложной задачей.

Сущность метода синхронизации запуска лазера заключается в том, что лазер в интерферометре генерирует пару импульсов точно в моменты нахождения объекта в одной и той же фазе вращения. Привязка моментов генерации лазера к фазе вращения позволяет устранить смещение поверхности объекта, вызываемое его вращением. От точности привязки моментов генерации импульсов к выбранной фазе вращения зависит степень устранения этого смещения.

Метод синхронизации запуска лазера является более простым и надежным по сравнению с методом деротации изображения.

В основе разработанной системы исследований колебаний объектов в процессе вращения лежит цифровой спекл-интерферометр с лазером, генерация импульсов которого привязана к одной и той же фазе вращения объекта. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 1.

Излучение импульсного лазера 1 делится светоделителем 2 на два пучка: опорный и объектный. Объектный пучок расширяется с помощью линзы 3 и освещает вращающийся объект 11. Изображение объекта регистрируется цифровой телевизионной камерой 8, диафрагма объектива 9 которой устанавливается такой, чтобы спеклы на изображении разрешались телекамерой. Для уменьшения чувствительности к вращению оптическая ось объектива телекамеры интерферометра должна совпадать с осью вращения объекта, а угол между осью предметного пучка и осью вращения минимизирован.

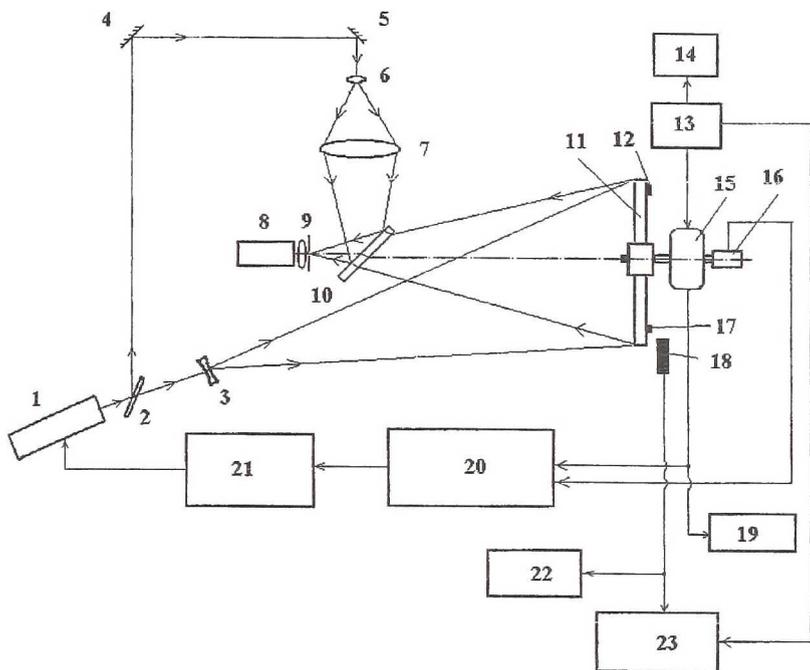


Рис.1. Схема цифрового спекл-интерферометра для исследования колебаний вращающегося объекта:

1 – лазер; 2, 10 – светоделитель; 3, 6, 7, – линза; 4, 5 – зеркало; 8 – цифровая телекамера; 9 – объектив телекамеры; 11 – вращающийся объект; 12 – пьезовозбудитель; 13 – звуковой генератор; 14, 19, 22 – частотомер; 15 – щеточный токосъемник; 16 – датчик оборотов; 17 – пьезодатчик; 18 – микрофон; 20 – блок синхронизации и управления; 21 – блок питания модулятора добротности лазера; 23 – осциллограф

Опорный пучок формируется с помощью зеркал 4 и 5 и линз 6 и 7. Светоделитель 10, установленный перед телекамерой направляет этот пучок в объектив телекамеры. Линзы 6 и 7 формируют опорный пучок таким, чтобы он фокусировался в плоскости диафрагмы объектива и полностью освещал светочувствительную поверхность телекамеры. В плоскости светочувствительной матрицы телекамеры опорный пучок интерферирует со спекл-изображением объекта. Результат интерференции с телекамеры вводится в персональный компьютер.

Возбуждение колебаний объекта осуществляется с помощью пьезовозбудителя 12, размещенного на поверхности объекта. Сигнал возбуждения колебаний на пьезовозбудитель поступает от звукового генератора 13 с помощью щеточного токосъемника 15, установленного на валу вращения объекта. Частота возбуждения колебаний регистрируется частотомером 14.

Для привязки моментов генерации лазерных импульсов к фазе вращения объекта используется прецизионный датчик 16 оборотов, который размещен на валу исследуемого объекта. Датчик вырабатывает синхромпульсы, которые поступают в блок 20 синхронизации и управления лазером. В этот же блок вводится сигнал от пьезодатчика 17, размещенного на поверхности объекта. Для передачи сигнала от этого датчика также используется щеточный токосъемник 15. Сигнал от пьезодатчика 17, позволяет следить за фазой колебаний объекта. Частотомер 19 регистрирует частоту колебаний объекта по этому датчику, вращающемуся совместно с объектом.

