

УДК 621.45-226:534.63

Д.Г. ФЕДОРЧЕНКО, А.В. ГЛАДКОВ, В.А. СОЛЯННИКОВ, А.И. ЖУЖУКИН

ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены проблемы применения методов голографической интерферометрии при исследовании резонансных колебаний вращающихся объектов. Разработаны две голографические установки для исследования вибраций вращающихся объектов на основе метода синхронизации запуска генерации лазерных импульсов с фазой вращения объекта и приведены результаты их применения. Для голографической интерферометрии объектов, вращающихся с высокой скоростью, разработана установка с комбинированным способом управления добротности с использованием метода автоматической синхронизации. Приведены результаты применения этой установки.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, формы колебаний, импульсная голография, двухимпульсный лазер.

Введение

В настоящее время методы голографической и спекл-интерферометрии выполняют важную роль при исследовании вибраций в процессе поузловой доводки газотурбинных двигателей [1, 2]. Конструктивная динамика системы «диск – лопатки» во многом определяет прочностные свойства современных двигателей [3]. Вид возникающих при этом вибрационных характеристик имеет сложную структуру, что делает процесс исследования таких колебаний традиционными тензометрическими методами весьма затруднительным. В связи с этим представляется необходимым применение голографических методов для исследования конструктивных динамических характеристик колёс компрессора и турбины в процессе их вращения. Однако при применении методов голографической интерферометрии для исследования колебаний вращающихся объектов возникают проблемы, связанные с тем, что голографический интерферометр, если не принимать специальных мер, чувствителен не только к колебательному, но и к вращательному движению объекта. Это означает, что на систему интерференционных полос, вызванных вибрацией исследуемого объекта, может накладываться система интерференционных полос, вызванных вращением исследуемого объекта. Наиболее кардинальным способом решения этой задачи является применение в оптической схеме интерферометра деротатора изображения [4]. Деротатор размещается в предметной ветви голографического интерферометра и вращается синхронно с исследуемым объектом со скоростью равной половине скорости вращения объекта. В этом случае изображение

вращающегося объекта в плоскости регистрации голограммы становится неподвижным. Однако необходимость обеспечения точной синхронизации скоростей вращения деротатора и объекта, их строгой соосности, устранения влияния биений при вращении вызывают значительные технические трудности при применении этого метода на практике.

Результаты исследований

На ОАО «КУЗНЕЦОВ» для исследования вибраций вращающихся объектов разработан ряд голографических установок на основе метода синхронизации запуска генерации лазерных импульсов с фазой вращения объекта. Главная сущность этого метода заключается в том, что импульсный лазер генерирует пару импульсов точно в моменты нахождения объекта в одной и той же фазе вращения объекта. Привязка моментов генерации лазера к фазе вращения позволяет устранить смещение поверхности объекта, вызванное его вращением. Устранение этого смещения зависит от точности привязки моментов генерации импульсов к выбранной фазе вращения. Метод синхронизации запуска лазера – практически единственный, позволяющий регистрацию колебаний вращающихся объектов при наблюдении, отличном от осевого.

Существует два способа синхронизации моментов генерации лазерных импульсов с фазой вращательного движения исследуемого объекта: синхронизации запуска лазера с помощью электронных устройств, а также способ автоматической синхронизации с помощью призмы полного внутреннего отражения, выполняющей роль оптико-механического затвора лазерного резонатора.

Наиболее эффективно при исследовании колебаний вращающихся объектов с электронной системой синхронизации импульсов с фазой вращательного движения исследуемого объекта зарекомендовала установка (рис. 1), разработанная на ОАО «КУЗНЕЦОВ», которая впервые была описана в работе [5].

Луч вспомогательного лазера 1 направляется на находящееся на валу исследуемого объекта 2 зеркало 3, отразившись от которого попадает на фотодиод 4 и формирует электрический импульс. С помощью усилителя 8 этот сигнал усиливается и подается на компаратор 9, преобразующий его в импульс прямоугольной формы. Дифференцирующая цепь 10 выделяет передний фронт этого импульса, который при наличии условий, определяемых схемой 23 управления, посредством схемы 11 совпадения запускает одновибратор 12. Одновибратор 12 формирует импульс поджига, включающий накачку лазера 24. Через время, определяемое взаимным угловым расположением фотодиодов 4 и 5, фотодиод 5 освещается лучом вспомогательного лазера 1 и также формирует электрический импульс. Затем этот сигнал поступает в усилитель 13 и далее на компаратор 14, преобразующий его в прямоугольный импульс. Дифференцирующая цепь 15 выделяет передний фронт импульса. Схема 16 совпадения, управляемая одновибратором 17 строга, который запускается задним фронтом импульса одновибратора 12, формирует с

помощью одновибратора 18 импульс для схемы управления добротностью лазера 24.

