

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
ВИБРОМЕТРИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

**НА ОСНОВЕ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО
ЦИФРОВОГО
СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Под редакцией академика РАН В.П. Шорина

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА 2007

УДК 621.375
ББК 31.294

Рецензент: кандидат физ.- мат. наук,
доцент Самарского государственного университета М.Н. Осипов

Автоматизированная виброметрия механических конструкций на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра: Лабораторный практикум. Под ред. В.П. Шорина. Авторы – составители: Журавлев О.А., Ивченко А.В., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д.- Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2007. 124 с.

ISBN – 978-5-93424-293-1

Лабораторный практикум содержит методические разработки по оптике спеклов применительно к созданию нового поколения автоматизированных лазерных систем неразрушающего контроля в промышленности. Дано описание полученного алгоритма программного метода обработки серий спекл-интерферограмм колеблющихся объектов и, созданного на его основе, помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с непрерывным лазером. В представленных лабораторных работах с помощью помехоустойчивого ЦСИ дано решение целого ряда экспериментальных задач по бесконтактному контролю резонансных частот и форм колебаний деталей и узлов технических систем. Показана возможность введения разработанного лабораторного практикума в систему дистанционного образования.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» и 150802 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», а также инженерно-технических работников, занимающихся вопросами виброакустической диагностики механизмов и машин.

Книга может использоваться как пособие для лабораторных работ в ВУЗах технического профиля.

Лабораторный практикум подготовлен и издан при поддержке Губернского гранта в области науки и техники.

УДК 621.375
ББК 31.294

ISBN – 978-5-93424-293-1

© Самарский научный центр
Российской академии наук, 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Раздел 1. ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ЕЕ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ	
Теоретическое введение к лабораторным работам № 1-4.....	8
Формирование спекл-структур.....	8
Лазерная спекл-интерферометрия.....	12
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКЛ СТРУКТУРЫ ДИФФУЗНО РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ	19
Лабораторная работа № 2 ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЛОСКОСТИ ОБЪЕКТА	32
Лабораторная работа № 3 ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТОВ	40
Лабораторная работа № 4 БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ГТД	49
Раздел 2. ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ, ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ВИБРОМЕТРИИ КОНСТРУКЦИЙ	
Теоретическое введение к лабораторным работам № 5-12.....	58
Регистрация колебаний в цифровой спекл-интерферометрии.....	58
Цифровой спекл-интерферометр с управляемым фазовым сдвигом.....	59
Программный метод повышения помехоустойчивости ЦСИ.....	61
Регистрация колебаний с помощью программы «Форма колебаний».....	68
Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА С РЕГУЛИРУЕМЫМ СДВИГОМ ФАЗЫ	70
Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА	77
Лабораторная работа № 7 КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОГРАММ ВИБРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ	86
Лабораторная работа № 8 СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТА КОНТАКТНЫМ И БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДАМИ	94
Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТОВ,	

ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОДНОВРЕМЕННО НА ДВУХ ЧАСТОТАХ.....	100
Лабораторная работа №10 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА ЧАСТОТУ И ФОРМУ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВОГО ТИПА.....	106
Лабораторная работа №11 АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКЛОГРАММЫ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ INTERFEROAVI.EXE.....	114
Лабораторная работа №12 ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕННЫХ ВИДЕОФРАГМЕНТОВ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ПРЕДИСЛОВИЕ

При вибрационных исследованиях конструкций широкое распространение получили интерференционно-оптические методы, основанные на использовании информации, содержащейся в фазе световой волны, отраженной от поверхности колеблющегося объекта [1]. Наиболее информативными являются панорамные (или интегральные) методы, обеспечивающие получение распределения амплитуд и форм колебаний по всей исследуемой поверхности.

К основным методам панорамной вибродиагностики машин относятся методы, базирующиеся на принципах голографической интерферометрии [2,3]. Такими методами являются: метод усреднения во времени, метод «живых» полос, стробоголографический метод и метод двух экспозиций. Общим достоинством данных методов являются бесконтактность, высокая чувствительность, отсутствие требований к качеству анализируемой поверхности. Однако, такие недостатки как необходимость виброизоляции от внешних случайных воздействий, а также трудоемкость обработки голографических фотопластинок и проблемы автоматизации эксперимента привели к тому, что методы голографической виброметрии не получили широкого применения в производственных условиях.

В настоящее время принципы голографической интерферометрии легли в основу нового направления бесконтактной вибродиагностики, получившей название спекл-интерферометрии [4,5]. Методы спекл-интерферометрии имеют ряд преимуществ по сравнению с методами классической и голографической интерферометрии. Прежде всего, с точки зрения практики, существенно то, что эти методы не требуют специальных мер по подготовке оптического качества отражающей поверхности образцов, как классическая интерферометрия, а также не нуждаются в высокой разрешающей способности фоторегистрирующих материалов, как голографическая интерферометрия.

Развитые в последние годы методы цифровой спекл-интерферометрии позволяют получать и наблюдать распределения собственных форм и амплитуд колебаний поверхности в реальном времени непосредственно на экране монитора компьютера, минуя какой-либо промежуточный фоторегистрирующий носитель.

В результате проведенных исследований на кафедре «Автоматические системы энергетических установок» и Институте акустики

машин при СГАУ был разработан программный метод статистической обработки спеклограмм колеблющихся объектов, обеспечивающий повышение стабильности оптико-электронной схемы интерферометра с непрерывным лазером к случайным динамическим нагрузкам. Это впервые позволило создать помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр (ЦСИ) с лазером непрерывного излучения для бесконтактного автоматизированного определения собственных частот, форм и амплитуд колебаний деталей и узлов механизмов и машин. Испытания подтвердили высокие метрологические характеристики интерферометра, возможность применения его для исследования вибрационных характеристик сложных колебательных систем, для которых пока затруднена разработка численных моделей. К таким задачам относится, например, исследование процессов пульсационно-вибрационного возбуждения нелинейных колебаний в пневмогидравлических и топливных системах энергоустановок [6].

Перспектива применения ЦСИ как современных средств виброакустической доводки конструкции, а также неразрушающего контроля в промышленности требует коррекции учебных программ подготовки научных, преподавательских и инженерных кадров. Этому должно способствовать, изданное под редакцией академика РАН В.П. Шорина, учебное пособие [7], где систематизированы результаты исследований по разработке и созданию помехоустойчивого ЦСИ, полученные в СГАУ. Однако данные результаты изложены далеко не в полном объеме. В тоже время целый ряд решенных с помощью помехоустойчивого ЦСИ экспериментальных задач по виброметрии объектов имеют большую научно-практическую и учебно-методическую ценность. Поэтому логическим продолжением пособия [7] является издание данного лабораторного практикума.

Практикум содержит 2 тематических раздела, опирающихся на решение конкретных экспериментальных задач, которые составляют практическую часть 12 лабораторных работ.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» и 150802 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», а также инженерно-технических работников, занимающихся вопросами виброакустической диагностики механизмов и машин.

Практикум предоставляет возможность студентам других специальностей выполнять лабораторные работы на помехоустойчивом

ЦСИ. Планируется организация удаленного доступа к ЦСИ по сети Интернет.

Авторы приносят благодарность доктору физ-мат. наук В.П. Рябухе за любезно предоставленную возможность использования в лабораторном практикуме его учебно-методических разработок по физическим основам спекл-интерферометрии [8].

Особую благодарность авторы выражают почетному Авиастроителю, дважды лауреату премии Правительства, директору Самарского научно инженерного центра АПИДМ, д.т.н. Д.С. Еленевскому за поддержку и внимание к работе.

РАЗДЕЛ 1

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ЕЕ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ
к лабораторным работам №1-4

Формирование спекл-структур

Носителем измерительной информации о параметрах рассеивающего объекта, о его положении и характере движения выступают спекл-модулированные световые поля. По отношению к таким полям используется термин «спекл-поля», а по отношению к пространственному распределению их интенсивностей используется термин «спекл-структура» или «спекл-картина».

Систематическое изложение вопросов формирования и применения спеклов содержится во всех фундаментальных работах рассматривающая данную область науки [2,4,5,9]. Наиболее доступно данные вопросы освещены в [8].

При когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких, например, как шероховатая поверхность или прозрачная среда с флуктуирующим в пространстве показателем преломления, в рассеянном поле формируется спекл-структура, увеличенный фрагмент которой представлен на рис. 1.1.

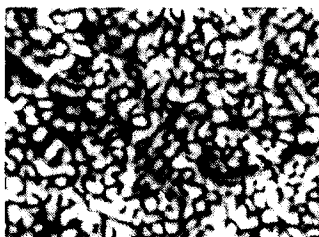


Рис.1.1. Спекл-картина в поле дифракции лазерного пучка на шероховатой поверхности

Спекл-структура наблюдается не только в лазерном излучении, но ее активное изучение и практическое применение стимулировано в основном использованием лазеров.

Рассмотрим условия формирования и некоторые оптические схемы наблюдения спекл-картин, представляющих собой результат интерференции волн от отдельных неоднородностей поверхности

объекта. В схеме на рис.1,2а эти волны взаимно когерентны, если радиус пространственной когерентности r_n на поверхности объекта превышает диаметр освещенной области D ($r_n > D$). Это достигается уменьшением углового размера освещающего источника θ , поскольку $r_n \approx \lambda / \theta$, где λ – длина волны света. Более того, разность оптических путей любой пары элементарных волн δ , приходящих в точку наблюдения P , должна быть меньше длины временной когерентности излучения $l_v \approx \lambda^2 / \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии излучения.

При выполнении вышеперечисленных условий элементарные волны, рассеянные неоднородностями, интерферируют в пространстве и результирующая комплексная амплитуда поля в произвольной точке P определяется с учетом вклада фазовых сдвигов $\Delta\phi_j$ и амплитуд e_j каждой элементарной волны:

$$E(P) = |E(P)| \exp(-i\Delta\phi_i) = \sum_{j=1}^N e_j \exp(-i\Delta\phi_j), \quad (1.1)$$

где N – полное число этих волн. Поскольку e_j и, главное, $\Delta\phi_j$ – случайные величины из-за случайности расположения неоднородностей на поверхности и значений высот или показателя преломления этих неоднородностей, то результирующая амплитуда $E(P)$, фаза $\phi(P)$ и интенсивность $I(P) \approx |E(P)|^2$ поля будут случайными функциями. Контрастные, ярко выраженные спекл-структуры наблюдаются, когда фазовые сдвиги $\Delta\phi_j$ лежат в интервале 0-2 π радиан. Для этого достаточно, например, чтобы высоты неоднородностей поверхности Δh_j были бы сравнимы с λ , поскольку $\Delta\phi_j \approx (2\pi/\lambda)2\Delta h_j$.

Для наших целей важной статистической характеристикой спеклов является их размер. Получим соотношения для размером спеклов.

Пусть размер освещенной области объекта D , а z – расстояние от объекта до плоскости наблюдения. Всю поверхность объекта можно разбить на пары (j, k) неоднородностей. Интерференция волн от этих пар неоднородностей, как в схеме Юнга, приводит к образованию параллельных полос с периодом $\Lambda_{jk} = \lambda z / l_{jk}$, где l_{jk} – расстояние между неоднородностями. Когерентные наложения таких

полос различного периода Λ_{jk} и различной ориентации от всех пар неоднородностей приводят к образованию спекл-картины. Две любые точки, разделенные расстоянием l_{jk} , дают интерференционные полосы с частотой $f=l_{jk}/\lambda z$. Наиболее тонкие полосы, т.е. полосы с наибольшей пространственной частотой f_{\max} будут соответствовать неоднородностям на краях освещенной области с расстоянием $l=D$ между ними. Они имеют наименьший период $\Lambda_{\min} = \lambda \cdot z / D$.

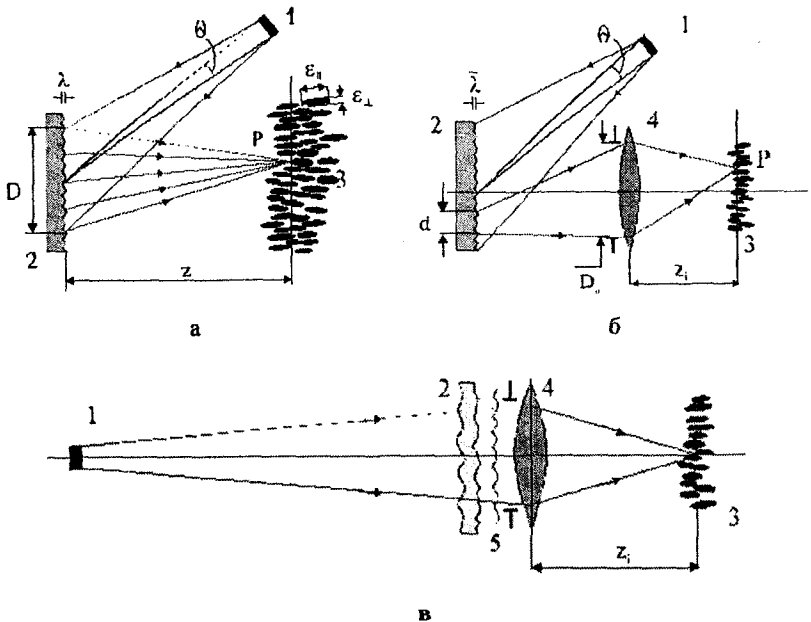


Рис.1.2. Оптические схемы наблюдения объективной (а) и субъективных (б,в) спекл-картин: 1 - источник света; 2 - случайно-неоднородный объект или среда; 3 - схематичный вид продольного сечения слоя спекл-структуры; 4 - изображающая оптическая система; 5- хаотически искаженный волновой фронт

Различные интерференционные полосы будут иметь случайные по отношению друг к другу фазы, поэтому при формировании усредненной по ансамблю освещенности вклад от интерференционных картин с разной частотой полос пропорционален соответствующему числу пар рассеивающих точек. Поскольку средняя частота полос равна $\frac{1}{3} f_{\max} = \frac{1}{3} \frac{D}{\lambda \cdot z}$, то, принимая за ширину спекла рас-

стояние между точками, где их интенсивность падает до половины своего максимального значения, получим, что средние размеры спеклов $\epsilon_{\perp} \approx 1,5\lambda \cdot z / D$ [2].

Продольный размер спеклов оценивается соотношением $\epsilon_{\parallel} \approx 8\lambda z^2 / D^2$. Эта величина совпадает с расстоянием между соседними минимумами в продольном сечении картины дифракции Френеля на круглом отверстии диаметром D .

Приведенные выражения для ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} показывают, что спеклы, как сгустки световой энергии, имеют вытянутую форму (рис. 1.2) вдоль направления распространения света от рассеивающего объекта.

В схеме на рис. 1.2,а спекл-структура формируется в свободном пространстве и называется объективной спекл-картиной. Такие картины легко наблюдать с использованием лазерного излучения. Субъективные спекл-картины наблюдаются в изображающих оптических системах (рис. 1.2,б), в которых условия когерентного освещения объекта существенно менее требовательные. Поэтому субъективные спеклы можно наблюдать невооруженным глазом даже в полихроматическом свете протяженных источников. Для когерентного освещения в изображающей оптической системе необходимо, чтобы оптическая система разрешала область пространственной когерентности на поверхности объекта, $d < r_{\parallel}$, где d — диаметр кружка разрешения, значение которого в дифракционно ограниченной (безабберационной) оптической системе определяется выражением $d = 1,22\lambda z_0 / D_a$, где z_0 — расстояние от объекта до входного зрачка (апертуры) оптической системы, D_a — диаметр зрачка.

Если при этом оптическая система не разрешает отдельные неоднородности объекта, $d > r_a$, где r_a — поперечный размер неоднородностей, то в каждой точке изображения собираются взаимно когерентные волны от различных неоднородностей, находящихся в пределах области разрешения. Эти волны имеют случайные фазовые сдвиги $\Delta\phi_j$, и их интерференция приводит к образованию спекл-структуры.

С методической точки зрения интересна схема на рис. 1.2,в, где свет проходит через рассеивающую среду, а спеклы наблюдается в плоскости изображения освещающего источника. Контрастная спекл-картина формируется в том случае, если радиус когерентности r_{\parallel} освещающего излучения на рассеивающей среде превышает

диаметр апертуры оптической системы, $r_a > D_a$.

В качестве источника субъективных спеклов выступает апертура (вернее, выходной зрачок) оптической системы, заполненный светом от объекта. Следовательно для оценки размеров этих спеклов могут быть использованы те же выражения, что и для объективных: $\varepsilon_{\perp} \approx 1,5\lambda \cdot z_i / D_a$, $\varepsilon_{\parallel} \approx 8\lambda z_i^2 / D_a^2$, где z_i – расстояние от апертуры (зрачка) до плоскости формирования спекл-картины.

Более строгий анализ ведет почти к таким же значениям. Например, для поперечных размеров спекла получим: $\varepsilon_{\perp} = 1,22\lambda \cdot N_a$, где N_a – относительное отверстие (отношение фокусного расстояния к апертуре) фотообъектива, формирующего изображение.

Например, спеклы, наблюдаемые с помощью объектива фотоаппарата (фокусное расстояние 50 мм, диафрагма $D_a = 15$ мм) при использовании He-Ne лазера, имеют размеры $\varepsilon_{\perp} \approx 2,5$ мкм. Спеклы на сетчатке глаза ($D_a = 4$ мм, $z_i = 24$ мм) имеют размер $\varepsilon_{\perp} \approx 4,6$ мкм, что превосходит разрешающую способность сетчатки. В отраженном поле объективные спеклы можно наблюдать невооруженным глазом, если осветить поверхность сфокусированным лазерным пучком.

Лазерная спекл-интерферометрия

Лазерные методы спекл-интерферометрии можно разделить на две группы: спекл-фотографию и корреляционную спекл-интерферометрию. В обоих методах тем или иным способом реализуется интерференционное сравнение оптических образов двух состояний объекта – начального и измененного (смещенного или деформированного). Получаемая интерференционная картина служит сигналом измерительной информации.

Остановимся на рассмотрении метода двухэкспозиционной спекл-фотографии. Спекл-структура несет информацию о поверхности объекта, в частности, о ее форме и пространственном положении. Это свойство эффективно используют для изучения малых (микроскопических) смещений поверхности объекта. Смещение или деформация поверхности объекта влечет за собой соответствующее пространственное перемещение объективной и субъективной спекл-структур, измерение которого позволяет определить смещение самой поверхности. Для этого используют двухэкспозиционную регистрацию спекл-структур, соответствующих начальному и изменен-

ному состояниям объекта, с последующим наблюдением картины интерференционных полос в поле дифракции лазерного пучка на записанных спекл-структурах.

Для записи спекл-картины применяют обычную оптическую схему (рис. 1.3), в которой регистрирующую среду (например, фотопластинку) помещают или в плоскости изображения объекта, или в расфокусированной области, включая заднюю фокальную плоскость, в которой формируется фурье-образ объекта. В первом случае регистрируются поперечные оптической оси смещения объекта, а во втором – изгибные деформации поверхности или ее наклон. Регистрирующая среда должна разрешать записываемую спекл-структуру, наименьшие элементы которой имеют микронные значения при достаточно большом относительном отверстии изображающей оптической системы. Обычно требуется фотопластинка с разрешением не менее 10^3 лин/мм. Такие фотопластинки применяются в голографии.

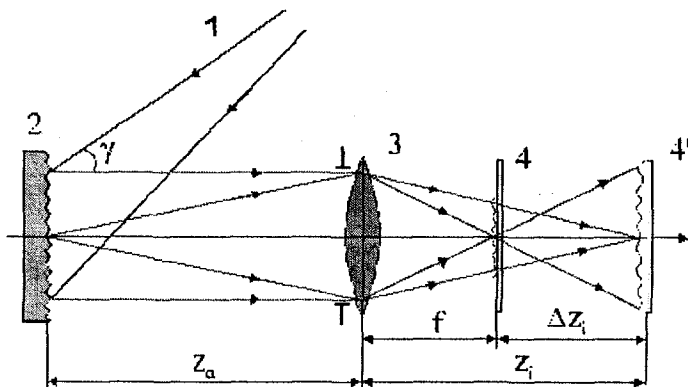


Рис. 1.3. Оптическая схема записи двухэкспозиционной спекл-фотографии: 1 - освещающий лазерный пучок; 2 - объект с шероховатой поверхностью; 3 - линза; 4 и 4' - фотопластинки в различных плоскостях пространства изображений

На фотопластинке в результате двухэкспозиционной записи и последующей фотохимической обработки оказываются зарегистрированными две идентичные взаимно смещенные спекл-картины. Фотопластинку, которую теперь можно назвать спеклограммой, освещают лазерным пучком, который испытывает дифракцию на двойной тонкой спекл-структуре изображения объекта (рис. 1.4). В

дифракционном поле формируется система параллельных интерференционных полос, перпендикулярных вектору \bar{g}_S смещения спеклов в плоскости объекта, с периодом $\Lambda = \lambda z / |\bar{g}_S|$, где z – расстояние до экрана, на котором наблюдаются полосы.

Происхождение полос можно объяснить, используя аналогию с классическим опытом Юнга. Пара идентичных, взаимно смещенных спеклов на двухэкспозиционной спеклограмме эквивалентна двум отверстиям в схеме Юнга. Интерференция элементарных волн от таких пар отверстий в пределах освещающего лазерного пучка, одинаково ориентированных и с равными расстояниями между ними, приводит к формированию в дальней области дифракции одинаковых интерференционных картин, наложение которых дает результирующую картину полос (рис. 1.4).

Применение методов спекл-фотографии для исследования колебаний диффузной поверхности рассмотрено в [4, 7].