Блок 20 синхронизации и управления по сигналу датчика 16 оборотов вырабатывает импульс, управляющий блоком 21 питания активного модулятора добротности лазера 1. В момент подачи импульса от блока питания 21 модулятор добротности лазера открывается, и лазер генерирует импульс излучения.

Блок 20 синхронизации и управления выдает два последовательных импульса, запускающих с помощью активного модулятора добротности лазерную генерацию. Эти импульсы вырабатываются только в моменты времени, когда объект находится в одной и той же фазе вращения. Контроль за фазой вращения осуществляется с помощью сигналов от датчика оборотов. При этом первый импульс из блока синхронизации в блок питания модулятора лазера будет направлен, только если объект будет находиться в нулевой фазе колебаний, а второй импульс – в фазе максимального отклонения. Контроль за фазой колебаний осуществляется по сигналу от пьезодатчика 17, размещенного на поверхности вращающегося объекта.

Таким образом, лазер генерирует два импульса излучения в моменты, когда объект находится в одной и той же фазе вращения, но в двух различных фазах колебания.

Микрофон 18, размещенный вблизи вращающейся поверхности объекта, позволяет регистрировать частоту колебаний объекта относительно неподвижного наблюдателя. Осциллограф 23, на который поступают сигналы от генератора, возбуждающего колебания и микрофона, позволяет контролировать момент возникновения бегущих относительно наблюдателя волн колебаний.

Каждый из двух световых импульсов, генерируемых лазером, освещает вращающийся объект и формирует на светочувствительной матрице телекамеры интерференционную картину. Эти две интерференционные картины последовательно вводятся в персональный компьютер, запоминаются и по модулю вычитаются друг из друга. Результат вычитания выводится на монитор и представляет собой распределение яркости $B(x,y)$

привязанное через косинусоидальную функцию к распределению амплитуд $A(x, y)$ колебаний на поверхности исследуемого объекта:

$$B(x, y) \approx \left| \cos \left[\frac{2\pi A(x, y)}{\lambda} \right] \right|. \quad (3)$$

С помощью разработанной цифровой оптоэлектронной голографической системы исследовались колебания модели вентилятора диаметром 0.3 м, вращающейся с частотой 3000 мин^{-1} .

На рис.2 приведена одна из зарегистрированных интерферограмм. По интерферограмме можно легко установить, что на данной частоте 336 Гц возбуждается форма колебаний, соответствующая двум узловым диаметрам. По интерференционной картине можно рассчитать амплитуду колебаний в любой точке поверхности модели.



Рис. 2. Цифровая голограмма колебаний на резонансной частоте 336 Гц модели вентилятора, вращающейся с частотой 3000 1/мин

Таким образом, цифровой голографический интерферометр с лазером, генерация импульсов которого привязана к определенной фазе вращения объекта, позволяет регистрировать поля амплитуд колебаний поверхности объектов в процессе вращения.

Список литературы

1. Джоунс Р, Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986.
2. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973.

3. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977.
4. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. – М.: Наука, 1988.
5. Островский Ю.И., Морозов Н.В. Голографическая интерферометрия движущихся объектов//Голографическая и оптическая обработка информации. – Л.: ФТИ, 1980, с.124.
6. Хокли В., Форд Р., Фурд С. Измерение вибраций вентиляторов при помощи двухимпульсной голографии//Энергетические машины и установки, 1980, т. 100, №4. с. 192.
7. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Исследование особенностей колебаний вращающихся тел с конструктивно-поворотной симметрией//Известия Самарского научного Центра РАН, 1999, №2, с. 329-334.

ПРОГРАММНО-АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛАСТИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Дынников А.В., Лаврентьева С.В.
Самарский государственный технический университет, г. Самара

В настоящее время Российская промышленность располагает огромным парком технологических, энергетических и транспортных машин и установок, работающих в условиях высоких вибрационных нагрузок, трибовоздействий, сильных ионизирующих излучений и т.п., что приводит к преждевременному физическому старению, химической и структурной деградации и потере пластичности материалов. Растет также количество оборудования, выработавшего свой назначенный ресурс, эксплуатация которого без обоснования надежных критериев безопасности недопустима. Задача отслеживать выработанный и остаточный ресурс машин по их фактическому состоянию становится все более значимой и требует разработки и совершенствования неразрушающих, экспрессных методов исследования кинетики повреждаемости материалов. Кроме того, принятые в промышленности показатели состояния материалов твердость, ударная вязкость и др., как показала практика, плохо сочетаются с существующими методиками прогнозирования фактической прочности материалов и их остаточного ресурса.

Техническое решение этой проблемы намечается путем разработки программно-аппаратурного комплекса для оценки остаточного ресурса конструкций и оборудования при использовании разрабатываемого в СамГТУ нового способа оценки изменения пластичности конструкцион-