Канал синхронизации из входного синусоидального сигнала от тензорезистора 6 посредством перестраиваемых компараторов 19 и 20 и регулируемых одновибраторов 21 и 22 формирует импульсы стробов, которые в соответствии с алгоритмом работы схемы 23 управления обеспечивают привязку импульсов поджига к последовательным, заранее установленным фазам колебания исследуемого объекта. Схема управления 23 для записи двухэкспозиционных голограмм обеспечивает формирование только двух пар импульсов накачки и управления добротностью, разнесенных на время, превышающее время зарядки конденсаторов блока запуска лазера 24, и привязанных, соответственно, к двум фазам колебания объекта.

Таким образом, в описываемой установке импульс с фотодиода, освещаемого первым, включает накачку рубинового лазера и приводит его в состояние готовности. Момент генерации лазера, а, следовательно, и экспозиции голограммы, устанавливается импульсом от второго фотодиода, который выдается в определенной фазе вращательного движения. В этом случае второй импульс генерируется только тогда, когда одновременно совпадут фаза вращения и фаза колебаний объекта между первым и вторым импульсом.

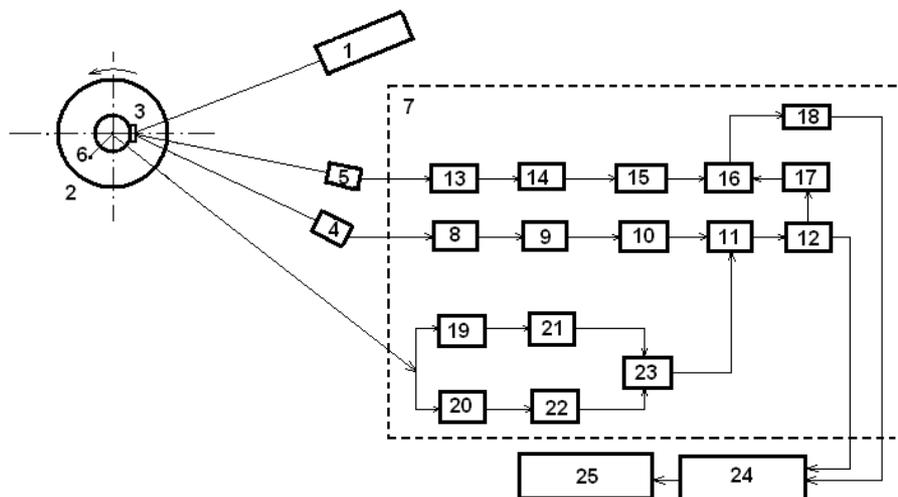


Рис. 1. Голографическая установка для измерения вибраций вращающихся объектов с привязкой к фазе колебаний вращающегося объекта:

- 1 – лазер непрерывного действия; 2 – исследуемый вращающийся объект; 3 – зеркало; 4,5 – фотодиоды;
- 6 – тензорезистор; 7 – блок запуска; 8 – предварительный усилитель канала поджига; 9 – компаратор канала поджига; 10 – дифференцирующая цепь канала поджига; 11 – схема совпадения; 12 – одновибратор;
- 13 – предварительный усилитель канала управления добротностью; 14 – компаратор канала управления добротностью; 15 – дифференцирующая цепь канала управления добротностью; 16 – схема совпадения;
- 17 – одновибратор строга; 18 – одновибратор; 19,20 – компараторы; 21,22 – одновибраторы;
- 23 – схема управления; 24 – рубиновый лазер с регулируемой добротностью;
- 25 – оптическая схема регистрации голограмм

С помощью установки, показанной на рис. 1, были исследованы колебания модельного стального диска диаметром 0,3 м и толщиной 3 мм. Диск устанавливался на валу электродвигателя с регулируемой частотой вращения. Возбуждение колебаний осуществлялось закрепленным на периферии диска пьезоэлементом. Сигнал отклика фиксировался двумя способами: с помощью тензодатчика, наклеенного на поверхность диска, и с помощью микрофона, установленного вблизи поверхности вращающегося диска. Сигнал с тензодатчика через щёточный токосъемник поступал на усилитель, затем фильтровался и регистрировался. Сигнал с микрофона усиливался, фильтровался и подавался на осциллограф, на который также подавался сигнал от звукового генератора, возбуждающего колебания. Исследования проводились при скорости вращения 546 об/мин (рис. 2).