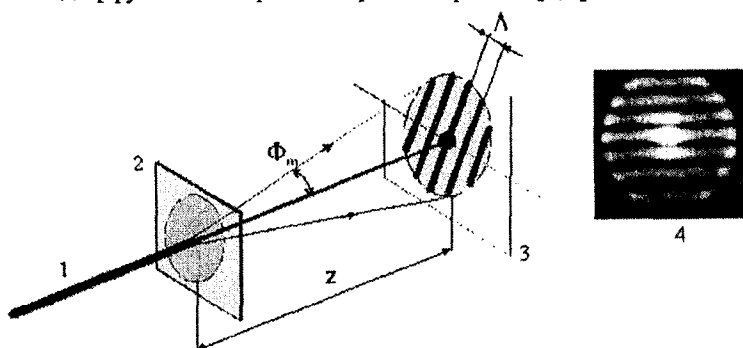


Рис. 1.4. Оптическая схема наблюдения картины интерференционных полос в дальней области дифракции: 1 - освещающий лазерный пучок; 2 - двухэкспозиционная спеклограмма; 3 - картина интерференционных полос Юнга на экране в дальней области дифракции; 4 - фотография интерференционных полос Юнга; Φ_m – максимальный угол дифракции

Для панорамной виброметрии объектов наибольший интерес представляют методы корреляционной спекл-интерферометрии. Любая интерференционная картина представляет собой полосы корреляции интерферирующих полей. В корреляционной спекл-интерферометрии наблюдают полосы корреляции не полей (не комплексных амплитуд), а пространственных распределений интенсивностей, получаемых при интерференции спекл-модулированных волн. В этом отношении корреляционную спекл-интерферометрию

можно рассматривать в качестве пространственного аналога классической интерферометрии интенсивностей.

Оптические схемы корреляционных спекл-интерферометров отличаются большим разнообразием [4]. Однако общим для них служит первоначальная процедура записи картины интерференции предметной спекл-модулированной волны с опорной сферической волной или двух спекл-модулированных волн. Рассмотрим основные схемы корреляционной спекл-интерферометрии, предназначенные для измерения нормальных (рис. 1.5, а) и тангенциальных (рис. 1.5, б) смещений точек поверхности объекта.

В первой схеме когерентная опорная волна 4 направляется в плоскость спекл-модулированного изображения 6 исследуемого объекта 2 с помощью полупрозрачного зеркала 5. Во второй схеме в плоскости изображения 6 интерферируют спекл-модулированные волны, образующиеся при освещении объекта 2 двумя когерентными лазерными пучками 1 и 1'. Отвлекаясь от различий этих схем, для распределений интенсивностей в плоскостях регистрации, можно записать общее уравнение интерференции:

$$I_1(\vec{r}) = I_a(\vec{r}) + I_b(\vec{r}) + 2\sqrt{I_a(\vec{r})I_b(\vec{r})}\cos\Delta\varphi(\vec{r}), \quad (1.2)$$

где $I_a(\vec{r})$, $I_b(\vec{r})$ и $\Delta\varphi(\vec{r})$ - соответственно, пространственные распределения интенсивностей и разности фаз интерферирующих волн; \vec{r} - радиус-вектор, соединяющий рассматриваемую точку с началом системы координат. Поскольку в спекл-модулированной волне интенсивность и фаза — случайные пространственные функции, то результирующее распределение интенсивности $I_1(\vec{r})$ в интерференционной картине также будет случайной функцией. Вид этой новой спекл-картины зависит не только от пространственных распределений $I_a(\vec{r})$ и $I_b(\vec{r})$, но и от случайной разности фаз $\Delta\varphi(\vec{r})$ интерферирующих волн.

Малое неоднородное смещение поверхности $\bar{g}_0(r_0)$ приведет к появлению дополнительного детерминированного фазового сдвига $\Delta\Psi(\vec{r}_0)$ в плоскости объекта и соответствующей дополнительной разности фаз $\Delta\Psi(\vec{r})$ между волнами в плоскости изображения. Распределение интенсивности в плоскости изображения объекта изменится, и для него следует записать уравнение

$$I_2(\vec{r}) = I_a(\vec{r}) + I_b(\vec{r}) + 2\sqrt{I_a(\vec{r})I_b(\vec{r})}\cos[\Delta\varphi(\vec{r}) + \Delta\Psi(\vec{r})] \quad (1.3)$$

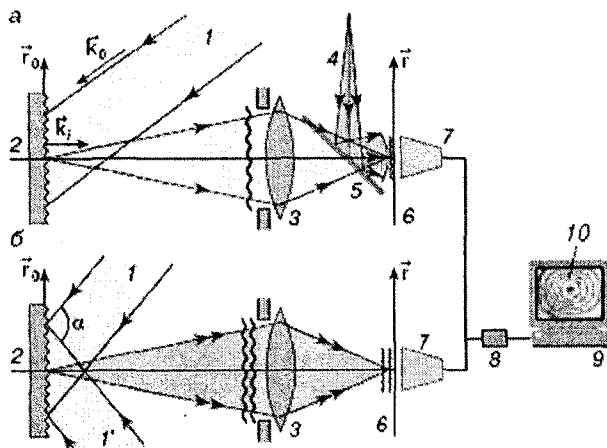


Рис. 1.5. Схемы корреляционных спекл-интерферометров для измерения нормальных (а) и тангенциальных (б) смещений точек шероховатой поверхности объекта. 1 и 1' - освещающие лазерные пучки, 2 - объект, 3 - линза, 4 - опорный пучок, 5 - полупрозрачное зеркало, 6 - плоскость регистрации, 7 - видеокамера, 8 - плата ввода изображений, 9 - компьютер, 10 - образец картины полос корреляции деформации изгиба на экране монитора

Смещение самих спекл-структур $I_a(\vec{r})$ и $I_b(\vec{r})$ в этом случае мало и им можно пренебречь. В силу периодичности функции $\cos(x)$ спекл-картины $I_1(\vec{r})$ и $I_2(\vec{r})$ будут идентичными [$I_1(\vec{r}) = I_2(\vec{r})$] там, где разность фаз $\Delta\Psi(\vec{r}) = 2\pi m$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. С формальной точки зрения в этих областях корреляция между спекл-картинами максимальна. При $\Delta\Psi(\vec{r}) = (2m + 1)\pi$, корреляция, то есть похожесть, спекл-картин $I_1(\vec{r})$ и $I_2(\vec{r})$ полностью нарушается. Для промежуточных значений $\Delta\Psi(\vec{r})$ имеет место частичная корреляция спекл-картин.

При смещении или деформации объекта разность фаз $\Delta\Psi(\vec{r})$ — непрерывная и детерминированная функция. Следовательно, системы уравнений $\Delta\Psi(\vec{r}) = 2\pi m$ и $\Delta\Psi(\vec{r}) = (2m + 1)\pi$ определяют положение полос, соответственно, корреляции и декорреляции изображений $I_1(\vec{r})$ и $I_2(\vec{r})$. При визуальном наблюдении выявить эти полосы невозможно в силу сложности структуры спекл-картин и ма-

лости размеров спеклов.

Наиболее совершенные методы наблюдения полос корреляции – электронные и цифровые, основанные на процедуре вычитания видеокадров изображений спекл-картин электронными средствами или с использованием компьютеров. В электронной спекл-интерферометрии с помощью высокоразрешающей видеокамеры получают видеосигнал, соответствующий спекл-структуре $I_1(\vec{r})$ изображения несмещенного объекта. Этот сигнал запоминается в специальном устройстве. Затем объект смещается, и сигнал от измененной спекл-структуры $I_2(\vec{r})$ в специальном процессоре вычитается из первоначального сигнала. Разностный сигнал на выходе процессора подвергается специальной обработке и поступает на монитор, на экране которого визуализируется картина полос корреляции в виде распределения яркости. Области с идентичными спекл-структурами $I_1(\vec{r})$ и $I_2(\vec{r})$ из-за вычитания соответствующих им идентичных видеосигналов выглядят темными. И наоборот, области декорреляции спекл-структур – светлыми.

Численную процедуру вычитания видеосигналов выполняют, используя современные камеры с ПЗС-структурой, устройства ввода изображений в компьютер и специальные программы обработки изображений. Картина полос корреляции визуализируется на экране монитора компьютера. Цифровая спекл-интерферометрия позволяет с помощью численной процедуры обработки картины полос корреляции получить количественную информацию о пространственном распределении смещений точек поверхности в наглядной графической форме.

Положение, форма и период полос корреляции определяются разностью фаз $\Delta\Psi(\vec{r})$. Зависимость $\Delta\Psi(\vec{r})$ от смещения поверхности $\vec{g}_0(r_0)$ определяется типом корреляционного спекл-интерферометра. В схеме на рис.1.5,а фазовый сдвиг $\Delta\Psi(\vec{r}_0) = 2\pi\vec{g}_0(r_0)[\vec{k}_i - \vec{k}_0]/\lambda$, где \vec{k}_i и \vec{k}_0 – единичные векторы направлений освещения объекта и регистрации изображения – оптической оси линзы. Если объект освещать по нормали к поверхности, то $\Delta\Psi(\vec{r}_0) = 4\pi\vec{g}_z(r_0)/\lambda$, где $\vec{g}_z(r_0)$ – нормальная составляющая смещения, и схема оказывается не чувствительной к тангенциальным составляющим $\vec{g}_0(r_0)$.

Во второй схеме (рис.1.5б) $\Delta\Psi(\vec{r}_0) = 4\pi\vec{g}_x(r_0)\sin(\alpha/2)/\lambda$, где α – угол между освещающими пучками, $\vec{g}_x(r_0)$ – тангенциальная со-

ставляющая вектора $\bar{g}_0(r_0)$, лежащая в плоскости освещающих объект лазерных пучков.

Приведенные соотношения для $\Delta\psi(\bar{r})$ показывают, что корреляционные спекл-интерферометры обладают такой же высокой чувствительностью, как и голографические интерферометры. В качестве примера на рис. 1.5 приведена спекл-интерферограмма, полученная по схеме рис. 1.5,а. Концентрические полосы корреляции отражают прогиб мембраны, закрепленной по периметру, под действием центральной силы. Нормальное смещение поверхности мембраны в центре равно $\sim 1,8$ мкм. По картине полос можно восстановить профиль прогиба мембраны с точностью до 0,1 полосы, что соответствует $\sim \lambda/20 \approx 0,03$ мкм.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ ДИФфуЗНО РАССЕЙВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы. Экспериментальное изучение особенностей формирования объективных и субъективных спекл-структур.

Оборудование: оптический стол, He-Ne лазер, микрообъектив, точечная диафрагма, ирисовая диафрагма, пластина, экранирующая шторка, цифровая телекамера, персональная ЭВМ, модуль ввода изображений.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При освещении диффузного объекта, в тонком слое его поверхности, так называемом скин-слое (от английского слова "skin" – *кожа*), свободные и слабо связанные электроны его материала, под действием электрического поля световой волны приходят в колебательное движение, и сами становятся, в соответствии с законами электродинамики, источниками слабо направленного излучения (это излучение иногда называется вторичным). Диаграмма направленности такого излучателя в общем случае представляет собой множество "лепестков" (отдельных тонких остронаправленных пучков), вписанных в некоторую гладкую поверхность, так называемую индикатрису рассеяния.

Вся совокупность коллективно колеблющихся электронов, находящихся в скин-слое освещенного участка оптически шероховатой поверхности объекта, фактически представляет собой сложный поверхностный излучатель.

В иерархии формообразующих элементов физической поверхности реального объекта можно выделить, по крайней мере, три уровня.

Во-первых, это форма объекта в макроскопическом, быденном смысле этого слова. Если, например, под объектом понимать деталь, то её форма определяется номинальными размерами D на рабочем чертеже, по которому она изготовлена ($\lambda \ll D$).

Во-вторых, микрорельеф, обусловленный механической обра-

боткой, химическим травлением или нанесением шероховатых покрытий ($\lambda \leq \Delta D$).

И, наконец, в-третьих, – субмикронные и даже молекулярные шероховатости, обусловленные, например, окислением поверхности, конденсацией паров жидкости или адсорбцией газов ($\lambda > \Delta D$). Такие мелкие подробности, размеры которых меньше длины волны используемого света, хотя и участвуют в процессе формирования рассеянного назад излучения, недоступны детальному исследованию оптическими методами.

Из-за волнового характера протекающих процессов фронт волны рассеянного назад излучения вблизи объекта лишь в общих чертах повторяет микрогеометрию его поверхности и не может иметь участков, размеры которых меньше длины волны, т.е. представляет собой относительно гладкую, волнистую поверхность, состоящую из выпуклых и вогнутых фрагментов.

На рис.1.6 показана физическая поверхность 1 объекта с микрорельефом. На некотором расстоянии от поверхности объекта, освещенного когерентным (лазерным) светом, формируется рассеянное назад излучение, на волновом фронте 2 которого имеются выпуклости и впадины, по размерам превосходящие субмикронные детали микрорельефа.

Эти криволинейные участки волнового фронта можно рассматривать как выпуклые и вогнутые зеркала с мнимыми 3 и действительными 4 фокусами. Следовательно лазерное излучение, рассеянное объектом назад, можно представить как бы исходящим из множества 5 точек, хаотически распределённых в тонком слое, расположенном в непосредственной близости от поверхности объекта.

В электродинамическом смысле все эти представления: реальная физическая поверхность, непрерывный волновой фронт и множество точечных рассеивателей – эквивалентны.

Поток излучения, падающий на каждое из таких микроскопических зеркал, отражается (рассеивается назад) в широком телесном угле с вершиной в фокусе зеркала, что и определяет достаточно широкую индикатрису диффузного рассеяния всей оптически шероховатой поверхности.

Все упомянутые фиктивные зеркала имеют в среднем одинаковые световые диаметры и радиусы кривизны, поэтому в широком диапазоне углов освещения и наблюдения яркость центров рассеяния сохраняется приблизительно постоянной.

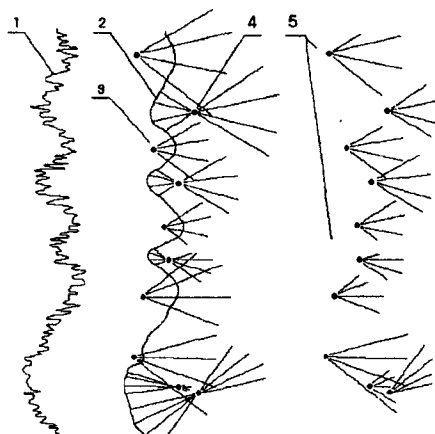


Рис.1.6 Представление рассеянного назад излучения: 1- физическая поверхность объекта; 2- волновой фронт рассеянного назад излучения на удалении нескольких длин волн от физической поверхности; 3,4- мнимые и действительные фокусы выпуклых и вогнутых микроскопических зеркал соответственно; 5- эквивалентные центры излучения (точечные источники, центры рассеяния)

Механизм формирования индикатрисы рассеянного поверхностью объекта излучения можно представить с помощью рис 1.7.

Падающий световой поток 1 рассеивается назад шероховатой поверхностью объекта 2 и на некотором расстоянии от объекта формируется относительно гладкий волновой фронт 3, имеющий вогнутые и выпуклые участки, играющие роль зеркал, которые формируют сильно расходящиеся световые пучки 4. Именно эти пучки и обуславливают индикатрису диффузного рассеяния поверхности объекта.

На рис.1.7 показаны так же практически плоские участки перехода от выпуклого к вогнутому участку волнового фронта. Эти участки формируют зеркальную составляющую 5 индикатрисы рассеяния. Зеркальная составляющая индикатрисы рассеяния, в большинстве случаев, вредна, т.к. создаёт блики, ухудшающие условия регистрации (при наличии бликов увеличивается динамический диапазон яркости, который может превысить возможности телекамеры) и обработки изображения объекта.

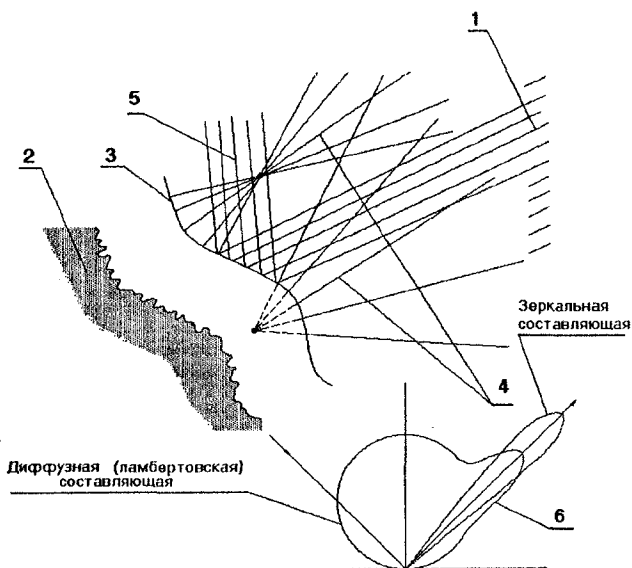


Рис.1.7. К формированию рассеянного диффузной поверхностью излучения: 1- падающий пучок когерентного излучения; 2- физическая поверхность объекта; 3- волновой фронт рассеянного назад излучения; 4- гомоцентрические световые пучки, исходящие из фиктивных центров излучения (диффузная составляющая); 5- световые пучки с малой геометрической расходимостью от плоских участков волнового фронта (зеркальная составляющая), 6- результирующая индикатриса рассеяния поверхности объекта.

Точечные источники 5, показанные на рис. 1.6, излучают синхронно (но, в общем случае, — не синфазно), т.е. во временном смысле они взаимно когерентны, и имеют приблизительно одинаковую мощность (в случае, когда объект освещён равномерно, а коэффициент светорассеяния мало изменяется в пределах видимого или исследуемого участка его поверхности). Фаза излучения каждого такого отдельно взятого источника в стационарных условиях (объект неподвижен) от времени не зависит, но при переходе от одного источника к другому изменяется по некоторому закону, имеющему детерминированную и случайную составляющие. Детерминированная составляющая определяется номинальной формой объекта, заданной его чертежом. Случайная составляющая определяется погрешностью его изготовления, следами обработки поверхности и шероховатостью покрытия.

Наличие густой сетки таких фиктивных центров вторичного излучения, “привязанных” к поверхности объекта, делает последнюю доступной контролю оптическими средствами.

Расстояние между соседними упомянутыми “блестящими” точками определяется способом обработки и характером покрытия поверхности объекта. Если на поверхность объекта наносится моно-слой светоотражающих микросфер, имеющих, как правило, диаметр в несколько десятков микрон, расстояние между соседними “бликами” определяется диаметром этих микросфер.

Каждый такой точечный источник имеет широкую диаграмму направленности, т.е. переизлучает назад падающую на него энергию практически во всю полусферу. Иными словами, в заданную точку пространства приходят лучи от всех точек видимой поверхности объекта, имея приблизительно одинаковую интенсивность и, наоборот, излучение, исходящее из каждого отдельно взятого центра рассеяния участвует в формировании светового поля в любой точке пространства.

Рассмотрим детально процесс формирования светового поля, рассеянного диффузно отражающим объектом. Введём в окрестности объекта координатную плоскость (x_0, y_0) (рис.1.8.). На некотором расстоянии L от этой плоскости введём координатную плоскость (x, y) .

Будем считать, что одноимённые оси координат взаимно параллельны, одинаково ориентированы и перпендикулярны прямой z , проходящей через начала координат.

Комплексная амплитуда $E(x, y, L)$ электрической компоненты рассеянного назад излучения в плоскости (x, y) определяется, в соответствии с принципом Френеля-Кирхгофа, одноимённым интегралом, взятым по прямоугольнику со сторонами $2b \times 2c$, где $2b \times 2c$ - размеры объекта в плоскости (x_0, y_0) [10]:

$$E(x, y, L) = G \cdot \frac{i}{\lambda} \cdot \int_{-b}^{b} \int_{-c}^{c} \xi \cdot \frac{\exp[-i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\delta - Z - W)]}{\delta} \cdot \cos(\theta) \cdot dx_0 dy_0 \quad (1.4)$$

где G - интегральный коэффициент пропорциональности, характеризующий усреднённые по всей поверхности объекта интенсивность освещения и отражательную способность;

$\xi = \xi(x_0, y_0)$ - функция, описывающая локальные неравномерности освещения и коэффициента отражения поверхности объекта;

$\delta = \sqrt{L^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – расстояние между точкой в плоскости наблюдения x, y и текущей точкой в плоскости объекта (x_0, y_0) ;

$Z = Z(x_0, y_0)$ – функция, описывающая форму объекта;

$W = W(x_0, y_0)$ – функция, описывающая “волнистость” волнового фронта, обусловленную шероховатостью поверхности объекта;

θ – угол между положительным направлением оси z и отрезком прямой между точками $(x_0, y_0, 0)$ и (x, y, L) .

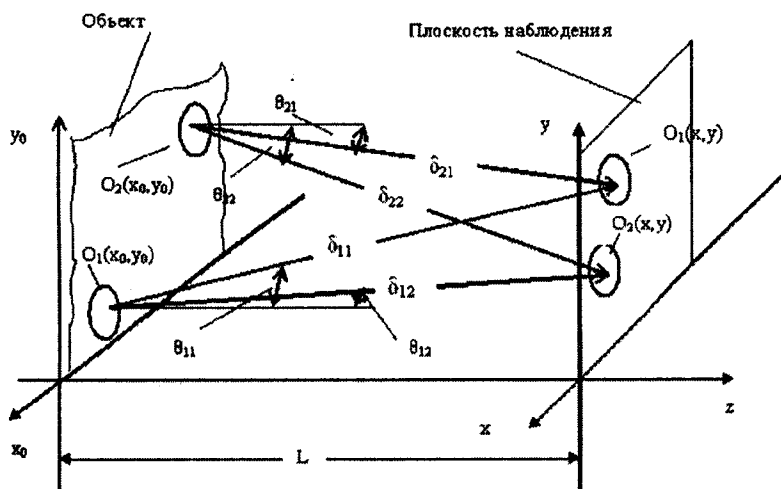


Рис.1.8 Система координат, установленная для расчета амплитуды рассеянного объектом излучения: $O_1(x_0, y_0)$ и $O_2(x_0, y_0)$ – независимые поверхностные излучатели диаметра d_0 в плоскости (x_0, y_0) ; $O_1(x, y)$ и $O_2(x, y)$ – точки диаметра d в плоскости наблюдения (x, y)

Перепишем формулу (1.4) в виде:

$$E(x, y, L) = \frac{G}{\lambda \cdot \delta} \cdot \int_{-b}^b \int_{-c}^c F \cdot \exp\left[i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot W(x_0, y_0)\right] \cdot dx_0 dy_0, \quad (1.5)$$

где $F = \xi \cdot \exp\left[\pi - i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\delta - Z)\right] \cdot \cos(\theta)$ – функция, описывающая форму объекта и геометрию оптической схемы лабораторной

установки.