Ввиду отдалённости исследуемого объекта от регистрирующей среды, важным условием в этом случае является необходимость покрытия поверхности исследуемого диска мелкими стеклянными шариками

(60 мкм), в противном случае интенсивность предметной волны будет недостаточной. Перед началом исследования форм колебаний производилось голографирование невозбужденного диска с целью экспериментального подтверждения отсутствия паразитных полос, вызванных вращательным движением диска.

Недостатком такого устройства является необходимость обеспечения надёжной виброизоляции всей установки, так как время между двумя экспозициями достаточно велико. В связи с этим была разработана установка для голографической интерферометрии вращающихся объектов через оборот [6].

Установка работает следующим образом: вращаясь вместе с объектом 2, зеркало 3 направляет луч непрерывного лазера 1 на фотодиоды 4 и 5. Фотодиод 4 в момент, соответствующий определенной фазе вращательного движения объекта, освещается лучом и формирует на выходе электрический импульс, который через блок 6 запускает лампы накачки блока питания 8 активных элементов. Фотодиод 5 в момент, соответствующий определенной фазе вращательного движения объекта, освещается лучом и формирует на выходе электрический импульс, который через блок 11 запускает электрооптический затвор 12. Электрооптический затвор 12 направляет луч лазера 1 на фотодиоды 9 и 10. Фотодиоды 9 и 10 формируют на выходе электрические импульсы, которые через блок 13 запускают лампы накачки блока питания 8 активных элементов. Блок 14 регистрирует голограммы.

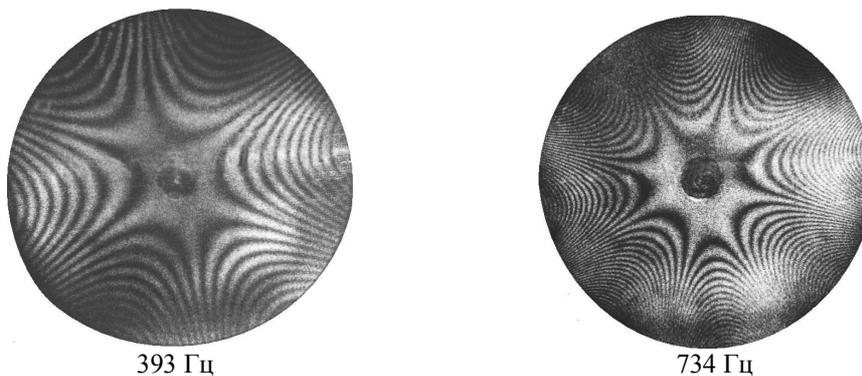


Рис. 2. Интерферограммы резонансных колебаний диска при скорости вращения 546 об/мин

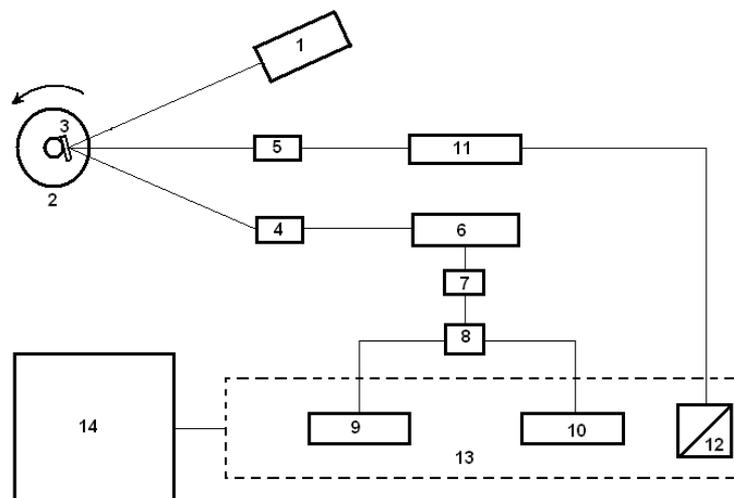


Рис. 3. Установка для голографической интерферометрии вращающихся объектов через оборот: 1 – лазер непрерывного действия; 2 – исследуемый вращающийся объект; 3 – зеркало; 4,5 – фотодиоды; 6 – канал запуска лазера; 7 – блок разделения сигналов во времени; 8 – блок питания лазера; 9,10 – активные элементы; 11 – канал запуска электрооптического затвора; 12 – электрооптический затвор; 13 – импульсный рубиновый лазер; 14 – оптическая схема регистрации голограмм

Блок разделения сигналов во времени первый раз запускает лампу накачки активного элемента 9, второй раз, когда вращающийся объект сделает один оборот или любое требуемое число оборотов, запускает лампу накачки активного элемента 10. Электрооптический затвор 12 открывается через канал 11 запуска оба раза от фотоприемника 5 в момент соответствующей фазы вращательного движения объекта.

Таким образом, в описываемой установке импульс с фотоприемника 4, освещаемого первым, включает сначала лампу накачки одного активного тела импульсного рубинового лазера, а через требуемое число оборотов объекта – лампу накачки другого активного тела, находящегося в этом же резонаторе. Момент генерации лазера 13 устанавливается каждый раз одним и тем же фотоприемником 5. Тем самым время между двумя экспозициями сокращается вплоть до одного оборота вращающегося исследуемого объекта. В связи с тем, что при использовании

этой установки момент экспозиции не привязан к фазе колебаний, при одной и той же амплитуде колебаний на объекте может быть различное число интерференционных полос (рис.4).

Недостатком этого устройства является высокая сложность юстировки, так как необходимо обеспечить, чтобы первый и второй импульсы проходили строго по одному пути в резонаторе лазера. Ввиду того, что при использовании электрооптического затвора существует нестабильность запуска импульса лазерной генерации, установки, приведённые на рис.1 и рис.3, могут быть эффективно использованы только на низких и средних оборотах, то есть не более 4000 об/мин.

Для реализации способа автоматической синхронизации с помощью призмы полного внутреннего отражения разработана установка для голографической интерферометрии вращающихся объектов с комбинированным способом управления добротности [7] (рис. 5).

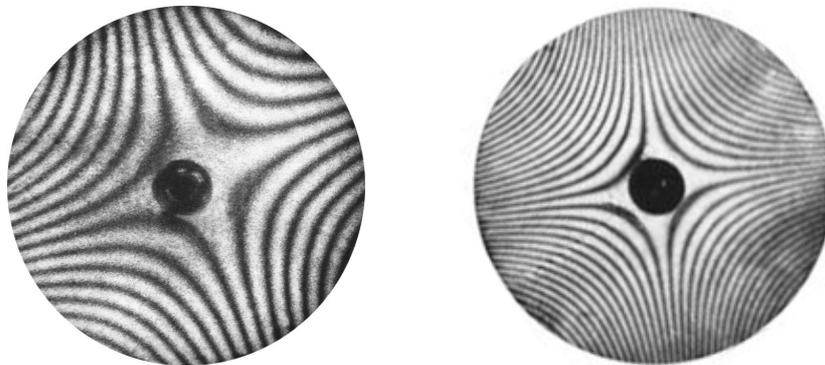


Рис. 4. Интерферограммы резонансных колебаний диска на частоте колебаний 161 Гц при скорости вращения 1500 об/мин, снятых через один оборот