Функция F – многозначная, поэтому целое число периодов из аргумента входящей в неё экспоненты можно исключить, а остаток – отнести к функции $z(x_0, y_0)$, т.е. записать:

$$E(x, y, L) = \frac{G}{\lambda \cdot \delta} \cdot \int_{-b-c}^b \int_{-c}^{+c} \exp[i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot W(x_0, y_0)] \cdot dx_0 dy_0. \quad (1.6)$$

Формально пределы интегрирования в (1.6) могут быть произвольно большими, однако, как показано, например, в [11], основной вклад в интенсивность светового поля в окрестности заданной точки пространства вносит участок поверхности объекта, ограниченный первой зоной Френеля. (Все остальные зоны кроме первой взаимно нейтрализуют друг друга).

Здесь под первой зоной Френеля понимается окрестность произвольной текущей точки (x_0, y_0) на поверхности объекта, наблюдаемой из точки (x, y) . Например, показанная на рис.1.8, окрестность точки $O_1(x_0, y_0)$ или точки $O_2(x_0, y_0)$, которые наблюдаются из точки $O_1(x, y)$ или точки $O_2(x, y)$.

Иными словами, световое поле в окрестности заданной точки в плоскости наблюдения (например, точки $O_1(x, y)$ или точки $O_2(x, y)$ на рис.1.8) представляет собой суперпозицию полей, рассеянных назад множеством независимых поверхностных излучателей, равномерно и плотно покрывающих видимую часть поверхности объекта, каждый из которых имеет размеры соответствующей зоны Френеля.

Средний характерный размер зоны Френеля определится из следующих соображений. С одной стороны, диаметр d_0 элементарного поверхностного излучателя должен обеспечить минимальный (дифракционный) раскрыв его диаграммы направленности, т.е. в точке наблюдения, удалённой от излучателя на расстояние L , диаграмма должна вписаться в круг диаметром d :

$$d = 2.44 \cdot \frac{\lambda}{d_0} \cdot L. \quad (1.7)$$

С другой стороны, в соответствии с теоремой Ван Циттерга-Цернике, в круге диаметром d в плоскости наблюдения, взаимно когерентными будут лучи, исходящие из круга диаметром d_0 на поверхности объекта, т.е.:

$$d_0 = 2.44 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot L. \quad (1.8)$$

Сопоставляя (1.7) и (1.8), находим, что $d = d_0$. Отсюда:

$$d_0 = 1.56 \cdot \sqrt{\lambda \cdot L} \quad (1.9)$$

Каждая зона Френеля представляет собой поверхностный излучатель (точнее – ретранслятор) со случайной модуляцией фазы.

В общем случае такой излучатель имеет многолепестковую диаграмму направленности, что приводит к появлению в плоскости наблюдения некоторого множества случайно расположенных пятен.

При изменении расстояния L эта совокупность пятен претерпевает пропорциональное растяжение/сжатие относительно точки, положение которой смещается в поперечном направлении. По величине продольного и поперечного смещения можно определить точку на поверхности объекта, которой соответствует упомянутая совокупность пятен.

Все независимые зоны Френеля формируют взаимно перекрывающиеся системы пятен, в совокупности образуя пятнистую, так называемую спекл-структуру.

Из оптики известно, что одиночная положительная линза, к которой может быть приведен любой сложный объектив, осуществляет взаимное преобразование Фурье двумерных оптических сигналов в передней и задней фокальных плоскостях.

Таким образом, спекл-структура в передней фокальной плоскости объектива, образованная излучением, рассеянным оптически шероховатым объектом, является спектром пространственных частот объекта. Объектив, осуществляя обратное преобразование Фурье, формирует в задней фокальной плоскости изображение, в некотором масштабе воспроизводящее сам объект.

В настоящее время большинство работ в области спекл-интерферометрии ориентировано на получение, преобразование, математическую обработку и интерпретацию изображений. Однако, в информативном отношении, не менее интересно изучение и практическое использование для контроля объектов пространственного спектра оптического сигнала в области пространственных частот, т.е. фактически, – в передней фокальной плоскости объектива.

В электро- и радиотехнике, в теории информации и во многих других технических дисциплинах преимущественно используется именно спектральный подход. Поэтому спектр пространственных частот непосредственно на входе объектива заслуживает более де-

тального теоретического и экспериментального исследования.

Если в передней фокальной плоскости объектива установить фильтр с подходящей передаточной функцией, вполне возможно, что на изображении проявятся некоторые признаки, несущие информацию о состоянии и изменениях объекта.

Например, широкий круг задач связан с исследованием прозрачных фазовых объектов: потоков жидкости (например, топлива в трубопроводе) с температурными неоднородностями, прозрачных моделей из оптически активных материалов, испытывающих механическую нагрузку и т.д. Проблема в таких рода задачах состоит в необходимости визуализировать фазовые неоднородности, т.е. пространственные вариации показателя преломления или оптического пути. Методы визуализации фазовых объектов, известные из микроскопии и голографии, реализуются именно в частотном пространстве.

В настоящей работе информативная сторона спекл-структуры не рассматривается, а эксперименты ориентированы на получение самых общих её свойств.

Итак, мы показали, что совокупность всех центров рассеяния формирует на входе объектива телекамеры сложную случайную интерференционную картину (спекл-структуру). Эта структура образуется потому, что в плоскости наблюдения каждая произвольно выбранная пара центров рассеяния образует линейчатую интерференционную картину. Пространственный период и ориентация полос в этой картине определяются расстоянием между центрами излучения рассматриваемой пары и их положением. Статистические свойства спекл-структуры подробно рассмотрены в [9].

Можно показать, что средний диаметр пятен спекл-структуры (и среднее расстояние между ними) определяется угловым размером объекта или освещённой области его поверхности. Чем больше угловой размер освещённой области, тем меньше диаметр пятен спекл-структуры и расстояние между ними. При поперечном перемещении или небольшом повороте объекта спекл-структура перемещается как целое.

При статической и колебательной деформации объекта изменяется общий вид спекл-структуры.

Эти свойства будут экспериментально проверены в ходе выполнения настоящей работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки для изучения свойств спекл-структуры приведена на рис.1.9. Все элементы установки закреплены на общем оптическом столе.

Излучение He-Ne лазера 1 фокусируется микрообъективом 2 на точечную диафрагму 3, имеющую микрометрические поперечные и продольную подвижки. Совокупность микрообъектива и точечной диафрагмы представляет собой так называемый пространственный фильтр, подавляющий помехи от пыли и царапин на предшествующих оптических элементах.

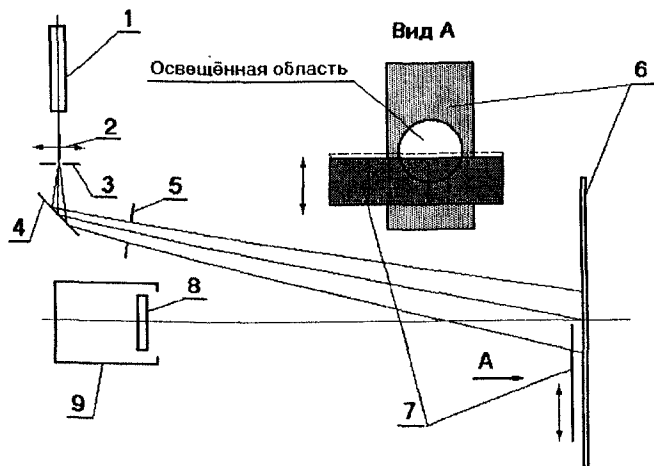


Рис.1.9 Схема установки для экспериментального исследования спекл-структуры: 1- He-Ne лазер; 2- микрообъектив; 3- точечная диафрагма; 4- поворотное зеркало; 5- ирисовая диафрагма; 6- пластина; 7- шторка; 8- фотодиодная матрица телекамеры; 9- телекамера

С помощью поворотного зеркала 4 излучение лазера 1 направляется на пластину 6 через ирисовую диафрагму 5. Пластина 6 закреплена на поворотном узле, имеющем возможность поворота относительно трёх осей. Непосредственно перед пластиной 6 установлена шторка 7.

На поверхность пластины 6 нанесено светорассеивающее покрытие, а поверхность шторки 7 зачернена.

На расстоянии 1000 мм от пластины установлена полупроводниковая матричная телекамера без объектива. С целью защиты поверхности матрицы от пыли и повреждений телекамера временно закрыта защитной крышкой. Телекамера установлена с помощью рейтера на оптическом столе и имеет возможность продольной подвижки в диапазоне ± 150 мм.

Телекамера подключена к персональной ЭВМ (на схеме не показана). Для связи телекамеры с ЭВМ имеется специализированная плата и соответствующее программное обеспечение. Программное обеспечение позволяет производить съёмку одиночных кадров.

Задание 1. Изучить влияние на формируемую спекл-структуру малых изменений площади освещения поверхности объекта, а также определить поперечные перемещения спеклов и направления их визирования при продольном смещении телекамеры.

Порядок выполнения задания:

Включить лазер, ЭВМ и телекамеру.

1. С помощью ирисовой диафрагмы сформировать на пластине световое пятно диаметром 10 мм.
2. Край шторки установить приблизительно посередине светового пятна.
3. Установить телекамеру в крайнее заднее положение.
4. Зарегистрировать исходную спекл-структуру. Для этого необходимо нажать клавишу с символом «S» на клавиатуре. Изображение будет сохранено в виде файла на твердом диске компьютера в каталоге AverTV под именем состоящем из восьми цифр. Первые две цифры имени файла указывают день текущего месяца, следующие – час, минуту и секунду времени записи.
5. Перемещая шторку в одну и другую стороны от исходного положения на 1 и 2 мм, зарегистрировать соответствующие этим положениям спекл-структуры.
6. Загрузить программу «Adobe Photoshop».
7. Открыть в «Adobe Photoshop», зарегистрированные файлы со спекл-структурами.
8. С помощью опции «Вычисления», обеспечивающей получение разницы изображений, найти пятна спекл-структуры, которые формируются участками поверхности пластины в перекрываемой полосе.

9. Перемещая телекамеру вперёд вдоль рельса с шагом 10 мм, зарегистрировать соответствующие спекл-структуры.

10. Аналогично П. 9 определить поперечные смещения ранее выделенных пятен.

11. По величине продольных подвижек телекамеры и поперечных перемещений пятен определить направления их визирования.

Задание 2. Определить влияние на формируемую спекл-структуру диаметра освещенной области на поверхности пластины.

Порядок выполнения задания:

1. Вывести шторку из светового пятна.

2. С помощью ирисовой диафрагмы установить несколько различных диаметров светового пятна и зарегистрировать соответствующие этим диаметрам спекл-структуры.

3. Загрузить программу «Adobe Photoshop».

4. Открыть в «Adobe Photoshop», зарегистрированные файлы со спекл-структурами.

5. С помощью опции «Вычисления», обеспечивающей получение разницы изображений, сравнить размеры пятен спекл-структур, которые формируются перекрываемыми участками поверхности пластины, зарегистрированными при различающихся диаметрах освещенной области.

Задание 3. Определить влияние на формируемую спекл-структуру величины относительного отверстия объектива телекамеры .

Порядок выполнения задания:

1. Переместить телекамеру в заднее крайнее положение. Установить на телекамеру объектив. Сфокусировать телекамеру на пластину. Установить минимальную диафрагму объектива и зарегистрировать изображение спекл-структуры.

2. Последовательно увеличивая диафрагму объектива, зарегистрировать изображения спекл-структуры.

3. Выделить несколько наиболее ярких пятен на изображениях спекл-структур, соответствующих различным диафрагмам объектива, и сравнить их размеры с помощью программы «Adobe Photoshop».

4. Определить при какой величине относительного отверстия объектива (для каждого фиксированного значения диафрагмы

оно указано на корпусе объектива) спекл-структура в изображении перестает разрешаться.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется визуально наблюдаемая “зернистость” поверхности объекта, освещённого лазерным излучением?

2. Как изменится спекл-структура в плоскости регистрации, если диаметр высвечиваемой области на объекте увеличится/уменьшится в два раза?

3. Как изменится спекл-структура, если расстояние от плоскости регистрации до объекта увеличится/уменьшится в два раза?

4. Как будет перемещаться спекл-структура на визуально наблюдаемом объекте при поперечном перемещении головы близорукого и дальнозоркого человека, а также наблюдателя с нормальным зрением?

5. Что произойдёт со спекл-структурой в области наблюдения при продольном или поперечном перемещении, наклоне, изгибе и кручении объекта?

6. Как связаны спекл-структуры в главной плоскости объектива и в плоскости изображения?

7. Что будет происходить со спекл-структурой, если перед объективом установить линейчатую дифракционную решётку (с возможностью поворота относительно оптической оси), а объект периодически деформировать?

8. Какие изменения претерпевает спекл-структура, если фокусное расстояние формирующего ее объектива будет увеличиваться или уменьшаться?

9. Как изменится спекл-структура, наблюдаемая с помощью объектива, если диафрагма формирующего ее объектива будет увеличиваться, уменьшаться?

Лабораторная работа № 2

ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЛОСКОСТИ ОБЪЕКТА

Цель работы. Изучение спекл-интерферометрического метода регистрации перемещений объекта в плоскости, ортогональной направлению наблюдения.

Оборудование: цифровой спекл-интерферометр (ЦСИ), коллиматор, плоская пластина, юстировочный столик, плоское зеркало.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известны оптические схемы двух типов цифровых спекл-интерферометров, позволяющих производить измерение смещений поверхности исследуемого объекта либо в предметной плоскости, либо в направлении, ортогональном к предметной плоскости (см. рис.1.5).

Для измерения смещений в предметной плоскости поверхность объекта освещается двумя плоскими волнами. Углы падения этих волн, отсчитанные от нормали к поверхности, должны быть одинаковыми по величине и противоположными по знаку. Опорный пучок в таком интерферометре отсутствует.

Рассмотрим принципы, лежащие в основе построения оптических схем интерферометров, предназначенных для регистрации смещений, происходящих в плоскости поверхности исследуемого объекта [4,7]. Схема, которая изображена на рис.1.10, позволяет сформировать и зарегистрировать в плоскости изображения объекта картину интерференционных полос, чувствительную к смещениям предмета в его собственной плоскости. Квазиплоская поверхность D исследуемого предмета расположена в плоскости (x,y) и освещается двумя когерентными плоскими волнами с комплексными амплитудами E_1 и E_2 , направления распространения которых составляют соответственно углы θ и $-\theta$ по отношению к нормали к поверхности предмета (ось z). Ось y направлена перпендикулярно к плоскости (x,z) . Оптическая ось линзы L , формирующей спекл-

изображение освещенной поверхности совпадает с осью z .

Волны E_1 и E_2 интерферируют на поверхности объекта. Интенсивность $I(x,y)$ интерференционной картины, образованной этими волнами, может быть записана подобно (1.2):

$$I(x,y) = I_1(x,y) + I_2(x,y) + 2\sqrt{I_1(x,y)I_2(x,y)} \cos \Delta\varphi(x), \quad (1.10)$$

где $I_1(x,y)$ и $I_2(x,y)$ - интенсивности волн E_1 и E_2 , соответственно, $\Delta\varphi(x)$ - разность фаз этих волн.

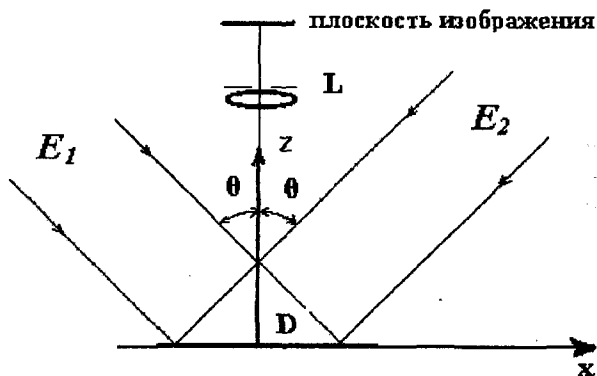


Рис.1.10. Оптическая схема интерферометра, чувствительного к смещениям в плоскости (x,y) объекта D : E_1 , E_2 - освещающие пучки, налетающие на объект по углом θ ; L - объектив

Результирующая интерференционная картина в том случае, если объект плоский, представляет собой систему эквидистантных параллельных полос. Легко можно показать, что шаг полос (расстояние между двумя соседними минимумами или максимумами интенсивности в интерференционной картине) будет равен $\lambda/2\sin\theta$. При этом для нормальной работы цифрового спекл-интерферометра совершенно не обязательно, чтобы интерференционная картина вида (1.10) разрешалась системой регистрации. В нашем случае $\theta=45^\circ$, следовательно, шаг полос $\approx \lambda/1,4$. Такие полосы не могут разрешаться современной цифровой телекамерой (например, размер ячейки фотоматрицы цифровой телекамеры Watec WAT-902, которая используется в лабораторной работе, составляет $8,6 \times 8,3$ мкм). Однако, объектив, строящий на фотоприемной матрице телекамеры спекл-изображение, должен быть диафрагмирован до такой степе-

ни, чтобы матрица разрешала спекл-структуру. Шаг полос в интерференционной картине, создаваемой освещающими пучками на поверхности исследуемого объекта, не превосходит длину волны падающих пучков, и сравним с микронеровностями поверхности, ответственными за формирование спекл-структуры. В этом случае при регистрации рассеянного поверхностью излучения интерференционная картина (1.10) будет усредняться в пределах размеров спекла. Распределение интенсивности в такой интерференционной картине запишется в виде:

$$\begin{aligned} \langle I(x, y) \rangle = & \langle I_1(x, y) \rangle + \langle I_2(x, y) \rangle + \\ & + 2\sqrt{\langle I_1(x, y) \rangle \langle I_2(x, y) \rangle} \cos \langle \Delta\phi(x) \rangle, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где скобки $\langle \rangle$ означают усреднение по размерам спекла в окрестности точки (x, y) .

Обычно объект освещается равномерно пучками одинаковой интенсивности, поэтому $\langle I_1(x, y) \rangle = \langle I_2(x, y) \rangle$ и (1.11) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \langle I(x, y) \rangle = & 2 \langle I_1(x, y) \rangle [1 + \cos \langle \Delta\phi(x) \rangle] = \\ = & 2I_s(x, y)[1 + \cos \phi_s(x, y)] \end{aligned} \quad (1.12)$$

где I_s и ϕ_s - интенсивность и фаза спекл-структуры в точке (x, y) изображения. При этом фаза ϕ_s в рассматриваемой точке (x, y) изображения зависит как от микрорельефа поверхности, образующего спекл-структуру, так и от разности фаз $\Delta\phi(x)$ интерферирующих пучков. Зависимость от разности фаз $\Delta\phi(x)$ носит, как отмечалось, периодический характер. Зависимость от микрорельефа поверхности является случайной, поэтому результирующая фаза ϕ_s также будет случайной. Случайной будет в каждой точке и интенсивность регистрируемого телекамерой изображения (1.12).

Пусть некоторая точка поверхности предмета смещается. Обозначим вектор смещения как $\bar{g} = (g_x, g_y, g_z)$, где g_x , g_y и g_z - компоненты вектора смещения в направлениях, совпадающих с направлениями осей x , y и z , соответственно.

Разность фаз между пучками E_1 и E_2 остается постоянной в любой плоскости, параллельной плоскости (y, z) , поэтому лежащие в такой плоскости компоненты g_y и g_z вектора смещения не влияют на возникающую при смещении поверхности разность фаз. Следовательно, рассматриваемый тип интерферометра позволяет выделить компоненты смещения предмета в его собственной плоскости даже

тогда, когда они сопровождаются и смещениями по нормали к поверхности предмета. Для вычисления разности фаз $\Delta\Psi(x)$ двух волн, возникающей при смещении точки, принадлежащей поверхности объекта, в направлении оси x , можно воспользоваться выражением [4,7]:

$$\Delta\Psi(x) = \frac{4\pi g_x \sin\theta}{\lambda} \quad (1.13)$$

Интерференционная картина при смещении объекта изменится в зависимости от величины фазового сдвига (1.13):

$$\langle I(x, y) \rangle = 2I_s(x, y) \{1 + \cos[\varphi_s(x, y) + \Delta\Psi(x)]\}. \quad (1.14)$$

С помощью цифровой телекамеры можно зарегистрировать изображение поверхности объекта в исходном, а затем смещенном состоянии и ввести эти изображения в персональный компьютер. При вычитании этих изображений (выражения (1.14) и (1.12)) на мониторе компьютера образуется распределение яркости $B(x, y)$, которое зависит от модуля разности фаз, возникающей при смещении точек поверхности:

$$B(x, y) = 4bI_s(x, y) \left| \sin\left[\varphi_s(x, y) + \frac{\Delta\Psi(x)}{2}\right] \sin\frac{\Delta\Psi(x)}{2} \right|, \quad (1.15)$$

где b - коэффициент, зависящий от параметров телекамеры.

В уравнении (1.15) фаза спекл-структуры $\varphi_s(x, y)$ является случайной величиной в каждой точке (x, y) спекл-изображения и определяется, главным образом, микрорельефом поверхности шероховатого объекта.

Соответственно, сумму $\varphi_s + \frac{\Delta\Psi}{2}$ также можно отнести к случайной величине. С произведением $I_s(x, y) \left| \sin\left[\varphi_s(x, y) + \frac{\Delta\Psi(x)}{2}\right] \right|$ связывается вид спекл-структуры, покрывающей изображение объекта. Корреляционная система полос, наблюдаемая на мониторе, описывается функцией

$$\left| \sin\frac{\Delta\Psi(x)}{2} \right| = \left| \sin\frac{2\pi g_x \sin\theta}{\lambda} \right|. \quad (1.16)$$

Точки изображения поверхности, принадлежащие одной и той же корреляционной полосе, сместились между экспозициями на одну и ту же величину. Соответственно разность величин перемеще-

ния Δg_x (шаг полос) в направлении оси x точек поверхности, принадлежащих двум соседним максимумам (или минимумам) интерференционных полос:

$$\Delta g_x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1.17)$$

Из уравнения (1.15) с учетом (1.16) можно найти величины перемещения g_s , соответствующие любой точке (x, y) изображения поверхности. Для этого необходимо определить порядковый номер N интерференционной полосы и умножить его на шаг Δg_x полос. Порядковый номер можно определить, если априори известна неподвижная точка, принадлежащая поверхности. В противном случае можно установить только разность величин перемещения различных точек поверхности.

При аналогичной геометрии освещения с заменой направления оси x на y возникает интерференционная картина, для которой:

$$\Delta \Psi(y) = \frac{4\pi g_y \sin \theta}{\lambda}, \quad (1.18)$$

и

$$\Delta g_y = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1.19)$$

Для определения двух составляющих вектора смещения, лежащих в плоскости объекта, необходимо измерить интервалы между полосами, возникающими при обеих геометриях освещения.

Практическая реализация изложенного метода регистрации перемещений в плоскости ортогональной направлению наблюдения обычно осуществляется с помощью простой оптической схемы, показанной на рис. 1.11. Объект D снова расположен в плоскости (x, y) и освещается плоской волной E_p , падающей под углом θ к его нормали. Для формирования второй плоской волны используется зеркало M , которое отражает часть освещающей волны на поверхность объекта под углом $-\theta$. Наблюдение и регистрация ведутся с помощью объектива L .

При проведении исследований с использованием как схемы, показанной на рис. 1.10, так и схемы, показанной на рис. 1.11, необходимо тщательно следить, чтобы освещение предмета было однородным по его поверхности. Всякое уменьшение светового потока на краях освещенной части поверхности из-за гауссова профиля ла-

зерного пучка ухудшает отношение сигнал/шум для видеосигнала и приводит к снижению контраста полос. Избавиться от этого можно, используя такое предварительное расширение лазерного пучка, при котором поверхность предмета освещается только центральной частью исходного лазерного пучка. Обычно для этих целей применяют коллимирующую линзу.

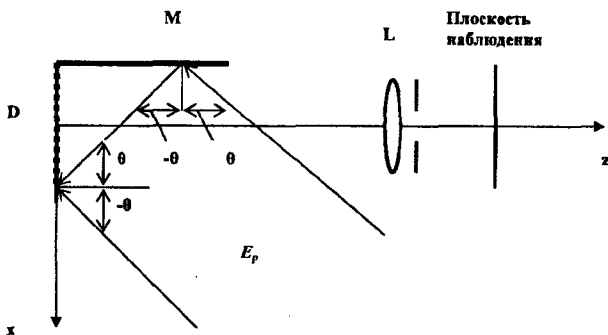


Рис.1.11. Практическая схема спекл-интерферометра, чувствительного к смещениям в плоскости объекта D с одним освещающим пучком E_p : M – зеркало; L - объектив

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки приведена на рис.1.12. Пластина 6 зажата в тисках юстировочного устройства 5, которое жестко связано с платформой спекл-интерферометрического стола. Излучение лазера 1 используется для освещения пластины. Коллиматор, состоящий из микрообъектива 2 с микродиафрагмой и линзы 3, формирует плоский пучок, который освещает пластину 6 и зеркало 7, установленное вблизи пластины. Плоскость пластины ориентирована под углом 45° к оптической оси коллиматора. Зеркало 7 также направляет излучение под углом 45° к нормали пластины. Телекамера 8 интерферометра позволяет наблюдать на экране монитора персональной ЭВМ 9 спекл-изображение пластины в

нормальном направлении. С помощью микрометрического винта 4 юстировочного устройства 5 пластину можно перемещать в плоскости, совпадающей с поверхностью пластины.

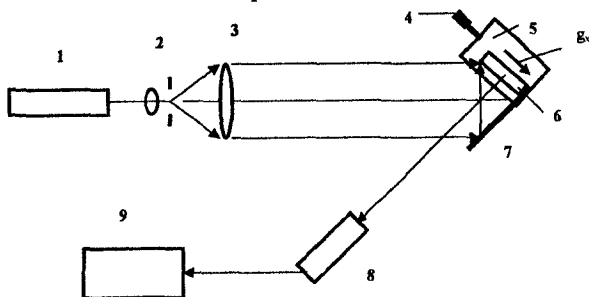


Рис.1.12. Блок-схема установки для регистрации перемещений пластины: 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – линза; 4 – микрометрический винт; 5 – юстировочный стол; 6 – пластина; 7 – зеркало; 8 – цифровая телекамера; 9 – персональная ЭВМ; g_x – направление перемещения

Задание. Провести регистрацию спеклограмм перемещения пластины в плоскости, совпадающей с ее поверхностью, и выполнить их количественную обработку.

Порядок выполнения задания:

1. Под руководством лаборанта включить лазер, ЭВМ, телекамеру.
2. Зарегистрировать спекл-изображение пластины.
3. С помощью микрометрического винта переместить пластину в своей плоскости на определенную величину и зарегистрировать второе спекл-изображение пластины. Величина смещения не должна превышать 10 мкм.
4. Загрузить программу Adobe Photoshop.
5. Открыть файлы зарегистрированных изображений.
6. С помощью опции «Вычисления» получить спеклограмму разности зарегистрированных изображений.
7. По спеклограмме вычислить разность перемещения двух, отмеченных преподавателем, точек, принадлежащих поверхности пластины.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое спекл-изображение? В чем его отличие от изображения объекта, построенного с помощью линзы?
2. Почему в схемах спекл-интерферометра на рис.1.10-1.12 нет опорного пучка?
3. Почему в схемах спекл-интерферометра на рис.1.10-1.12 объект освещается двумя пучками?
4. Почему в схемах спекл-интерферометра на рис.1.10-1.12 углы, под которыми пучки падают на поверхность объекта, одинаковы? Как будет работать интерферометр, если углы будут различаться?
5. Почему в схемах на рис.1.10-1.12 для освещения объекта используются плоские волновые фронты? Как будет работать интерферометр, если освещающие пучки будут сферическими?
6. Как изменяется спеклограмма на экране монитора ЦСИ, если объект начинает перемещаться в направлении, совпадающем с направлением наблюдения?
7. Можно ли использовать ЦСИ, описанный в работе, для регистрации колебаний?
8. Что такое вектор чувствительности интерферометра? Как направлен вектор чувствительности в схемах спекл-интерферометра на рис.1.10-1.12?

Лабораторная работа № 3

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Цель работы. Экспериментальное определения с помощью цифрового спекл-интерферометра статической деформации объектов.

Оборудование: цифровой спекл-интерферометр, объект исследования, нагрузочное приспособление с отсчетным устройством.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Надёжность, срок службы и технические характеристики объектов аэрокосмической техники, существенно зависят от точности прочностного расчёта конструкции в процессе их проектирования.

В свою очередь, расчёт деталей на прочность осложняется тем, что их форма и физические свойства, как правило, не поддаются адекватному аналитическому математическому представлению.

Поэтому при проектировании различных объектов широко применяется экспериментальное исследование или самого объекта или его модели. С этой целью к объекту (или его модели) прикладывается система сил, величина и направление действия которых воспроизводят реальные условия работы объекта. При этом в материале объекта возникнет некоторое, как правило, – сложное, поле механических напряжений.

Из теории упругости известно, что механическое напряжение, в соответствии с законом Гука, однозначно определяется локальной относительной деформацией материала. Интегральная совокупность всех локальных деформаций, в конечном счёте, проявится в искажении формы доступного наблюдению участка его поверхности.

Таким образом, изменение формы объекта до и после нагрузки, т.е. поле пространственных перемещений различных точек его поверхности, несёт информацию о распределении внутренних напряжений в материале объекта.

В настоящее время для измерения линейного перемещения то-

чек поверхности объекта широко используются лазерные интерферометры.

Принцип действия лазерного интерферометра основан на интерференции двух световых пучков: опорного и предметного, пространственно совмещённых в плоскости регистрации лазерного излучения.

В идеальном случае опорный пучок имеет плоский волновой фронт, параллельный плоскости регистрации, и постоянную по сечению пучка интенсивность.

Предметный пучок в плоскости регистрации представляет собой изображение оптически шероховатого объекта, освещённого лазерным излучением. Интенсивность предметного пучка быстро и случайным образом меняется по координатам, т.е. изображение объекта покрыто пятнистой структурой, которая получила название спекл-структуры.

Средний диаметр пятен спекл-структуры и среднее расстояние между пятнами определяются относительным отверстием используемого объектива телекамеры. Предметный и опорный пучки взаимно когерентны и совпадают по поляризации, т.е. способны интерферировать.

Комплексная амплитуда опорного $E_r(x, y)$ и предметного $E_s(x, y)$ пучков может быть представлена выражениями:

$$E_r(x, y) = |E_r(x, y)| \exp[-i\varphi_r(x, y)], \quad (1.20)$$

$$E_s(x, y) = |E_s(x, y)| \exp\{-i[kW(x, y) + \varphi_s(x, y)]\}, \quad (1.21)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; $W(x, y)$ - случайная функция,

представляющая фазовый сдвиг, обусловленный микрорельефом оптически шероховатой поверхности; $\varphi_s(x, y)$ - фаза предметного пучка в виде относительно гладкой функции, зависящей от формы объекта, $\varphi_r(x, y)$ - фаза опорного пучка в рассматриваемой точке.

Фотоприемная матрица телекамеры регистрирует результирующую интенсивность $I_I(x, y)$ интерференционной картины, образованной при сложении волн (1.20) и (1.21):

$$I_I(x, y) = I_r(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \cos[kW(x, y) + \varphi_1(x, y)], \quad (1.22)$$

где $\varphi_1(x, y)$ - некая неизвестная и практически недоступная оп-

ределению фазовая функция, обусловленная разностью фаз опорного $\varphi_r(x,y)$ и предметного $\varphi_s(x,y)$ пучков.

Конкретный вид функции $\varphi_1(x,y)$ значения не имеет, т.к. практический интерес представляет изменение этой функции в результате деформации объекта.

При относительно малой деформации объекта интенсивность $I_2(x,y)$ света в плоскости деформации выразится формулой:

$$I_2(x,y) = I_r(x,y) + I_s(x,y) + 2\sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)} \cos[kW(x,y) + \varphi_2(x,y)] \quad (1.23)$$

где $\varphi_2(x,y)$ - фазовая функция, обусловленная формой поверхности объекта в деформированном состоянии.

Если из изображения деформированного объекта (1.23) вычесть ранее зарегистрированное изображение объекта в его исходном состоянии (1.22), то разностное изображение $\delta I(x,y)$ выразится формулой:

$$\delta I(x,y) = 4\sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)} \sin \frac{1}{2} [\varphi_2(x,y) - \varphi_1(x,y)] \times \sin \left[kW(x,y) + \frac{\varphi_1(x,y) + \varphi_2(x,y)}{2} \right] \quad (1.24)$$

Так как на экран монитора выводится яркость $B(x,y)$ изображения (1.24), то ее можно представить в виде:

$$B(x,y) = 4b \left| \sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)} \sin [kW(x,y) + \frac{\varphi_1(x,y) + \varphi_2(x,y)}{2}] \sin \frac{1}{2} \Delta\varphi(x,y) \right| = \Phi(x,y) \cdot \left| \sin \frac{1}{2} \Delta\varphi(x,y) \right| \quad (1.25)$$

где

$$\Phi(x,y) = 4b \left| \sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)} \sin \left[kW(x,y) + \frac{\varphi_1(x,y) + \varphi_2(x,y)}{2} \right] \right| \quad (1.26)$$

$$\Delta\varphi(x,y) = \varphi_2(x,y) - \varphi_1(x,y). \quad (1.27)$$

Обычно объект освещается в направлении наблюдения, поэтому изменение фазы $\Delta\varphi(x,y)$ в формуле (1.25) с величиной смеще-

ния g_z точки поверхности можно связать через выражение:

$$\Delta\Psi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} g_z(x, y). \quad (1.28)$$

Итак, процесс исследования статической деформации объекта включает в себя следующие основные операции:

- создать в плоскости регистрации равномерный фон когерентного лазерного излучения;
- зарегистрировать изображение объекта в его исходном, ненагруженном состоянии;
- обеспечить регулируемую деформацию объекта и произвести регистрацию изображения объекта в нагруженном состоянии;
- получить с помощью графического редактора Adobe Photoshop разность зарегистрированных изображений;
- расшифровать полученную спеклограмму;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Для контроля деформации объекта используется спекл-интерферометр, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.13.

Излучение лазера 1 фокусируется микрообъективом 3 в плоскость точечной диафрагмы 4 и расширяющимся конусом проходит через светоделитель 5. Далее пучок коллимируется линзой 6 и, проходя нейтральный светофильтр 8, направляется на опорное зеркало 9. Отразившийся от зеркала 9 световой поток фокусируется линзой 6 в плоскость апертурной диафрагмы 10 объектива телекамеры 11 и на светочувствительной поверхности ПЗС матрицы, входящей в её состав, формирует опорный сигнал. Другой световой поток после светоделителя 5 направляется в сторону исследуемого объекта 12. В качестве объекта выбрана турбинная лопатка. Нагрузочное приспособление 13 обеспечивает возможность приложения к объекту 12 заданной по величине и направлению постоянной силы F , с которой связана величина деформации лопатки.

Объектив телекамеры 11 формирует на ПЗС матрице изображение объекта 12 (на фоне опорного сигнала) покрытое спекл-структурой. Действующее отверстие апертурной диафрагмы 10 объектива телекамеры выбрано таким, чтобы средний размер пятен спекл-структуры был приблизительно равным размеру светочувст-

вительного элемента ПЗС матрицы. Телевизионная камера формирует видеосигнал, который с помощью соответствующих аппаратных и программных средств запоминается в памяти ЭВМ в виде одиночного кадра или серии кадров, с заданным периодом следования.

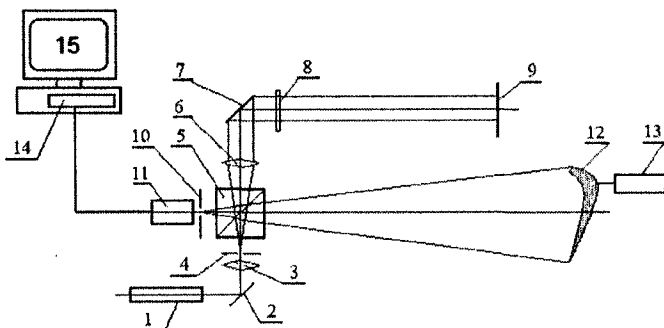


Рис.1.13. Схема лабораторной установки: 1— He-Ne лазер; 2,7—поворотные зеркала; 3—микрообъектив; 4 - точечная диафрагма; 5—светоделитель; 6—коллимирующая линза; 8—нейтральный светофильтр; 9— опорное глухое зеркало; 10— апертурная диафрагма объектива телекамеры; 11 - телевизионная камера; 12- исследуемый объект; 13- нагрузочное приспособление; 14—блок ввода изображений; 15—ЭВМ

Светофильтр 8 обеспечивает оптимальное соотношение интенсивности предметного и опорного пучков на матрице телекамеры 11. При этом интенсивность опорного сигнала (при отсутствии изображения) равна средней по изображению интенсивности пятен спекл-структуры (при отсутствии опорного сигнала). В этом случае интенсивность пятен, где эти сигналы синфазны, будет максимальной. В точках, где эти сигналы противофазны, интенсивность света будет равна нулю. Яркость остальных пятен спекл-структуры распределена в этом интервале по некоторому закону. Мощность излучения используемого лазера должна быть согласована с динамическим диапазоном телекамеры, а уровень записи блока ввода изображений выбран таким, что полный размах видеосигнала укладывается в 256 градаций серого шкалы GrayScale.

Сначала исследуемая лопатка регистрируется в исходном, ненагруженном состоянии. Характерный вид получаемого изображения объекта приведен на рис.1.14а. Спекл-структура на изображе-

нии лопатки обусловлена шероховатостью её поверхности, т.е. наличием микрорельефа, который описывается некоторой быстро осциллирующей случайной функцией координат.

Затем лопатка нагружается с помощью нагрузочного приспособления некоторой силой F , заданной по величине и направлению. Под действием этой силы лопатка деформируется. В результате деформации различные точки поверхности лопатки смещаются на различные расстояния, поэтому и разность фаз между предметным и опорным пучками, согласно выражению (1.27), является функцией координат. Яркость каждой точки изображения, в свою очередь, изменяется по косинусоидальному закону в зависимости от этой разности фаз. В результате исходная спекл-структура, не меняясь в среднем (рис.1.146), сильно изменяется в мелких деталях (см. увеличенные изображения выделенных фрагментов). Если теперь вычесть одно изображение из другого, то на разностном изображении, получившем название спеклограммы, появится система тёмных полос, несущая информацию о характере деформации лопатки и доступная для дальнейшей расшифровки (рис.1.15).

Задание. Освоить методики записи и анализа спеклограммы лопатки в условиях ее статического нагружения.

Порядок проведения работы:

1. Под руководством лаборанта ознакомиться с интерфейсом программы StatMicroDef.exe и приёмами управления управлением телекамерой.

2. Установить режим работы телекамеры:

- имя файла на жёстком диске C:\Capture.avi,
- темп записи 25 кадров в секунду,
- время записи 1 секунда,
- режим видео 768 x 576 точек, RGB – 24 бита, полные кадры (без сжатия),
- запись непосредственно на жёсткий диск,
- объектив сфокусировать на объект,
- апертурную диафрагму объектива уменьшить до предела,
- яркость и контраст изображения подобрать так, чтобы максимальную яркость имели только небольшое количество пятен спекл-структуры.

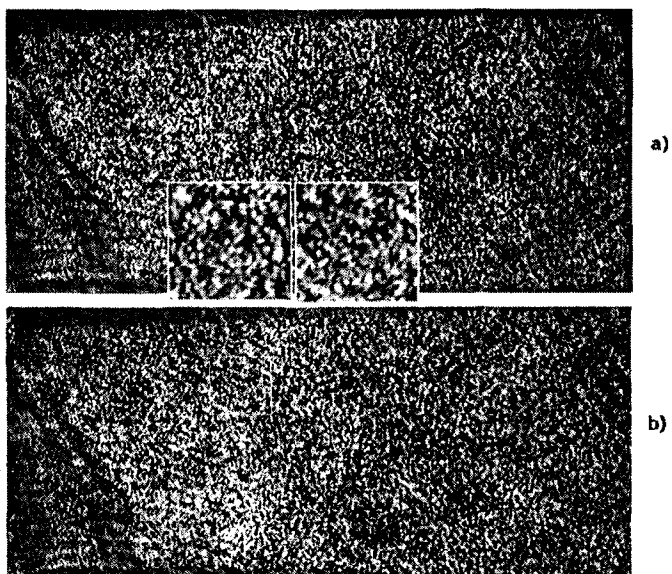


Рис. 1.14 Изменение спекл-структуры на изображении лопатки при её деформации под действием внешней механической нагрузки: а- исходная спекл-структура; б-спекл-структура деформированной лопатки

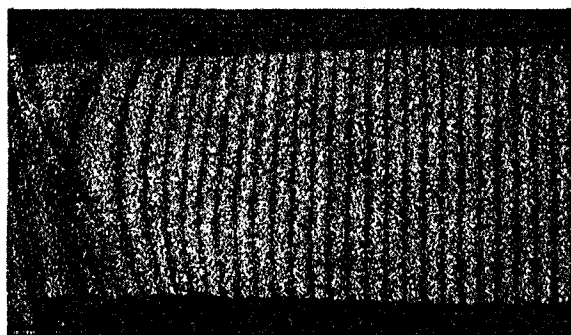


Рис. 1.15. Разность изображений лопатки, полученных до и после её деформации

3. Ввести нагрузочное приспособление 13 в контакт с объектом 12 и зафиксировать в журнале отсчет по его нониусу. Это состояние объекта принимается за исходное.

4. С помощью телекамеры записать AVI-файл Capture.avi из 25-ти кадров.

5. Включить на исполнение программу StatMicroDef.exe и нажать на диалоговой панели программы кнопку «До деформации». При этом программа сформирует в памяти ЭВМ изображение объекта, усреднённое по всем кадрам. Этим подавляются помехи, обусловленные механической нестабильностью установки.

6. Свернуть программу StatMicroDef.exe (не выходить из неё!).

7. С помощью нагрузочного приспособления деформировать объект на несколько микрометров. Конкретную величину деформации зафиксировать в журнале.

8. Повторить П. 4. При этом объект в его деформированном состоянии будет записан в AVI-файл (под тем же именем Capture.avi).

9. Развернуть программу StatMicroDef.exe и нажать кнопку «После деформации». При этом в памяти ЭВМ будет сформировано усреднённое по всем кадрам изображение объекта в его деформированном состоянии.

10. Нажать кнопку «Интерферо». При этом на экран монитора будет выведено разностное изображение. Система тёмных (интерференционных) полос на изображении объекта представляет собой искомую спеклограмму. С помощью полей редактирования «Яркость» и «Контраст» (с последующим нажатием кнопки «Интерферо») улучшить визуальное качество спеклограммы.