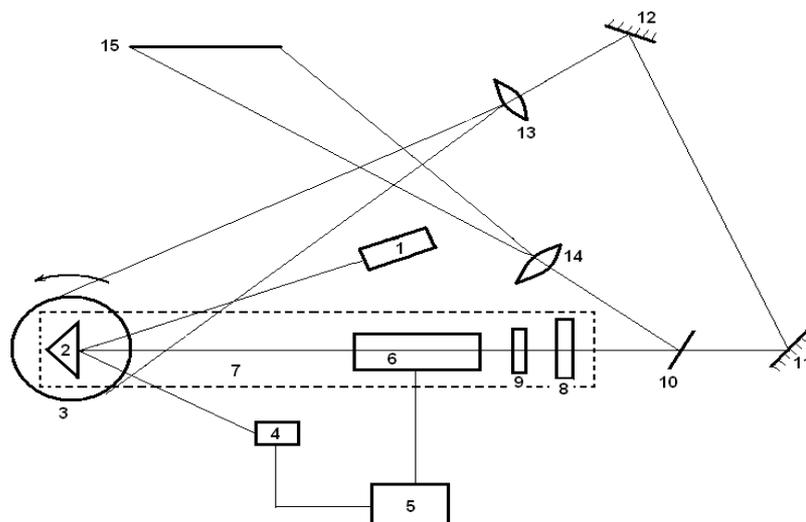


Рис. 5. Установка для голографической интерферометрии вращающихся объектов с автоматической синхронизацией с комбинированным способом управления добротностью: 1 – лазер непрерывного действия; 2 – призма полного внутреннего отражения; 3 – исследуемый вращающийся объект; 4 – фотоприемник; 5 – канал управления поджигом; 6 – активный элемент; 7 – импульсный рубиновый лазер; 8 – выходное зеркало; 9 – пассивный затвор; 10 – полупрозрачное зеркало; 11,12 – поворотные зеркала; 13,14 – расширительные линзы; 15 – регистрирующая среда

Установка работает следующим образом. Лазер непрерывного действия 1 освещает призму 2, жестко закрепленную на валу вращающегося исследуемого объекта 3. Отраженный луч попадает на фотоприемник 4, где формируется электрический импульс, который через канал 5 запускает лампы накачки активного тела 6 импульсного рубинового лазера 7. Вращаясь, призма 2 через некоторое время займет положение параллельное выходному зеркалу 8. Начинает формироваться импульс излучения, но генерация не наступает, пока не просветляется пассивный затвор. Только при достижении определенной плотности излучения, пассивный затвор просветляется и в импульсном рубиновом лазере 1 формируется короткий импульс излучения. Концентрация просветляющего раствора подбирается так, чтобы мог сформироваться одиночный импульс излучения. Сформированный импульс излучения с помощью полупрозрачного зеркала 10 делится на две части. Преломленная часть пучка с помощью поворотных зеркал 11, 12 и линзы 13 подается на освещение исследуемого объекта 3. Отраженная часть пучка расширяется с помощью линзы 14 и направляется на регистрирующую среду 15. В результате на регистрирующей среде 15 записывается голограмма вращающегося объекта 3 в некотором угловом положении объекта. Затем приводится в готовность активный элемент 6 и аналогично первому случаю генерируется второй импульс и на ту же фотопленку 15 записывается вторая голограмма, при этом вращающийся объект 3 находится в том же самом угловом положении, что и во время первой экспозиции. Таким образом, на регистрирующей среде 15 фиксируется интерферограмма вращающегося объекта 3. Совместное применение пассивного затвора и вращающейся призмы приводит к улучшению параметров излучения и увеличению скорости включения добротности.

В результате формируется импульс длительностью 15 – 25 нс синхронизированный с фазой вращательного движения исследуемого объекта. Результаты испытаний диска приведены на рис. 6.

Эффективность работы этой установки улучшается с увеличением скорости вращения исследуемого объекта.

Выводы

1. Разработана методика и создана установка для голографической интерферометрии вращающегося объекта с привязкой к его фазе колебаний на основе электрооптической модуляции добротности лазера.

2. Разработана методика и создана установка для голографической интерферометрии вращающегося объекта через один или любое требуемое число оборотов на основе электрооптической модуляции добротности лазера.

3. Разработана методика и создана установка для голографической интерферометрии вращающегося объекта с автоматической синхронизацией на основе комбинированной модуляции добротности лазера с использованием оптико-механического затвора.

4. Получены формы колебаний диска, вращающегося со скоростью от 546 до 6500 об/мин.

Литература

1. Макаева, Р.Х. Использование голографической интерферометрии для диагностики технического состояния деталей турбомашин [Текст] / Р.Х. Макаева // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 2. – С. 72 – 74.