11. Задать какое-либо информативное имя и, нажав кнопку «Сохранить», зарегистрировать полученную спеклограмму на жёстком диске ЭВМ в одноимённом файле. Имя папки, куда будет записана спеклограмма, программно предопределено: C:\Deform.

12. Каждую доступную для наблюдения интерференционную полосу представить в журнале координатами нескольких точек. Координаты точки, соответствующей на спеклограмме положению курсора мыши, представлены в соответствующих полях группового блока «Координаты». Нумерация интерференционных полос ведётся от заведомо неподвижных участков объекта.

13. Нажав кнопку «Выход», завершить работу программы StatMicroDef.exe. При этом освободится память, задействованная программой.

14. По точкам, координаты которых зафиксированы в пункте П. 12, построить в аксонометрии (в произвольном масштабе) поверхность деформации. При этом рассматривать интерференционные полосы как следы пересечения искомой поверхности деформации плоскостями, проходящими на расстоянии четверти длины волны лазерного излучения друг от друга.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом относительное отверстие объектива влияет на размер пятна спекл-структуры?

2. К чему приводит увеличение относительного отверстия объектива телекамеры?

3. Как, в общих чертах, связаны между собой спеклограмма и поле механических напряжений?

4. Чем ограничено максимальное, доступное контролю, смещение точек объекта?

5. Как определить величину смещения точки, лежащей между интерференционными полосами?

6. Объясните принцип записи усредненного изображения объекта до и после деформации?

7. Как изменяется поверхность деформации в зависимости от точки приложения нагрузки?

8. Как от деформационных характеристик перейти к распределению относительных напряжений.

9. Предложите способ применения спекл-интерферометра для выделения остаточных напряжений объекта.

Лабораторная работа № 4

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ГТД

Цель работы. Получение навыков применения монитора ЭВМ вибрoneзащищенного корреляционного спекл-интерферометра для оперативного выявления собственных частот и форм колебаний лопатки ГТД.

Приборы и принадлежности: оптическая схема спекл-интерферометра с цифровой телекамерой и персональным компьютером, вибровозбудитель колебаний объекта, звуковой генератор, лопатка ГТД.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

В авиационных двигателях к числу высоконагруженных элементов конструкции относятся лопатки как турбины, так и компрессора. Одна из причин этого связана с тем, что значительная часть спектра собственных частот лопаток располагается в диапазоне, где вероятно появление возбуждающих сил высокой интенсивности. Об этом свидетельствуют факты высокочастотных усталостных разрушений лопаток при доводке и эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД).

Анализируя причины дефектов этого рода, а также разрабатывая мероприятия по борьбе с ними, необходимо четко ориентироваться в спектре собственных форм и частот колебаний лопатки. Знание собственных частот и форм колебаний обеспечивает полный вибрационный анализ конструкции в заданном частотном диапазоне.

Наиболее простым и исторически первым методом определения собственных форм нормальных колебаний объектов является метод песчаных фигур Хладни. Для этого горизонтально установленную и обезжиренную лопатку посыпают тонким слоем песка (со стороны корытца) и возбуждают вибратором, запитываемым через усилитель от звукового генератора [12]. Для определения частоты колебаний лопатки на нее предварительно наклеивается (со стороны спинки) пьезоэлектрический датчик, который соединяется с регист-

рирующим прибором (например, с осциллографом или частотомером).

При подходе к резонансу песок начинает эффективно перемещаться по лопатке, концентрируясь в узлах данной формы колебаний, то есть в тех местах, которые в процессе колебаний остаются неподвижными. После более или менее продолжительного выдерживания лопатки на резонансе на ее поверхности появляется четкая песчаная фигура, показывающая расположение узловых линий.

Малая информативность данного способа выделения собственных частот и форм колебаний лопаток, проблемность его применения для объектов с пространственной конфигурацией поверхностей привели к замене метода песчаных фигур Хладни на промышленные методы контроля и, в частности на бесконтактные методы голографической интерферометрии [2,3,7]. Задача регистрации собственных форм в исследуемом частотном диапазоне является основной при голографической диагностике колеблющихся объектов. Для возбуждения колебаний лопаток ГТД получило распространение приспособление, схема которого приведена на рисунке 1.16.

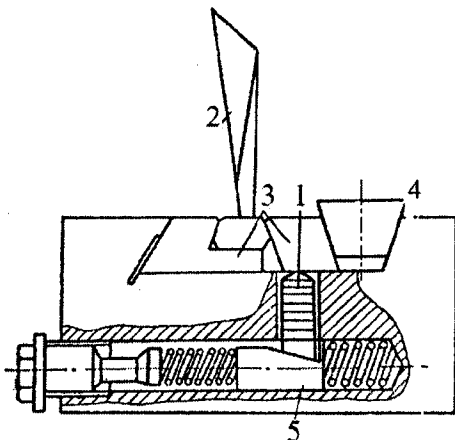


Рис.1.16. Схема универсального устройства для крепления и возбуждения колебаний лопаток компрессора и турбины: 1 – набор пьезокерамических пластин; 2 – лопатка; 3 – сменные вкладыши для зажима лопаток; 4 – стяжной клин; 5 – подвижный клин

Пьезоэлектрический возбудитель 1, встроенный в корпус приспособления, обеспечивает возбуждение резонансных колебаний лопатки 2 непосредственно через заделку 3 (без контакта с пером

лопатки).

Использование такого способа возбуждения резонансных колебаний, исключает пропуск отдельных форм, который возможен при неоптимальном расположении точки приложения возбуждающего усилия. Другим достоинством данного способа возбуждения колебаний является отсутствие влияния присоединенной массы возбуждителя на собственные частоты и формы колебаний, которое имеет место в случае контактного приложения возбуждающей силы к перу лопатки.

Для регистрации резонансных частот колебаний лопаток используется бесконтактный метод акустического зонда (рис. 1.17).

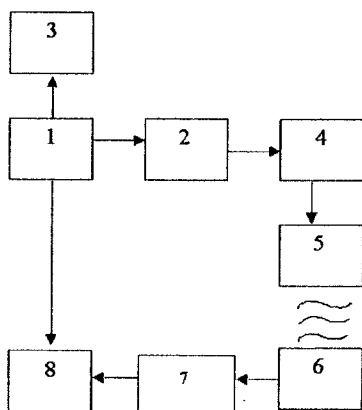


Рис. 1.17. Схема возбуждения и регистрации резонансных колебаний: 1 – звуковой генератор; 2 – усилитель; 3 – частотомер; 4 – возбуждатель колебаний; 5 – объект; 6 – микрофон; 7 – шумомер; 8 – осциллограф

Акустический сигнал отклика возбуждаемого объекта 5 от микрофона 6, установленного вблизи объекта, шумомером 7 усиливается, фильтруется третьоктавными фильтрами и фиксируется на индикаторе уровня шумомера. Микрофон должен быть установлен таким образом, чтобы его диаграмма направленности охватывала всю поверхность исследуемого объекта.

Сигнал отклика от микрофона также подается на вход электронного осциллографа 8, на который одновременно поступает сигнал от звукового генератора, задающего частоту колебания конструкции. При сканировании частоты генератора 1 в момент резо-

нанса резко возрастает уровень сигнала отклика, а на экране осциллографа наблюдается фигура Лиссажу. Резонансная частота определяется при максимальном уровне сигнала отклика.

Однако необходимость обеспечения в голографической интерферометрии виброизоляции установки, использование высоко-разрешающих регистрирующих сред, а также проблемы автоматизации голографического эксперимента потребовали дальнейшего совершенствования бесконтактных методов анализа вибрации.

В [7,13] рассмотрена возможность применения для указанной цели методов спекл-фотографии. Наибольшей простотой реализации и оперативностью отличается такой метод спекл-фотографии, где анализируемая поверхность вибрирующего объекта 4 (рис. 1.18), освещается спекл-полем, которое образовано с помощью диффузного рассеивателя 3. При возбуждении колебаний расстояние L от диффузора 3 до различных областей объекта 4 периодически изменяется в соответствии с распределением амплитуды колебаний. Соответственно изменяется и спекл-картина на поверхности объекта. Глаз или фотокамера усредняют спекл-картину по времени наблюдения. Можно показать, что если амплитуда вибрации какой-либо области объекта достаточно велика, то спекл-картина в этой области усредняется до однородной яркости. Однако, если объект вибрирует на одной из своих резонансных частот, то в областях объекта вблизи узловых линий изменение расстояния L мало и спекл-картина здесь остается неизменной.

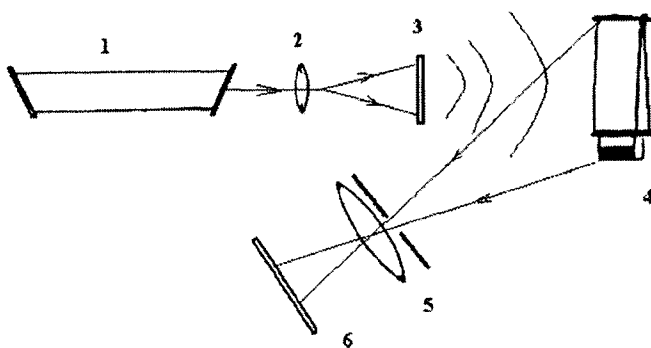


Рис. 1.18. Схема получения спекл-фотографии вибрирующего объекта с использованием диффузного рассеивателя: 1 — лазер; 2 — линза; 3 — диффузор; 4 — объект; 5 — объектив фотокамеры; 6 — фотопластинка

Таким образом, если вибрирующий объект освещается через диффузный рассеиватель, контрастная спекл-картина наблюдается только в области узловых линий его формы колебаний. Размер наблюдаемых спеклов легко можно варьировать, изменяя размер освещенной на диффузоре области или расстояние от диффузора до объекта.

На рис. 1.19 представлена одна из мод колебаний лопатки (частота вибрации 2340 Гц), зарегистрированная голографическим методом усреднения во времени и методом спекл-фотографии. Следует отметить, что при голографической записи этой моды уровень возбуждения лопатки был в 6 раз ниже, чем при регистрации методом спекл-фотографии.

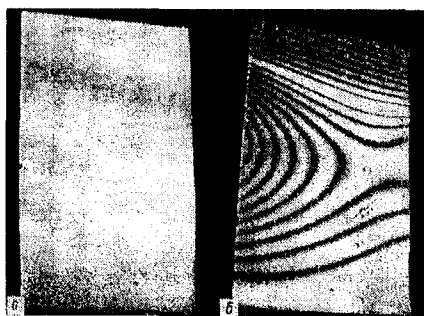


Рис. 1.19. Первая изгибная форма колебаний лопатки ГТД: а – спекл-картина, б - интерферограмма, полученная голографическим методом усреднения во времени

На рис. 1.20 показана одна из высокочастотных мод колебаний (частота 11400 Гц, отношение уровня возбуждения 6:1).

Предлагаемый для исследования мод колебаний деталей метод спекл-фотографии обладает следующими преимуществами по сравнению с методами голографической виброметрии: оперативность, возможность визуального наблюдения мод колебаний, возможность изменения в широких пределах чувствительности. Кроме того, требования к виброизоляции в этом методе такие же, как в обычной фотографии, нет необходимости использовать высокоразрешающие среды.

Однако малая информативность рассмотренного метода, трудоемкость обработки фотоматериалов не позволяют использовать его для вибродиагностики лопаток. В то же время данный метод может найти применение для предварительной настройки на резонанс.

нансные формы колебаний полноразмерных конструкций в условиях их эксплуатации. Здесь важным достоинством метода является независимость результатов от конфигурации и качества анализируемой поверхности объекта, отсутствие требований к виброзащитности установки.

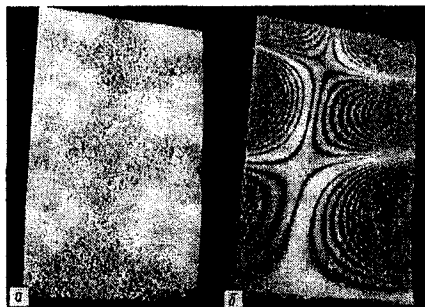


Рис. 1.20. Высокочастотная форма колебания: а – спекл-картина; б – интерферограмма, полученная голографическим методом усреднения во времени

Для оперативного выявления собственных форм нормальных колебаний лопаток ГТД получил применение оптико-электронный метод, основанный на визуальном анализе динамических спекл-картин, формируемых на экране монитора корреляционного спеклинтерферометра без использования ЭВМ.

Для рассмотрения данного метода обратимся к схеме спеклинтерферометра, представленного на рис.1.13. В соответствии со схемой на светочувствительной поверхности ПЗС-матрицы телекамеры 11 одновременно формируются изображение объекта 12 и опорный пучок со сферическим волновым фронтом.

В результате интерференции предметного и опорного пучков, а также вследствие механической нестабильности измерительной схемы все пятна, из которых состоит спекл-структура на изображении объекта, начинают мерцать с относительно низкой частотой, доступной зрительному восприятию.

Представим, что в качестве нагрузочного приспособления 13 в схеме на рис.1.13 используется вибратор с электромеханическим или пьезоэлектрическим возбудителем. Вибратор запитывается от звукового генератора (на рис.1.13 не показан).

При плавной перестройке частоты звукового генератора в момент, когда его частота совпадёт с резонансной частотой объекта

12, на поверхности объекта формируется стоячая волна, характеризующаяся наличием узловых линий, в которых амплитуда колебаний равна нулю. На изображении объекта низкочастотное мерцание пятен спекл-структуры, обусловленное механической нестабильностью измерительной схемы, сохранится лишь для точек, соответствующих местам крепления объекта и узловым линиям формы колебаний.

Наличие устойчивых мерцающих точек, объединенных в полосы на общем однородном фоне изображения, свидетельствует о возбуждении одной из форм собственных колебаний объекта и обнаруживается визуально только при получении определенных навыков оператора. Как показывает практика, погрешность определения частоты резонансных колебаний данным методом не превышает 1-2 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на спекл-интерферометре, схема которого дана на рис.1.13 и подробно изложена в экспериментальной части лабораторной работы № 1-3. Состав установки отличается лишь тем, что в качестве нагрузочного приспособления 13 используется возбудитель колебаний контактного типа, запитываемый от звукового генератора. Вибратор обеспечивает нормальные колебания объекта, т.е. колебания, ориентированные по нормали к анализируемой поверхности.

Задание. Освоить методику применения монитора ЭВМ корреляционного спекл-интерферометра для выделения узловых полос в изображении спекл-структуры поверхности колеблющегося на резонансной частоте объекта.

Порядок выполнения работы:

1. Включить лазер, телекамеру и компьютер.
2. С помощью диафрагмы телекамеры задать размеры зерен мерцающей спекл-картины на экране монитора достаточные для зрительного восприятия.
3. Включить звуковой генератор. Установить произвольную частоту возбуждения лопатки в диапазоне 500 – 2000 Гц.

4. Регулируя величину напряжения, подаваемого со звукового генератора на вибратор, установить уровень напряжения сигнала, подаваемого на вибратор, по аналоговому прибору звукового генератора так, чтобы стрелка находилась в первой четверти диапазона шкалы прибора.

5. Плавно перестраивая частоту сигнала звукового генератора в диапазоне 500 – 2000 Гц, наблюдать на экране монитора компьютера моменты перехода от контрастной спекл-картины к относительно однородному полю, связанному с эффектом размытия спеклов на резонансных частотах объекта. Убедиться, что на экране монитора происходит изменение изображения спекл-картины (рис. 1.21).

6. Выделить на фоне диффузной засветки экрана наличие узловых полос или линий.

7. Получить и зарисовать не менее трех конфигураций стоячих волн с указанием значений соответствующих им частот.

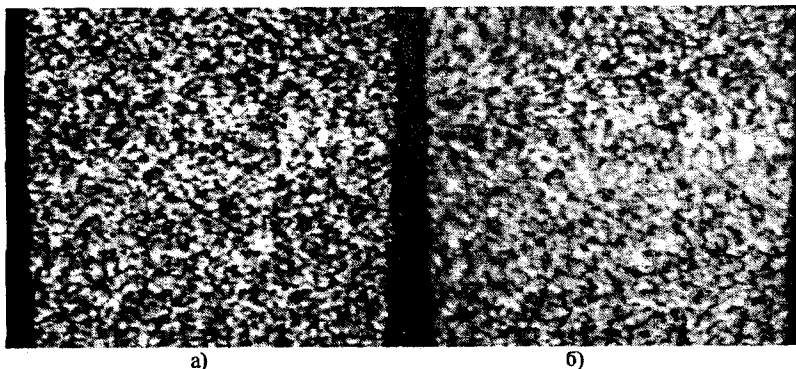


Рис. 1.21. Характерный вид изменения изображения на экране монитора спекл-структуры фрагмента поверхности пластины при переходе частоты ее колебаний с промежуточного значения - а) на резонансное- б).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему лопатки турбины и компрессора относятся к высоконагруженным элементам конструкции ГТД ?
2. Чем обусловлена актуальность определения собственных частот и форм колебания лопаток ?

3. Назовите способы определения и снижения высокочастотных усталостных напряжений, применяющиеся при доводке ГТД

4. Опишите методику определения собственных частот и форм колебаний лопатки с помощью фигур Хладни и укажите ее ограничения.

5. Какие методы голографической интерферометрии применяются для определения форм собственных колебаний лопатки? В чем их достоинства и недостатки?

6. В чем заключается методика бесконтактного определения собственной частоты колебания лопатки, применяющаяся в голографической виброметрии?

7. Опишите принцип работы предлагаемого спекл-фотографического метода оперативного определения собственных форм колебаний объекта.

8. Каков механизм низкочастотного мерцания пятен спекл-структуры неподвижного объекта в схеме спекл-интерферометра?

9. В чем заключается методика визуального выделения на экране монитора узловых линий на изображении спекл-структуры резонансно колеблющегося объекта ?

10. Поясните методику применения монитора ЭВМ корреляционного спекл-интерферометра для оперативного определения собственных частот и форм колебаний объекта.

РАЗДЕЛ 2

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ, ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ВИБРОМЕТРИИ КОНСТРУКЦИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ
к лабораторным работам № 5-12

Регистрация колебаний в цифровой спекл-интерферометрии

В цифровой спекл-интерферометрии с помощью телекамеры на экран монитора компьютерной системы регистрации выводится спекл-изображение смещающейся поверхности объекта, сложенное с когерентным опорным пучком.

Мгновенное распределение интенсивности I_t в точке (x, y) на светочувствительной поверхности телевизионной камеры имеет вид:

$$I_t(x, y) = I_r(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \times \times \cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda}F(t)], \quad (2.1)$$

где $I_r(x, y)$ и $\varphi_s(x, y)$ – интенсивность и фаза спекл-изображения исследуемого объекта; $I_s(x, y)$ и $\varphi_r(x, y)$ – интенсивность и фаза опорного пучка; $F(t)$ – функция движения объекта; λ – длина волны света лазера в интерферометре.

Это распределение усредняется за время регистрации T телевизионного кадра (стандартная частота кадров телевизионного сигнала с прогрессивной разверткой равна 25 Гц, поэтому время регистрации одного кадра составляет 40 мс).

Рассмотрим процесс регистрации простых гармонических колебаний поверхности, когда $F(t) = A(x, y)\cos(\omega t + \psi)$, где A , ω и ψ – соответственно, амплитуда, частота и фаза колебаний в точке (x, y) изображения поверхности объекта. При этом положим, что вектор чувствительности интерферометра совпадает с направлением нормали к исследуемой поверхности (т.е. направлен по оси z в системе

координат, связанной с объектом). В этом случае распределение интенсивности I на светочувствительной поверхности телевизионной камеры, усредненное по времени T формирования кадра изображения, имеет вид:

$$I(x, y) = I_r(x, y) + I_s(x, y) + \frac{2}{T} \sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \times \int_0^T \cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_s(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda} A(x, y)\cos(\omega t + \psi)] dt. \quad (2.2)$$

Яркость $B(x, y)$ изображения, наблюдаемого на экране монитора, будет пропорциональна этой интенсивности $I(x, y)$. Для того чтобы установить между ними связь в явном виде, необходимо выражение (2.2) проинтегрировать по времени формирования кадра. В результате интегрирования получим, что яркость $B(x, y)$ изображения на мониторе может быть представлена в виде:

$$B(x, y) = b\{I_r(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \times J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y)\right] \cos(\varphi_r(x, y) - \varphi_s(x, y))\}, \quad (2.3)$$

где b — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров телекамеры и устройства ввода изображений в компьютер, J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

В соответствии с выражением (2.3) наблюдаемое на экране монитора распределение яркости зависит как от интенсивностей опорного и объектного пучков света, так и от амплитуды $A(x, y)$ колебаний соответствующей точки поверхности объекта. Зависимость от амплитуды колебаний выражена через функцию J_0 Бесселя первого рода нулевого порядка.

Цифровой спекл-интерферометр с управляемым фазовым сдвигом

Обычно в цифровой спекл-интерферометрии для повышения контраста интерференционной картины, описываемой выражением (2.3), программным методом устраняют постоянную составляющую яркости, обусловленную суммой интенсивностей ($I_r + I_s$) опорного и объектного пучков [7]. Для этого регистрируют два кадра изображений вида (2.3), которые отличаются тем, что фаза опорного пучка во втором из них смещена на 180° . В большинстве интерферометров

смещение фазы интерферирующих пучков осуществляется с помощью подвижного зеркала, установленного в опорном плече интерферометра. Если, например, яркость $B_1(x,y)$ изображения в первом кадре соответствовала яркости, описываемой уравнением (2.3), то яркость $B_2(x,y)$ изображения второго кадра будет:

$$B_2(x,y) = b\{I_r(x,y) + I_s(x,y) + 2\sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)}J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}A(x,y)\right]\cos[\varphi_r(x,y) - \varphi_s(x,y) + \pi]\}. \quad (2.4)$$

Яркости изображений (2.3) и (2.4) программно вычитаются. Модуль вычитания позволяет получить на экране монитора изображение, яркость $\Delta B(x,y)$ которого записывается как:

$$\Delta B(x,y) = 4b \left| \sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)}J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}A(x,y)\right] \times \cos[\varphi_r(x,y) - \varphi_s(x,y)] \right|. \quad (2.5)$$

Из (2.5) следует, что наблюдаемая на экране монитора яркость изображения колеблющегося объекта изменяется по его поверхности в соответствии с изменением модуля функции Бесселя первого рода нулевого порядка. При этом аргументом функции Бесселя является амплитуда A колебаний точек (x,y) поверхности. Итак, яркость $\Delta B(x,y)$ интерференционной картины колеблющегося объекта можно представить как:

$$\Delta B(x,y) = 4b \cdot |B_0(x,y) \cdot M_t|, \quad (2.6)$$

где $B_0(x,y) = \sqrt{I_r(x,y)I_s(x,y)} \cos[\varphi_r(x,y) - \varphi_s(x,y)]$ - некоторая исходная яркость, зависящая в каждой точке изображения поверхности объекта как от интенсивности опорного и объектного пучков, так и от разности их фаз;

$M_t = \left| J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}A(x,y)\right] \right|$ - функция, зависящая в каждой точке изображения поверхности объекта от амплитуды колебаний этой точки.

Функцию M_t обычно называют характеристической функцией.

Для того чтобы распределение яркости $\Delta B(x,y)$ на экране монитора можно было однозначно связать через функцию Бесселя с амплитудой колебаний $A(x,y)$ необходимо, чтобы яркость $B_0(x,y)$ оставалась неизменной в течение всего времени регистрации двух кадров изображений. Яркость $B_0(x,y)$ будет стабильной в течение

этого времени, если стабильной будет разность $[\varphi_r(x, y) - \varphi_s(x, y)]$ фаз опорного и объектного пучков. Разность фаз опорного и объектного пучков будет оставаться неизменной, если в процессе регистрации не будет изменяться разность хода этих пучков. Это означает, что в течение всего времени регистрации не должно изменяться взаимное расположение оптических элементов в схеме интерферометра.

Таким образом, описанный выше метод вычитания будет работать, если обеспечена стабильность оптической схемы спекл-интерферометра. Данный метод положен в основу корреляционного цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с регулируемым сдвигом фазы [14]. Изучение принципа работы данного интерферометра, определение его возможностей и ознакомление с методикой применения проводится в ходе выполнения лабораторной работы №5.

Нестабильность оптической схемы цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) может быть обусловлена недостаточной виброизоляциями стола, на котором размещен ЦСИ, движением воздушных потоков в помещении, где он размещен, колебаниями держателей оптических элементов, возникающими при работе устройства, возбуждающего колебания исследуемой конструкции, и др.

Программный метод повышения помехоустойчивости ЦСИ

Обеспечение точности фазового сдвига в [14] предъявляет повышенные требования к вибрационной защищенности оптической схемы ЦСИ. Применяя традиционные технологии создания виброзащиты, современные ЦСИ с непрерывным лазером сохранили присутствующие еще голографическим интерферометрам недостатки, связанные с большой металлоемкостью оптического стола, находящегося на воздушных подушках, и необходимостью размещения установок в подвальных помещениях или на специальном фундаменте. Но даже в этих условиях такие технологии ограничивают возможности применения ЦСИ с усреднением во времени для получения резонансных характеристик реальных конструкций и, тем более, исследования пульсационно-вибрационных процессов возбуждения колебаний технических систем. Эти ограничения можно снять при разработке для повышения стабильности оптико-электронной схемы интерферометра новых технологий, основанных на изучении закономерностей внешних случайных возмущений и программных методах статистической обработки экспериментальной информации.

Рассмотрим, разработанный в СГАУ метод, позволяющий существенно снизить требование к механической стабильности оптической схемы ЦСИ [7]. Сущность метода заключается в том, что результирующая спеклограмма колеблющегося объекта получается в результате статистической обработки ансамбля независимых реализаций спекл-изображений колеблющегося объекта вида (2.3), полученных в условиях реальных колебаний стола интерферометра в обычном помещении. При этом разность фаз между предметным и опорными пучками во входной плоскости интерферометра изменяется случайным образом. Это позволяет эксплуатировать ЦСИ в условиях повышенных внешних динамических нагрузок.

На основе предложенного метода разработано программное обеспечение, позволяющее использовать ЦСИ при пониженной виброизоляция оптической схемы.

Рассмотрим процесс формирования спеклограммы колеблющегося объекта в памяти ЭВМ ЦСИ с усреднением по времени, при условии, что оптическая схема ЦСИ механически нестабильна.

Если объект в процессе регистрации колеблется на одной из своих резонансных частот, то на его поверхности имеются области, точки которых в процессе колебания остаются неподвижными. Эти точки объединены в линии называемые узловыми. Участки поверхности, заключённые между узловыми линиями совершают синусоидальные колебания относительно своего среднего положения. На поверхности колеблющегося объекта существуют также точки, амплитуда которых максимальна. Участки поверхности в окрестности таких точек называются пучностями.

Предположим, что в случайные моменты времени, не синхронизированные с колебаниями объекта, т.е. равновероятно распределённые по периоду колебаний, производится регистрация состояния объекта.

Выражение (2.3) показывает, что яркость спеклов $B(x,y)$ в наблюдаемом изображении изменяется по поверхности с изменением функции J_0 в зависимости от амплитуды колебаний точек объекта. Наиболее контрастные спеклы будут только в областях изображения, близких к узловым линиям, поскольку там минимальна амплитуда колебаний и, соответственно, функция J_0 близка к единице.

Так как схема интерферометра нестабильна во времени, то разность фаз $\delta\varphi = (\varphi_r - \varphi_s)$ будет в каждый момент времени случайной величиной в каждой точке (x,y) изображения поверхности. Тогда наблюдаемое на экране монитора, усредненное за время регистра-

ции кадра изображение объекта, вибрирующего на резонансной частоте, будет описываться выражением:

$$B(x, y) = b\{ \langle I(x, y)_s \rangle + \langle I_r(x, y) \rangle + 2\sqrt{\langle I_s(x, y) \rangle \cdot \langle I_r(x, y) \rangle} \times J_0\left[\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda}\right] \langle \cos \delta\varphi(x, y) \rangle \}, \quad (2.7)$$

где скобки $\langle \rangle$ означают усреднение по времени. При этом, поскольку $\delta\varphi$ величина, случайно изменяющаяся во времени в диапазоне $[-\pi, +\pi]$, то функция $\langle \cos \delta\varphi \rangle$ также случайная величина, распределенная в диапазоне $[-1, 1]$. Из формулы (2.7) видно, что информацию о форме колебаний содержит только произведение:

$$J_0\left[\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda}\right] \langle \cos \delta\varphi(x, y) \rangle. \quad (2.8)$$

Причем яркость B в точке (x, y) изображения может принимать в зависимости от фазы $\delta\varphi$ любое значение в пределах, зависящих от значения функции Бесселя, аргумент которой привязан к амплитуде вибрации A соответствующей точки (x, y) на изображении объекта.

В тех точках изображения, где функция Бесселя равна нулю, средняя за период собственных колебаний объекта яркость не зависит от фазы $\delta\varphi$, и равна средней интенсивности по изображению. В остальных точках изображения при случайном изменении фазы $\delta\varphi$ в интервале $[-\pi, +\pi]$ яркость изображения изменяется симметрично относительно среднего значения в некотором интервале, ширина которого определяется локальным значением функции Бесселя в этой точке.

Числовые значения k_i аргумента функции Бесселя, при которых она обращается в нуль, называются корнями функции Бесселя (а индекс i — номером корня). Значения k_i заранее известны, например, $k_1=2.40$; $k_2=5.52$; $k_3=8.65$; $k_4=11.79$ и т.д. Множество точек изображения, в которых функция Бесселя, описывающая форму резонансных колебаний объекта (2.8), принимает нулевое значение, соответствующее определенному k_i , представляет собой линию равных амплитуд.

Приравнивая аргумент функции Бесселя числовым значениям её корней, получим семейство кривых, в совокупности представляющих собой топографическую карту (спеклограмму) формы собственных колебаний объекта:

$$A_i = \frac{k_i}{4\pi} \cdot \lambda. \quad (2.9)$$

Амплитуда колебаний точек изображения, находящихся между топографическими линиями (полосами), может быть найдена линейной интерполяцией.

Для повышения видности полос, постоянную составляющую спекл-изображения в уравнении (2.7) убирают методом вычитания двух спекл-изображений. Для разности двух кадров изображения распределение яркости в точке (x, y) будет иметь вид:

$$\Delta B = b \left| \sqrt{I_s \cdot I_r} \cdot J_0 \left(\frac{4\pi A}{\lambda} \right) \cdot \langle \cos \delta\phi \rangle \right| \quad (2.10)$$

При этом, как уже отмечалось, значение яркости в нулях функции Бесселя будет равняться 0 и не зависит от случайной разности фаз $\delta\phi$.

В качестве примера рассмотрим колебание плоского недеформируемого объекта (рис.2.1а) длиной L , который периодически поворачивается относительно неподвижной оси Ox с частотой, превышающей частоту кадровой развертки видеокамеры.

Наиболее удаленная от оси Ox кромка объекта колеблется с амплитудой A . Форма колебаний представляется зависимостью амплитуды от координаты x :

$$A(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{A}{L} \cdot x. \quad (2.11)$$

Распределение яркости $B(x)$ в спекл-изображении, зарегистрированном в соответствии с формулой (2.7), для некоторой случайной разности фаз $\delta\phi$ приведено на рис.2.1б. Естественно, что для другой разности фаз $\delta\phi$, распределение яркости будет лежать в других границах. На рис.2.2а показаны границы (огibaющие) яркости $B(x)$ при случайном изменении фазы одного из интерферирующих пучков.

На рис.2.1в приведено распределение яркости $\Delta B(x)$, которое в соответствии с (2.10) можно получить в результате вычитания яркости двух спекл-изображений вида (2.7).

Из рис.2.1 следует, что:

- все возможные реализации пространственной зависимости яркости изображения лежат между огibaющими кривых, описываемых выражением:

$$B = b \cdot [I_s + I_r \pm 2\sqrt{I_s \cdot I_r} J_0 \left(\frac{4\pi A}{\lambda} \right)]; \quad (2.12)$$

- наибольший диапазон изменения (размах) яркости при изменении разности фаз опорного и объектного пучков в интервале $[-\pi, +\pi]$ соответствует неподвижным точкам на поверхности объекта, лежащим на оси Ox поворота пластины;
- размах яркости уменьшается с ростом амплитуды колебаний, и его ширина определяется локальными значениями функции Бесселя, соответствующими ее аргументу $4\pi A/\lambda$;
- в точках изображения, соответствующих корням k_i функции Бесселя, яркость не изменяется и не зависит от разности фаз опорного и объектного пучков.

Полученные результаты анализа позволили разработать алгоритм работы автоматизированного помехоустойчивого ЦСИ для регистрации формы собственных колебаний объекта в виде следующей последовательности операций:

1. Зарегистрировать достаточно большое число изображений, распределение яркости B_i в которых описывается выражением (2.7). Яркости этих изображений будут укладываться в интервал, ограниченный выражением (2.12) (см. рис.2.2а).
2. Парно в произвольном порядке вычитать яркости полученных изображений друг из друга в соответствии с (2.10). Результатом вычитания будет некоторая функция:

$$\Delta(x, y)_i = B(x, y)_i - B(x, y)_{i+1}. \quad (2.13)$$

3. Эти разности просуммировать в числовом массиве:

$$relief(x, y) = \sum_i |\Delta(x, y)_i|. \quad (2.14)$$

Результатом суммирования будет некоторая положительная функция $relief(x, y)$, имеющая заметные провалы яркости $B=0$ в окрестности нулей функции Бесселя.

Эта функция изображена графически на рис. 2.2б. Относительная глубина этих провалов зависит от количества зарегистрированных изображений.

4. Каждому элементу полученного массива значений $relief(x, y)$ присвоить соответствующее значение яркости в интервале от 0 до 255.

$$B(x, y) = \left[\frac{relief(x, y)}{relief(x, y)_{\max}} \cdot 255 \right] \quad (2.15)$$

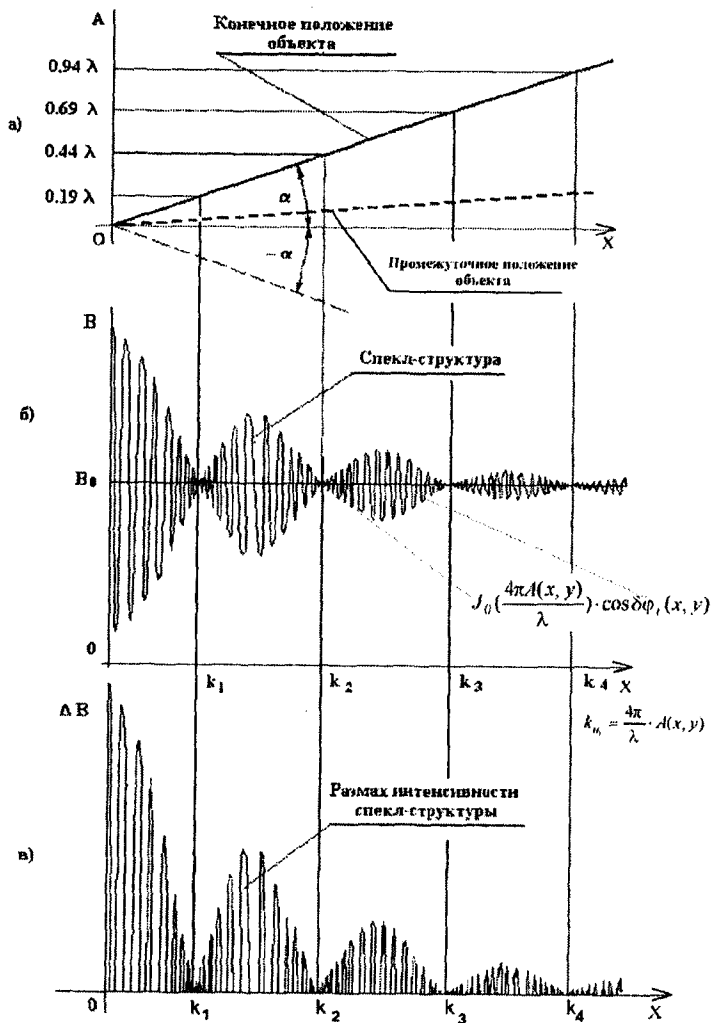


Рис. 2.1. К механизму формирования спеклограммы колеблющейся плоской недеформируемой пластины: а – пластина, периодически поворачивающаяся на угол α ; б – распределение яркости $B(x)$ в спекл-изображении; в – распределение разностного значения яркости $\Delta B(x)$ по модулю; $k_1 - k_4$ – корни функции Бесселя J_0 ; A – амплитуда колебаний пластины

Множитель 255 обусловлен тем, что в рассматриваемом алгоритме цветовая информация не используется. Оптико-электронная регистрация изображения осуществляется в режиме градации серого, в котором для кодировки яркости элемента изображения отводится один байт. Поэтому в интервале от чёрного до белого возможны 255 градаций яркости.

5. На экране ЭВМ тёмным цветом отобразить точки, в которых функция $relief(x,y)$ не превышает некоторого заранее заданного порога h . Порог h введен для того, чтобы исключить общую для всего изображения вариацию яркости, обусловленную нестабильностью измерительной схемы (см. рис.2.2в).

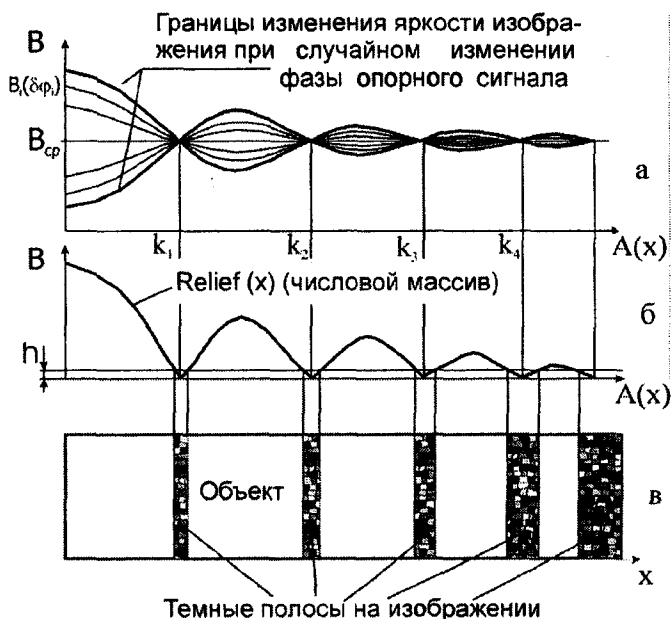


Рис. 2.2. Принцип работы алгоритма помехоустойчивого спекл-интерферометра: $A(x)$ – изменение амплитуды вдоль длины X пластины; $k_1 - k_4$ – корни функции Бесселя J_0 ; h – порог яркости

В результате такой обработки некоторого числа спекл-картин колеблющегося объекта на спеклограмме объекта появится семейство полос, которые можно интерпретировать как линии равных амплитуд формы собственных колебаний.

При применении программного обеспечения, основанного на

предложенном алгоритме, нестабильность условий измерения становится положительным фактором (естественным образом рандомизирует экспериментальные результаты) и позволяет существенно снизить требования к условиям проведения вибрационного контроля объектов.

Регистрация колебаний с помощью программы «Форма колебаний»

Для реализации описанного алгоритма обработки спекл-изображений вибрирующих объектов была создана программа «Форма колебаний». Данная программа позволяет покадрово отслеживать процесс накопления статистической информации непосредственно на экране монитора. При достижении необходимого для получения качественной спеклограммы количества кадров пользователь имеет возможность остановить процесс накопления и записать полученную спеклограмму на жесткий диск ПК в виде графического файла в формате Windows bit map (BMP).

Блок-схема работы программы «Форма колебаний» приведена на рис. 2.3.

Программа реализует следующие операции:

- запоминается в памяти ЭВМ оптическое изображение объекта, сложенное с когерентным фоном;
- очередное изображение объекта заносится в память ЭВМ через интервал времени, превышающий максимальный период случайных колебаний измерительной схемы;
- вычисляется разность предыдущего и последующего изображений;
- квадрат разности накапливается в числовом массиве;
- численное значение элементов числового массива сравнивается с заранее заданной пороговой величиной;
- из элементов массива, числовое значение которых не превышает пороговой величины, строится текущее результирующее изображение.

При достижении удовлетворительного качества результирующего изображения процесс накопления информации прерывается оператором, а результирующее изображение в форме графического файла запоминается для дальнейшего анализа и использования.

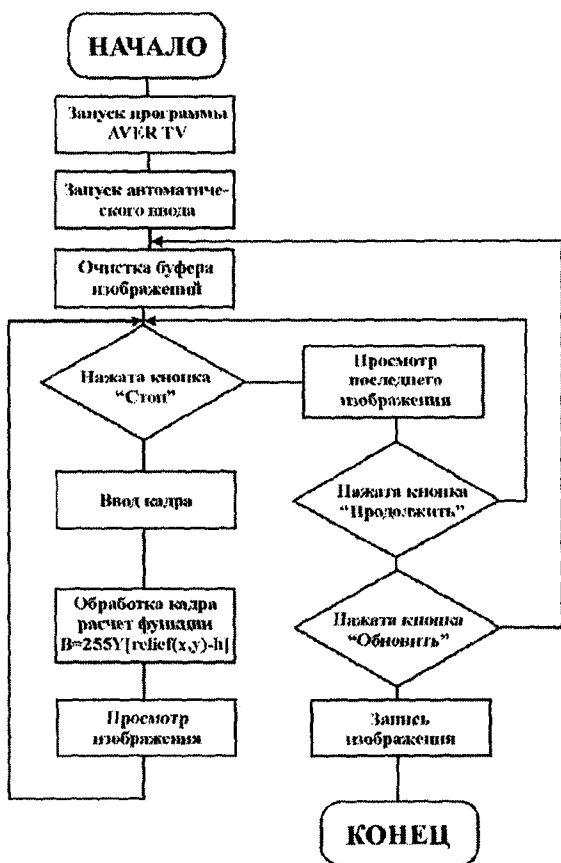


Рис.2.3. Блок-схема работы программы «Форма колебаний»

Опыт эксплуатации помехоустойчивого ЦСИ, размещенного на 4-ом этаже, показывает, что для получения спеклограммы формы резонансных колебаний объекта в условиях нестабильности оптической схемы интерферометра, необходимо обработать от 3 до 5 кадров спекл-изображения.

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА С РЕГУЛИРУЕМЫМ СДВИГОМ ФАЗЫ

Цель работы. Изучение оптико-электронной схемы и принципа работы цифрового корреляционного спекл-интерферометра с регулируемым сдвигом фазы, ознакомление с системой компьютерной регистрации интерференционных картин, исследование колебаний объектов.

Оборудование: цифровой спекл-интерферометр (ЦСИ), звуковой генератор ГЗ-33, пьезоэлектрический возбудитель колебаний, модельный объект.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электронно-оптическая схема корреляционного спекл-интерферометра

Электронно-оптическая блок-схема цифрового спекл-интерферометра приведена на рис.2.4. Излучение лазера 1 расширяется линзой 3 и освещает поверхность исследуемого объекта. В качестве объекта исследования 9 используется рабочая лопатка компрессора ВРД. Лопатка по ножке зажата в тиски и размещена на виброизолированной платформе 19 интерферометра.