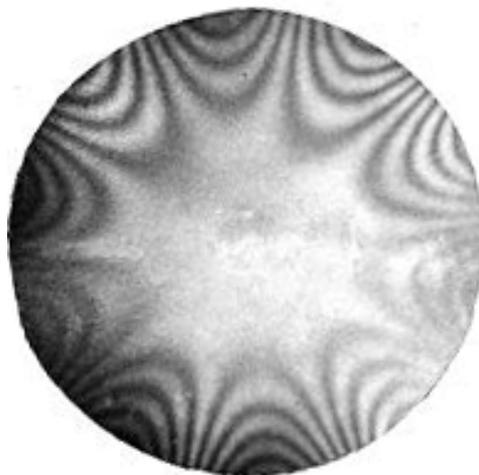


Рис. 6. Интерферограмма резонансных колебаний диска на частоте колебаний 1164 Гц при скорости вращения 6500 об/мин

2. Жужукин, А.И. Применение голографической и спекл – интерферометрии для исследования вибрационных характеристик деталей [Текст]/ А.И. Жужукин // *Материалы докладов международной научно – технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»*. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 148 – 149.

3. Иванов, В.П. Колебания рабочих колёс турбомашин [Текст] / В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.

4. Erf, R.K. *Dynamic Analysis of Rotating Structures with Holographic Interferometry* [Text] /R.K. Erf, K.A. Stetson // *Pub. AIAA*. – 1980. – V. 18. – P. 8-15.

5. Двухимпульсная голографическая установка для исследования колебаний вращающихся объектов [Текст] / Н.Д. Кузнецов, Д.С. Еленевский, А.И. Жу-

жукин и др.// *Авиационная промышленность*. – 1987. – № 7. – С. 17-18.

6. А.с. 1528085 СССР. МПК⁷ G01B21/00. Голографическое устройство для измерения вибраций вращающихся объектов [Текст] / А.И. Жужукин, А.Е. Петроченко, В.А. Шаронов. – № 4414250/28; заявл. 25.04.1988; опубл. 10.09.2005, Бюл. 25.

7. Пат. 71422 Российская Федерация. МПК⁷ G01B9/021, G03H1/04. Устройство для голографической интерферометрии вращающегося объекта [Текст] / Жужукин А.И.; Заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова" (RU). – № 2007134500/22; заявл. 14.09.2007; опубл. 10.03.2008, Бюл. №7.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры АСЭУ Н.Д. Быстров, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия.

ЗАСТОСУВАННЯ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ

Д.Г. Федорченко, О.В. Гладков, В.А. Соляніков, А.І. Жужукін

Розглянуто проблеми застосування методів голографічної інтерферометрії при дослідженні резонансних коливань об'єктів, що обертаються. Розроблено дві голографічні установки для дослідження вібрації об'єктів, що обертаються, на основі методу синхронізації запуску генерації лазерних імпульсів з фазою обертання об'єкта і приведено результати їх застосування. Для голографічної інтерферометрії об'єктів, що обертаються з високою швидкістю, розроблено установку з комбінованим способом управління добротністю з використанням методу автоматичної синхронізації. Наведено результати застосування цієї установки.

Ключові слова: голографічна інтерферометрія, форми коливань, імпульсна голографія, двохімпульсний лазер.

THE USE OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR ROTATING OBJECT VIBRATIONS STUDY

D.G. Fedorchenko, A.V. Gladkov, V.A. Solynnikov, A.I. Zhuzhukin

The article deals with the problems of holographic interferometry methods use for rotating objects resonant vibrations study. Two holographic sets were designed and developed on the base of method of laser pulses generation start and object rotation phase synchronizing for study of rotating objects vibrations. The results of the sets use are given in the article. Then there was designed and developed a set, with combined mode of quality control using automatic synchronization for holographic interferometry of objects with high speed rotating. The results of this set use are also given in the article.

Key words: holographic interferometry, vibration modes, pulsingholography, twopulse laser.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, Генеральный конструктор ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Российская Федерация, e-mail: gk_okb@kuznetsov-motors.ru.

Гладков Александр Владимирович – начальник научно-исследовательского лабораторного комплекса ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Российская Федерация, e-mail: cntkknio@yandex.ru

Соляніков Виктор Анатольевич – канд. техн. наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Российская Федерация, e-mail: cntkknio@yandex.ru

Жужукін Анатолій Іванович – канд. техн. наук, інженер – конструктор, ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Российская Федерация, e-mail: cntkknio@yandex.ru.