С помощью объектива 8 на светочувствительной поверхности телекамеры 11 формируется сфокусированное изображение лопатки, освещенной лазерным пучком. Изображение лопатки покрыто спеклами, размер которых зависит от диаметра отверстия диафрагмы объектива 8 телекамеры. Размер отверстия диафрагмы подбирается таким, чтобы телекамера 11 разрешала спекл-структуру. На пути расширенного объектного пучка установлена плоскопараллельная пластина 7, которая часть излучения направляет в опорный пучок. Опорный пучок проходит через поляризационный светофильтр 6 и, отражаясь от сферического зеркала 5, вновь проходит через светофильтр. После светоделительной пластины 7 опорный пучок направляется в объектив 8 телекамеры 11. Радиус сферического зеркала 5 в опорном плече подобран таким, что опорный пучок фокусируется точно в плоскости диафрагмы объектива 8 и при этом

полностью освещает чувствительную поверхность телекамеры 11. Поляризационный светофильтр 6 позволяет установить интенсивность опорного пучка на уровне (или несколько меньше) интенсивности объектного. Сферическое зеркало 5 в опорном пучке может перемещаться вдоль оси опорного пучка на малое расстояние. Осуществляется это с помощью подвижного элемента электромагнитной катушки 10, который упирается в держатель зеркала. При изменении напряжения питания электромагнита, подвижный элемент сдвигает зеркало на малую величину, при этом фаза опорного пучка в плоскости чувствительного элемента телекамеры изменяется в пределах $(-\pi, \pi)$.

Для возбуждения резонансных колебаний лопатки 9 используется пьезоэлектрический вибратор 14. Он представляет из себя набор пьезокерамических пластин, стянутых в металлическом корпусе. При подаче на пьезокерамику напряжения питания от звукового генератора 13 колебания пластин с помощью толкателя, который упирается в перо лопатки вблизи ее заделки, передаются лопатке. Уровень возбуждения колебаний устанавливается величиной напряжения, подаваемого со звукового генератора.

Для повышения точности определения резонансной частоты колебания объекта применяется пьезоэлектрический датчик 4. Датчик имеет малые размеры (диаметр ~ 8 мм) и наклеен на спинку лопатки. При колебаниях лопатки он вырабатывает электрический сигнал, уровень которого зависит от амплитуды колебаний лопатки, а частота совпадает с частотой ее колебаний. Этот сигнал поступает на электронный осциллограф 18. На экране осциллографа сигнал от пьезоэлемента 4 развернут в вертикальном направлении. На осциллограф 18 поступает также сигнал от звукового генератора 13, возбуждающего колебания лопатки. На экране он развернут по горизонтали. В результате на экране осциллографа наблюдается фигура Лиссажу, которая позволяет контролировать отношение сигнала отклика к сигналу возбуждения колебаний. При сканировании частоты возбуждения колебаний лопатки в момент резонанса происходит резкое возрастание сигнала отклика.

Изображение с телевизионной камеры 11, на чувствительной поверхности которой спекл-изображение лопатки складывается с однородным фоном опорного пучка, можно непосредственно наблюдать на экране телемонитора 12. Это изображение с помощью специального модуля 16 также вводится в персональный компьютер. Модуль 16 обеспечивает разбиение вводимого кадра с изобра-

жением на 640x480 точек с 256 градациями по яркости.

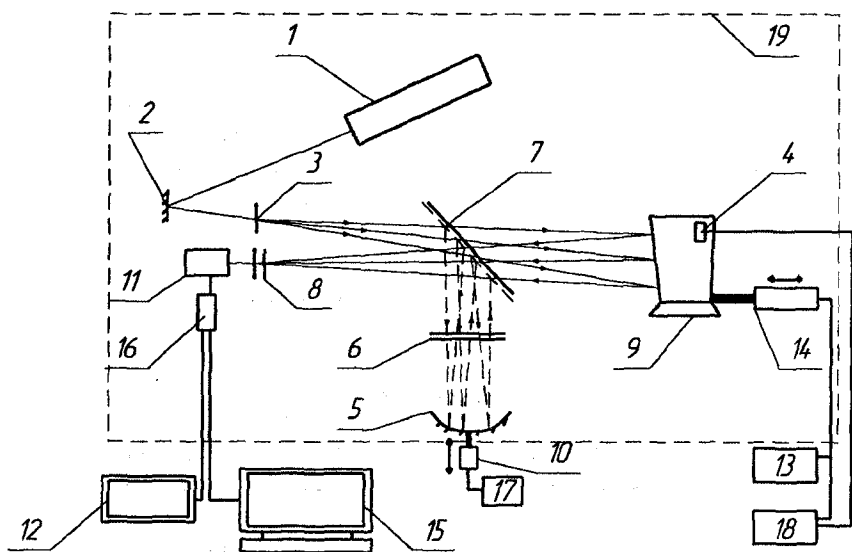


Рис.2.4. Цифровой спекл-интерферометр с регулируемым сдвигом фазы.

1 -гелий-неоновый лазер; 2 - поворотное зеркало; 3 - рассеивающая линза; 4 - пьезоэлемент; 5 - сферическое зеркало; 6 - поляризационный светофильтр; 7 - светоделительная пластина; 8 - объектив телекамеры с диафрагмой; 9 - исследуемый объект; 10 - электромагнитный привод; 11 - телекамера; 12 - монитор; 13 - генератор звуковой; 14 - возбудитель колебаний; 15 - ПЭВМ; 16 - блок питания телекамеры; 17 - блок управления электромагнитным приводом; 18 - осциллограф; 19 - стол голографический от установки УИГ-22

Цифровой корреляционный спекл-интерферометр работает следующим образом. В плоскости чувствительного элемента телекамеры спекл-изображение лопатки складывается с однородным фоном, образованным опорным пучком. Результирующая интенсивность I изображения в некоторой точке (x,y) чувствительной поверхности телекамеры может быть записана, согласно выражениям (1.2) и (2.1), как

$$I = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(\varphi_r - \varphi_s), \quad (2.16)$$

где I_s и I_r , φ_s и φ_r - соответственно интенсивность и фаза спекл-поля и когерентного фона в точке (x,y) .

Малое изменение положения поверхности лопатки приводит к

изменению результирующей интенсивности - "мерцанию" спеклов.

При колебаниях поверхности телекамера усредняет "мерцающую" картину спеклов за время считывания кадра (40 мс). Яркость B наблюдаемого на экране телемонитора усредненного спекл-изображения лопатки будет описываться, согласно выражению (2.7), в виде:

$$B = b(\langle I_s \rangle + \langle I_r \rangle + 2\sqrt{\langle I_s \rangle \langle I_r \rangle} J_0\left(\frac{4\pi A}{\lambda}\right) \cos(\varphi_r - \varphi_s)), \quad (2.17)$$

где $\langle \rangle$ означает усреднение интенсивности по времени.

Выражение (2.17) показывает, что интенсивность спеклов в наблюдаемом изображении изменяется по поверхности с изменением функции J_0 в зависимости от амплитуды A колебаний точек лопатки. Но из-за того, что значения экстремумов функции Бесселя незначительно отличаются от нуля (за исключением первого максимума, который равен 1), контраст этих изменений незначителен. Спеклы будут наблюдаться только в областях изображения, близких к узловым линиям, где функция J_0 близка к единице. В остальных областях изображения спекл-картина практически наблюдаться не будет на фоне однородной яркости $\langle I_s \rangle + \langle I_r \rangle$.

Видность наблюдаемой картины можно несколько повысить, если стационарную картину (2.17) перевести в динамическую. Для этого необходимо с небольшой частотой (3-6 Гц) изменять фазу спеклов. Управляя фазой опорного пучка с помощью перемещения зеркала в опорном пучке, можно наблюдать "мерцание" спеклов в области узловых линий [7,14].

Это также дает достаточно простой метод настройки вибрирующего объекта на резонанс и оценки уровня его возбуждения по величине области "мерцания" (см. лабораторную работу №4). При сканировании частоты возбуждения лопатки спеклы, "мерцающие" и видимые по всей поверхности объекта, в момент достижения резонанса размываются, оставаясь заметными только в области узлов. Однако какие-либо количественные расчеты амплитуд вибраций, кроме определения формы колебания, при этом невозможны.

Для получения более контрастной интерференционной картины применяется метод вычитания изображений. Для этого изображение, яркость которого описывается согласно выражению (2.17) заносится в память компьютера. Фаза опорного пучка сдвигается на 180° . На экране монитора при этом наблюдается интерференционная картина аналогичная первой, но на месте "светлых" спеклов

размещаются "темные", и наоборот. Это изображение также заносится в память компьютера. Соответствующая программа позволяет второе изображение вычесть из первого, записанного ранее и хранящегося в памяти. Модуль результата вычитания выводится на дисплей в виде распределения яркости вида (2.5) и представляет собой изображение интерференционной картины.

Контраст полученных таким образом интерференционных полос достаточно велик, что позволяет не только определить форму колебания лопатки, но и оценить уровни амплитуд колебания всех точек ее поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание. Освоить методику применения виброизолированного ЦСИ для регистрации спекл-интерферограмм колеблющихся объектов

Порядок выполнения работы:

1. Проверить наличие виброизоляции рабочего стола ЦСИ относительно корпуса установки. В данной установке рабочий стол ЦСИ должен опираться на 4-е воздушные подушки, не касаясь корпусных элементов конструкции.

2. В соответствии с инструкцией по эксплуатации включить лазерный источник излучения 1 (см. рис.2.4), телевизионную камеру 11, звуковой генератор 13, блок управления фазой опорного пучка 17 и загрузить персональный компьютер 15. На телемониторе должно наблюдаться изображение лопатки компрессора 9, покрытое спеклами.

3. Проверить работоспособность узла регулирования сдвига фазы ЦСИ. Для этого, варьируя напряжение питания, подаваемого с блока управления 17 на электромагнитный привод 10, обеспечить регулируемое смещение подвижного зеркала 5 в опорном плече интерферометра. При этом необходимо наблюдать изменение спекл-структуры на изображении лопатки.

4. Подать напряжение питания со звукового генератора 13 на возбудитель колебаний 14. Сканировать частоту возбуждения колебаний лопатки до момента наступления резонанса. Если звуковой генератор 13 настроен на одну из резонансных частот колебаний лопатки, то на ее изображении спекл-картина должна потерять контрастность (размыться) за исключением узловых областей формы колебания. Регулируя напряжение питания возбудителя 14, установить такой уровень возбуждения колебаний, чтобы четко просматривались

ривалась конфигурация узловых полос заданной формы колебаний. Зарегистрировать частоту и уровень возбуждения. Повторить процесс настройки на резонанс, наблюдая фигуру Лиссажу на экране осциллографа 18 (см. лабораторную работу №4).

5. Установить постоянную фазу опорного пучка и в соответствии с инструкцией по эксплуатации спекл-интерферометра записать в память компьютера изображение колеблющейся лопатки.

6. Сместить фазу опорного пучка на 180° , изменив напряжение питания, подаваемое с блока управления 17 на электромагнитный привод 10. Контроль смещения зеркала 5 осуществить визуально по какому-либо спеклу на изображении лопатки на мониторе 12.

7. Записать в память компьютера второе спекл-изображение лопатки.

8. В соответствии с инструкцией пользователя программой регистрации спекл-интерферограмм вычесть второе изображение из первого и вывести результат вычитания на дисплей.

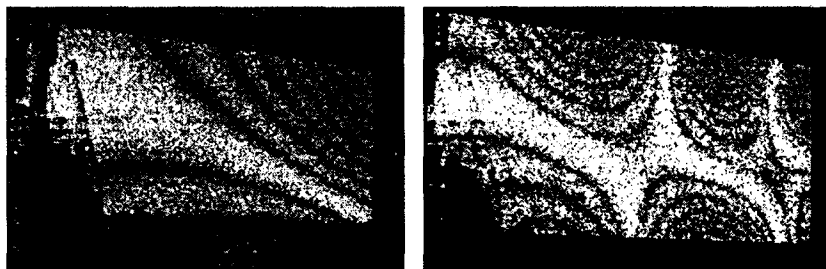


Рис. 2.5. Характерный вид получаемых спекл-интерферограмм лопатки, вибрирующей на резонансной частоте

9. По интерференционной картине на дисплее установить форму колебания лопатки. Оценить максимальную амплитуду колебания.

На рис. 2.5 дан характерный вид спекл-интерферограмм, полученных для двух значений резонансных частот

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличие “объективного” спекла от “субъективного”? Какие спеклы используются для регистрации колебаний в изучаемом спекл-интерферометре?

2. Оцените размеры спеклов в используемом интерферометре?
3. Что происходит со спеклами, если поверхность, которой они образованы, смещается? Изменяется ли при этом размер спеклов?
4. Какие изменения претерпевает спекл-картина, если объект вибрирует на резонансной частоте? Как изменится спекл-картина, если вибрация происходит на не резонансной частоте?
5. С какой целью производится изменение фазы опорного пучка при наблюдении спекл-картины, образованной вибрирующим объектом?
6. Что такое контраст спекл-интерферограммы? Какие способы повышения контраста спекл-интерферограмм вы знаете?
7. Что значит записать спекл-изображение в память компьютера?
8. Что получают на экране монитора в результате вычитания двух спекл-картин вибрирующего объекта?
9. Как определить относительное распределение амплитуд колебания объекта по интерференционной картине?
10. Как рассчитать амплитуду колебания точки поверхности объекта?
11. Почему в данной установке требуется виброизоляция рабочего стола?

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Цель работы. Изучение спекл-интерферометрического метода регистрации собственных форм и частот колебаний объектов; изучение оптико-электронной схемы и принципа работы помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ), получение навыков работы на помехоустойчивом ЦСИ.

Оборудование: помехоустойчивый ЦСИ, звуковой генератор ГЗ-33, пьезоэлектрический возбудитель колебаний, модельный объект.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Электронно-оптическая схема помехоустойчивой цифровой спекл-интерферометра

Оптическая схема помехоустойчивого ЦСИ принципиально не отличается от схемы интерферометра с регулируемым сдвигом фазы (см. лабораторную работу №5). Однако применение разработанного в СГАУ алгоритма повышения помехоустойчивости интерферометра и создание соответствующего программного обеспечения позволили отказаться от управляемого сдвига фазы. Это значительно упростило оптическую схему ЦСИ, расширило возможности автоматизации измерительного процесса и увеличило круг решаемых исследовательских задач.

Электронно-оптическая схема помехоустойчивого ЦСИ приведена на рис.2.6. Оптическая схема включает в себя He-Ne лазер 1 непрерывного излучения; оптический пространственный фильтр, состоящий из микрообъектива 2 и точечной диафрагмы 3; светоделитель 4; плоскопараллельную пластину 5; поворотные глухие зеркала 6, 7, 8; линзу 9 и нейтральный светофильтр 10.

Исследуемый объект 11, установленный на платформе интерферометра возбуждается вибратором 16. Вибратор 16 имеет механический контакт с объектом 11 и электрически подключен к выходу звукового генератора 15. В общую схему экспериментальной установки помимо элементов, составляющих, собственно, интерфе-

рометр, входят: цифровая телевизионная камера 12, персональный компьютер 13 с блоком 14 ввода изображения AVER TV.

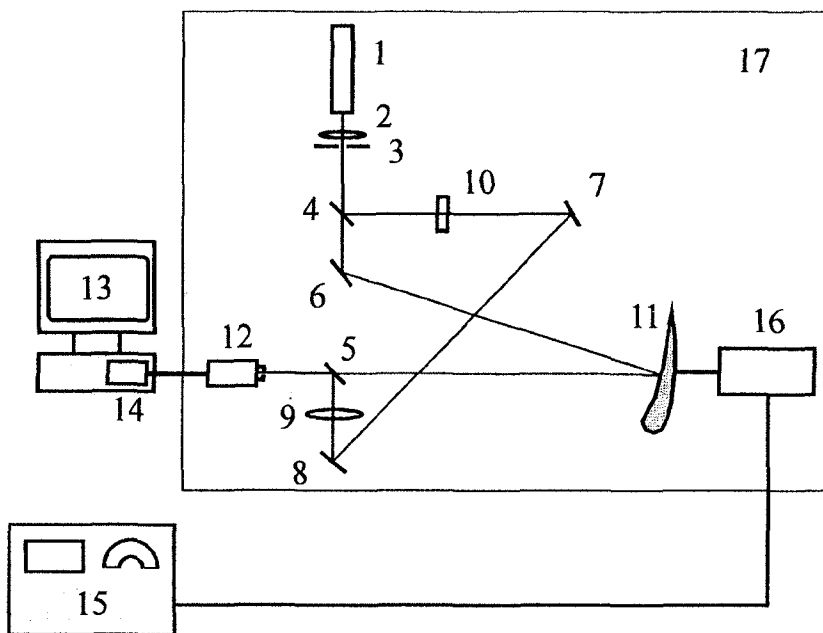


Рис. 2.6. Схема помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра: 1-лазер; 2-микрообъектив; 3-точечная диафрагма; 4-светоделитель; 5-плоскопараллельная пластина; 6,7,8-поворотные зеркала; 9-линза; 10-светофильтр; 11-объект; 12-телекамера с объективом; 13-ПЭВМ; 14-блок ввода изображения; 15-звуковой генератор; 16-вибратор; 17-оптический стол без виброизоляции

Излучение лазера 1 фокусируется микрообъективом 2 в плоскость точечной диафрагмы 3 и с помощью светоделителя 4 расщепляется на два пучка: один (предметный) направляется глухим зеркалом 6 на объект, другой (опорный) с помощью глухих зеркал 7, 8 и плоскопараллельной пластины 5 направляется в объектив телекамеры 12. Микрообъектив 2 и точечная диафрагма 3 служат для фильтрации помех, обусловленных дифракцией света на частицах пыли, царапинах и других дефектах выходных элементов лазера 1 и, одновременно, для углового расширения лазерного излучения. Линза 9, установленная между зеркалом 8 и пластиной 5, фокусирует световой поток опорного пучка в плоскость апертурной диафрагмы объектива телекамеры 12 и может менять фокусное расстоя-

ние в зависимости от удаленности исследуемого объекта от телекамеры 12.

Нейтральный светофильтр 10, установленный в опорном пучке, позволяет установить оптимальное соотношение интенсивностей предметного и опорного сигналов. Телевизионный сигнал с выхода телекамеры 12 подаётся на вход блока 14 ввода изображения AVER TV, подключенного к персональному компьютеру Pentium 4.

На светочувствительной поверхности ПЗС матрицы телекамеры 12 одновременно формируются изображение объекта 11 и однородный опорный когерентный фон со сферическим волновым фронтом. В результате интерференции предметного и опорного пучков, а также вследствие нестабильности оптической схемы интерферометра, все пятна, из которых состоит спекл-структура на изображении объекта, начинают мерцать с относительно низкой частотой, доступной зрительному восприятию.

При подаче напряжения на вибратор 16 и плавной перестройке частоты генератора 15 в момент, когда его частота совпадёт с резонансной частотой объекта 11, на поверхности объекта формируется стоячая волна, характеризующаяся наличием узловых линий, в которых амплитуда колебаний равна нулю. При этом частота мерцания пятен спекл-структуры совпадает с резонансной и становится недоступной восприятию относительно инерционному глазу человека. На изображении объекта низкочастотное мерцание пятен спекл-структуры, обусловленное нестабильностью измерительной схемы, сохранится лишь для точек, соответствующих местам крепления объекта и узловым линиям формы колебаний.

Наличие устойчивых мерцающих точек, объединенных в полосы, на общем однородном фоне изображения свидетельствует о возбуждении одной из форм собственных колебаний объекта и достаточно легко обнаруживается визуально.

Помехоустойчивый ЦСИ размещается на оптическом столе голографической установки УИГ-22. Для обеспечения случайного сдвига фазы, которое в данной установке играет положительную роль, необходимого оптический стол взвесить на регулируемых опорах, имеющих высоту, превышающую толщину воздушных подушек.

Рассмотрим характеристики функциональных элементов помехоустойчивого ЦСИ.

1. В качестве излучателя используется одномодовый He-Ne лазер ГН-15-1. Основные характеристики лазера приведены в табл.2.1. Данный лазер обладает компактными габаритами, не требует специального охлаждения. Выходная мощность излучения лазера составляет 15 мВт. Данный уровень мощности является достаточным для регистрации колебаний объектов с размерами 200x200 мм.

Таблица 2.1

Основные рабочие характеристики лазера

Мощность излучения, мВт	Спектральный состав	Поляризация	Диаметр пучка, мм, не более	Расходимость, мрад, не более
15.0	TEM ₀₀	100:1	1.5	1.2

2. Система транспортировки излучения состоит из оптических элементов и их держателей с юстировочными узлами, входящими в состав голографической установки УИГ-22 (табл.2.2 и 2.3).

Таблица 2.2

Состав оптических элементов

№	Наименование элемента	Количество, шт	Примечание
1	Микрообъектив	1	
2	Светоделительная пластина	1	Для $\lambda=0,63$ мкм
3	Зеркала	3	Для $\lambda=0,63$ мкм
4	Светофильтры, HC5-HC9	4	
5	Фокусирующая линза	1	Для $\lambda=0,63$ мкм
6	Плоско-параллельная пластина	1	Для $\lambda=0,63$ мкм
7	Микродиафрагма	1	

Таблица 2.3

Держатели оптических элементов

№	Наименование элемента	Кол-во, шт	Примечание
1	Держатель микрообъектива	1	В комплекте оптического стола УИГ-22
2	Держатель светоделительной пластины	1	-/-
3	Держатели зеркал	3	-/-
4	Держатель светофильтра	1	-/-
5	Держатель фокусирующей линзы	1	-/-

6	Держатель плоско-параллельной пластины	1	-//-
	Держатель телевизионной камеры	1	-//-

3. Система регистрации состоит из телевизионной камеры, фотографического объектива и блока ввода изображений в ПЭВМ. Для регистрации спекл-изображений объекта используется телевизионная камера типа WAT-902H японской компании Watec. Камера обеспечивает регистрацию в стандартном телевизионном формате 25 кадр/с. Ее основные технические характеристики приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Характеристики телевизионной камеры

№	Наименование параметра	Характеристика
1	Размер ПЗС матрицы, дюймов	½
2	Рабочее разрешение, пикс	752x582
3	Разрешение, ТВЛ	570
4	Управляемый затвор, время срабатывания, с	1/60-1/100000
5	Светочувствительность, лк	0,003

Телекамера имеет фотографический объектив МИР-1В с фокусным расстоянием 37 мм. Встроенная ирисовая диафрагма объектива за счет изменения диаметра D выходного отверстия обеспечивает возможность регулирования характерного размера ϵ спекла ($\epsilon \sim D^{-1}$).

Для регистрации цифрового изображения в ПЭВМ используется плата ввода видеоизображения AVER TV, позволяющая записывать видеоизображение в формате AVI, (25 кадр/с) на жесткий диск ПЭВМ, а также регистрировать отдельные кадры изображения в формате BMP с периодичностью 1 кадр/с AVER TV имеет возможность внешнего управления от ПЭВМ.

Применение специально разработанного для платы AVER TV программного обеспечения «Форма колебаний» (см. теоретическое введение, раздел 2) позволяет проводить автоматизированную регистрацию колеблющегося объекта. Обработка зарегистрированных данных осуществляется персональным компьютером Pentium 4-1500 МГц, с оперативной памятью 256 Мб и доступным пространством жесткого диска 10 Гб.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Освоить технику регистрации спеклограмм форм колебаний пластины с помощью пемохоустойчивого ЦСИ.

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе цифровой спекл-интерферометр (закрепить в зажимном приспособлении установки модельный объект – пластину и ввести в контакт с ней толкатель пьезоэлектрического возбудителя).

2. Включить лазер, персональный компьютер и цифровую телекамеру.

3. Загрузить программу TVCapture98. На экране монитора появится спекл-изображение исследуемой пластины.

4. Включить звуковой генератор.

5. Подать напряжение питания на возбудитель колебаний и, сканируя частоту колебаний звукового генератора в заданном преподавателем диапазоне частот, по интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора, определить одну из резонансных частот колебаний пластины. При достижении резонансной частоты на мониторе на изображении пластины должны появиться протяженные области с контрастными мерцающими спеклами. Момент резонанса соответствует минимальной ширине этих областей.

6. Зарегистрировать резонансную частоту и уровень напряжения, подаваемого на возбудитель колебаний.

7. Загрузить программу «Форма колебаний». Щелчком левой кнопки мыши нажать кнопку «Начать» на поле программы. Программа начнет захват и обработку кадров изображений. Имя захваченного кадра будет отображаться в нижнем окне группового поля «Обработано кадров». В верхнем окне поля «Обработано кадров» будет отображаться число обработанных кадров. После обработки первых двух кадров на поле программы появится изображение текущего вида спеклограммы. Вид спеклограммы будет изменяться с ростом числа обработанных кадров. Нажав кнопку «Остановить» можно прекратить процесс обработки. При нажатии кнопки «Сохранить» спеклограмма будет сохранена в виде файла в корневом каталоге Avertv под текущим именем последнего кадра. Нажатие кнопки «Продолжить» позволяет возобновить процесс захвата и обработки кадров.

8. Зарегистрировать и сохранить несколько файлов спеклограмм формы колебаний, полученных при обработке различного числа захваченных в диапазоне от 3 до 30 кадров.

Внимание! При закрывании программы «Форма колебаний» все захваченные и сохраненные в корневом каталоге Avertv файлы, за исключением последнего, будут удалены.

9. Не закрывая программу «Форма колебаний», загрузить программу «Adobe Photoshop». Открыть в «Adobe Photoshop» записанные с помощью программы «Форма колебаний» файлы спеклограмм и выбрать файл, на котором полосы равных уровней колебаний являются наиболее контрастными.

10. Установить какому количеству обработанных кадров соответствует файл с выбранной спеклограммой. Сохранить этот файл под любым выбранным именем, содержащим кроме цифровых по крайней мере, один буквенный символ.

11. Определить на спеклограмме формы колебаний положение узловых линий и пучностей.

12. Закрывать все программы.

Задание 2. Выполнить сравнительные исследования форм колебаний пластины

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе цифровой спекл-интерферометр. Включить лазер, персональный компьютер и цифровую телекамеру.

2. Загрузить программу TVCapture98.

3. Включить звуковой генератор.

4. Подать напряжение питания на возбудитель колебаний на частоте формы колебаний, зарегистрированной при выполнении задания 1. По интерференционной картине на экране монитора убедиться, что возбуждается выбранная форма колебаний. Зафиксировать напряжение питания, подаваемое на возбудитель колебаний.

5. Загрузить программу «Форма колебаний». Нажать кнопку «Начать» на поле программы. При достижении приемлемого контраста полос на спеклограмме нажать кнопку «Остановить» и прекратить процесс обработки. В свободном поле, находящемся под кнопкой «Сохранить», указать любое выбранное имя, имеющее кроме цифровых, по крайней мере, один буквенный символ.

6. Нажать кнопку «Сохранить». Спеклограмма будет сохранена в виде файла в папке UserNameFile в корневом каталоге Avertv под выбранным именем.

7. Изменяя (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения) напряжение питания, которое подается на возбудитель колебаний, зарегистрировать и сохранить несколько (не менее 3) файлов спеклограмм формы колебаний, полученных при различном напряжении питания.

8. Закрыть программу «Форма колебаний» и загрузить программу «Adobe Photoshop».

9. Открыть в «Adobe Photoshop», записанные с помощью программы «Форма колебаний» файлы спеклограмм формы колебаний. Сравнить полученные изображения по числу зарегистрированных полос, их контрасту, ширине узловых линий.

10. Выбрать спеклограмму, на которой визуально различимы все интерференционные полосы. Установить какой величине напряжения питания, подаваемого на возбудитель колебаний, соответствует эта топограмма.

11. По спеклограмме с максимальным числом полос в одной из пучностей установить порядок последней, визуально разрешаемой полосы. Определить величину амплитуды колебаний, соответствующую этой полосе.

12. Закрыть все программы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое спекл-изображение? Что происходит со спекл-изображением при сложении его с когерентным опорным пучком?

2. Как изменится спекл-картина на мониторе ЦСИ, если к оптическому столу интерферометра приложить возмущающее усилие?

3. Опишите вид интерференционной картины, наблюдаемой на экране монитора спекл-интерферометра, если объект колеблется на резонансной частоте?

4. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если объект возбужден на частоте, не совпадающей с резонансной?

5. Как определить по изображению на мониторе ЦСИ положение узловых линий формы колебаний?

6. Будет ли работать помехоустойчивый ЦСИ, если стол, на котором размещен интерферометр, полностью виброизолирован?

7. При сканировании частоты возбуждения пластины узловая область на спекл-изображении изменяется в размерах. Как эти

изменения связаны с приближением к резонансной частоте и удалении от нее?

8. Какие изменения претерпевает форма колебаний объекта, если варьировать уровень напряжения, подаваемого на возбудитель колебаний?

9. Объясните, почему с ростом числа обрабатываемых помехоустойчивым ЦСИ кадров контраст полос на спеклограмме сначала растет, а затем падает.

Лабораторная работа №7

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОГРАММ ВИБРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы. Изучение метода количественной обработки спеклограмм колеблющихся объектов; изучение зависимости между распределением яркости спеклограммы и амплитудой колебаний объекта.

Оборудование: помехоустойчивый ЦСИ, звуковой генератор ГЗ-33, частотомер ЧЗ-32, пьезоэлектрический возбудитель колебаний, модельный объект - пластина.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для проведения количественной обработки спеклограмм колеблющегося объекта рассмотрим факторы, влияющие на чувствительность интерферометра.

Принципиальная оптическая схема интерферометра, предназначенного для измерения смещений поверхности в направлении, близком к нормали, показана на рис.2.7. Исследуемая поверхность освещается коллимированным лазерным пучком U_s . Пучок U_r является опорным. На светочувствительной поверхности телекамеры опорный U_r и объектный U_s пучки интерферируют. Разность фаз в плоскости светочувствительной поверхности телекамеры $\Delta\varphi$, которая набегает при смещении точки $O(x, y, z)$, запишется как

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2}(\bar{K} \cdot \bar{A}) \quad (2.18)$$

где \bar{A} – вектор смещения точки (x, y, z) поверхности, \bar{K} – вектор чувствительности интерферометра, который определяется как разность волновых векторов освещения \bar{K}_s и наблюдения \bar{K}_p этой точки:

$$\bar{K}(x, y, z) = \bar{K}_s(x, y, z) - \bar{K}_p(x, y, z). \quad (2.19)$$

Таким образом, в соответствии с (2.18) изменение фазы интерферирующих пучков из-за смещения объекта пропорционально проекции вектора перемещения на вектор чувствительности интерферометра.

Пусть 2θ - угол между направлениями освещения и наблюдения точки O , как показано на рис.2.7. Поскольку оба вектора \bar{K}_s и \bar{K}_p имеют абсолютную величину $2\pi/\lambda$, очевидно, что вектор чувствительности \bar{K} имеет величину $(4\pi/\lambda)\cos\theta$, а его направление совпадает с биссектрисой угла между направлениями освещения и наблюдения.

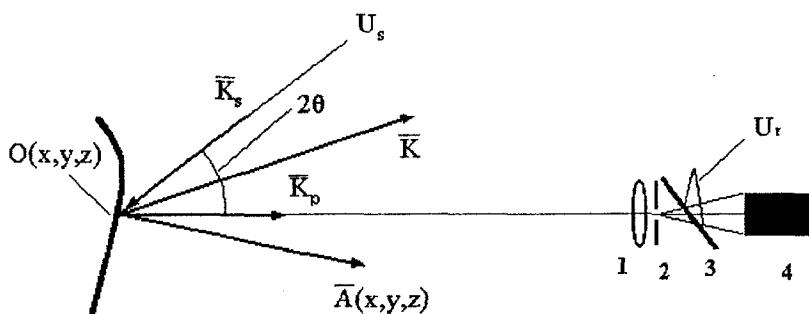


Рис.2.7. Схема интерферометра для измерения нормальной компоненты смещения: 1 – объектив; 2 – диафрагма; 3 – светоделитель; 4 – телекамера; U_s – пучок, освещающий точку $O(x,y,z)$ на исследуемой поверхности; U_r – опорный пучок; \bar{K} – вектор чувствительности интерферометра; \bar{K}_s и \bar{K}_p – волновые вектора освещения и наблюдения, соответственно; \bar{A} – вектор смещения

Для повышения чувствительности ЦСИ необходимо чтобы вектор чувствительности совпадал с нормалью к поверхности объекта. Совпадение вектора чувствительности с нормалью к поверхности достигается двумя способами. При одном из них направления освещения и наблюдения образуют равные углы с нормалью к поверхности. При другом способе направления освещения и наблюдения совпадают с нормалью к поверхности объекта. Такой интерферометр не чувствителен к тангенциальной компоненте вектора перемещения и в то же время обладает максимальной чувствительностью к нормальной компоненте.

В помехоустойчивом ЦСИ, который используется в настоящей работе (см. лабораторную работу №6), угол 2θ между направлениями освещения и наблюдения точек на исследуемой поверхности составляет не более 6° . Столь малое значение угла 2θ позволяет считать, что направление наблюдения в интерферометре практически

совпадает с нормалью к поверхности (для объекта в виде пластины).

Кроме того, в изучаемом интерферометре исследуемая пластина освещается не коллимированным, а расходящимся лазерным пучком. Это означает, что направление вектора чувствительности изменяется при наблюдении различных точек на поверхности объекта не только из-за изменения вектора наблюдения \vec{K}_p , но и из-за изменения вектора освещения \vec{K}_s . Однако, поскольку размеры пластины (~150x50 мм) много меньше, чем расстояние (~1,8 м) от нее до фокальной плоскости микрообъектива, используемого для расширения пучка, и расстояния от объекта до плоскости регистрации интерференционной картины (~1,5 м), изменением направления вектора освещения при переходе от одной точки поверхности к другой можно пренебречь.

Таким образом, в настоящей работе будем полагать, что вектор чувствительности интерферометра совпадает с направлением нормали к поверхности пластины и постоянен для любой ее точки.

В случае простых гармонических колебаний пластины функция движения ее поверхности может быть представлена в виде:

$$A(x,y)\cos(\omega t+\psi), \quad (2.20)$$

где A , ω и ψ – амплитуда, частота и фаза колебаний поверхности в точке (x,y) , соответственно.

Из (2.10) следует, что яркость $B(x,y)$ спеклограммы, выводимой на экран монитора помехоустойчивого ЦСИ, при регистрации колеблющегося объекта пропорциональна характеристической функции интерферограммы $M_t(x,y)$. Функция $M_t(x,y)$ в каждой точке изображения поверхности объекта зависит от амплитуды колебаний этой точки. Связь с амплитудой колебаний в $M_t(x,y)$ выражается через функцию J_0 Бесселя первого рода нулевого порядка, как

$$M_t(x,y) = \left| J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x,y) \right] \right| \quad (2.21)$$

Таким образом, спеклограмма колеблющегося объекта, наблюдаемая на экране монитора, представляет собой некоторое исходное распределение яркости $B_0(x,y)$, промодулированное характеристической функцией вида (2.21).

На рис.2.8 представлена зависимость значения функции Бесселя J_0 (а, следовательно, и характеристической функции M_t) от амплитуды A колебания точки (x,y) поверхности объекта.

Из графика на рис.2.8 видно, что, если точки поверхности объекта при возбуждении колебаний объекта не смещаются, т.е. $A(x,y)=0$, то функции J_0 и M_t принимают максимальное значение, равное единице. Эти точки принадлежат узловым линиям формы колебаний и на спеклограмме они будут самыми яркими. Такие линии максимальной яркости на спеклограмме называют нулевыми полосами. В то же время при некоторых значениях амплитуды колебаний, как это видно из графика на рис.2.8, характеристическая функция становится равной нулю. На спеклограмме в соответствии с выражением (2.6) точки объекта, колеблющиеся с такими амплитудами, будут иметь нулевую яркость. На экране монитора они будут проявляться в виде темных полос.

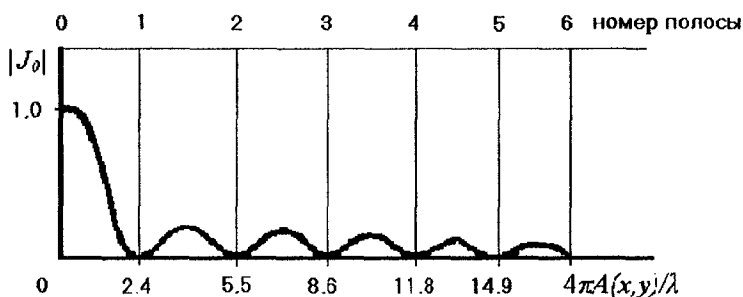


Рис.2.8. График зависимости функции Бесселя J_0 от амплитуды $A(x,y)$ колебания точки объекта

С какой именно амплитудой колеблются точки объекта, принадлежащие некоторой темной полосе, судят по номеру полосы, который соответствует порядковому номеру нуля характеристической функции. Определяют номер полосы по спеклограмме. Темные полосы, окружающие яркую нулевую полосу, будут полосами номер один, последующие темные полосы — номер два, и далее порядковый номер будет равномерно возрастать при каждом переходе через очередную светлую полосу на спеклограмме.

Для определения амплитуды колебаний точек поверхности, принадлежащих темной интерференционной полосе с установленным порядковым номером, необходимо взять численное значение соответствующего нуля характеристической функции, приравнять его $4\pi A/\lambda$, и рассчитать величину амплитуды A колебаний. Значения первых десяти нулей функции Бесселя J_0 (или характеристической

функции M_i) и рассчитанные по ним значения амплитуд колебаний, приведены в таблице 2.5.

На рис.2.9 приведена типичная спеклограмма одной из форм колебаний лопатки компрессора газотурбинного двигателя. На спеклограмме проставлены номера интерференционных полос, по которым может быть построена эпюра вибросмещений вдоль любого выделенного сечения на пере лопатки. Для построения эпюры вдоль выбранного сечения необходимо определить координаты центров интерференционных полос и по номеру полосы установить значение амплитуды колебаний в точках с этими координатами. Наиболее простой путь определения координат точек, принадлежащих центрам интерференционных полос, связан с применением стандартной программой Adobe Photoshop версии 3.0 и выше.

Таблица 2.5

Значения «нулей» функции Бесселя J_0 и соответствующих им амплитуд колебаний

Порядковый номер нуля	Значение аргумента $4\pi A/\lambda$	Амплитуда колебаний, мкм ($\lambda=0.6328$ мкм)
1	2,40	0,12
2	5,52	0,28
3	8,65	0,46
4	11,79	0,59
5	14,93	0,75
6	18,07	0,90
7	21,21	1,06
8	24,35	1,21
9	27,49	1,37
10	30,64	1,53

При построении эпюры перемещений необходимо учесть, что при переходе через нулевую линию (узел формы колебаний) знак амплитуды колебаний изменяется на противоположный, так как узел разделяет области поверхности объекта, колеблющиеся с противоположными фазами. Выбор области поверхности, которая имеет положительный знак амплитуды колебаний, осуществляется произвольным образом. На спеклограммах областей поверхности объекта, амплитуды колебаний которых полагаются отрицательными, интерференционным полосам приписывают отрицательный номер.

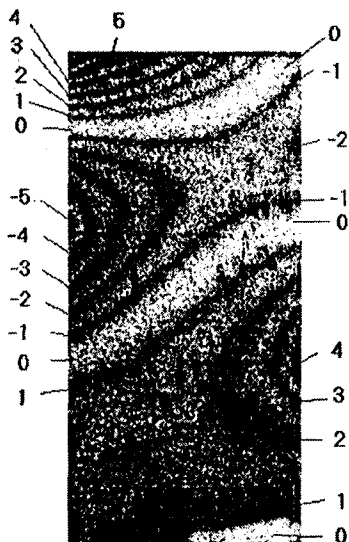


Рис.2.9. Спектрограмма формы колебаний лопатки компрессора с указанием номера интерференционных полос

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки приведена на рис.2.10.

В качестве объекта для исследования резонансных колебаний используется плоская дюралевая пластина 1. Пластина зажата в тисках 2, которые жестко связаны с платформой спекл-интерферометрического стола.

Колебания пластины возбуждаются с помощью пьезоэлектрического вибратора 3, питаемого от звукового генератора 4. Частотомер 5 служит для регистрации частоты напряжения, подаваемого на возбудитель колебаний 3.

Задание. Освоить методику определения амплитуд колебаний пластины по зарегистрированной спектрограмме формы её колебаний.

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр (проверить наличие заземление оптического стола и проконтролировать работоспособность схемы возбуждения колебаний пластины).

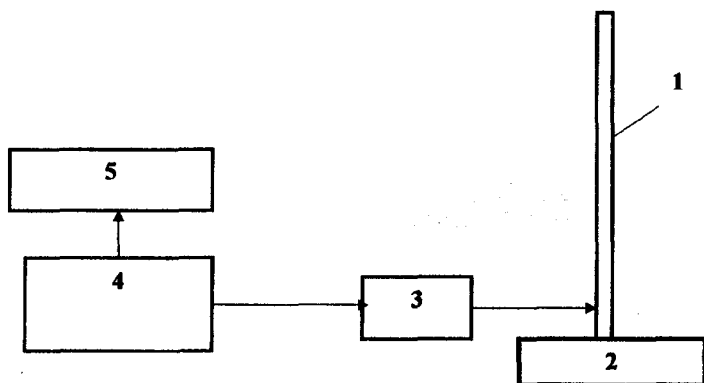


Рис.2.10. Блок-схема установки для возбуждения колебаний пластины:
 1 – исследуемая пластина; 2 – тиски; 3 – возбудитель колебаний; 4 – звуковой генератор; 5 – частотомер

2. Включить лазер, персональный компьютер и цифровую телекамеру.

3. Включить звуковой генератор 4 и частотомер 5.

4. Подать напряжение питания на возбудитель колебаний 3 и, сканируя частоту колебаний звукового генератора в заданном преподавателем диапазоне частот, по интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора, определить все значения резонансных частот колебаний пластины. Зафиксировать значения частот по показаниям частотомера.

5. На каждой резонансной частоте зарегистрировать с помощью программы «Форма колебаний» спеклограмму формы колебаний.

6. Загрузить программу Adobe Photoshop.

7. Открыть файлы зарегистрированных форм колебаний пластины.

8. На одной из спеклограмм, выбранной по указанию преподавателя, установить номера всех интерференционных полос.

9. По спеклограмме выбранной формы колебаний построить эпюру виброремещений вдоль кромок пластины.

10. Построить эпюру вибросмещений вдоль любой выбранной по указанию преподавателя линии, проходящей по поверхности пластины.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое вектор чувствительности интерферометра и как он определяется?

2. Назовите способы повышения чувствительности ЦСИ.

3. Почему в схеме изучаемого помехоустойчивого ЦСИ можно считать, что вектор чувствительности совпадает с нормалью к поверхности объекта?

4. Как записывается функция движения для поверхности колеблющейся пластины?

5. Каков физический смысл характеристической функции?

6. Почему узловые полосы на спеклограмме имеют максимальную яркость?

7. Опишите схему лабораторной установки. Какой тип возбудителя колебаний в ней применяется? Как определяется место контакта возбудителя с пластиной?

8. Как определить номер интерференционной полосы в заданной точке поверхности объекта?

9. Как установить амплитуду колебаний в заданной точке поверхности?

10. В чём заключается методика построения эпюры вибросмещений?

11. Как по виду спеклограммы можно задать области поверхности объекта, колеблющиеся с противоположными фазами?

Лабораторная работа №8

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТА КОНТАКТНЫМ И БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДАМИ

Цель работы. Сравнительные измерения амплитуды колебаний исследуемого объекта с помощью вибродатчика и помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ).

Оборудование: помехоустойчивый ЦСИ, виброметр ВШВ-003-М2, вибродатчик Дн-4м1, звуковой генератор ГЗ-33, возбудитель колебаний, модельный объект - пластина.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Действующие стандарты калибровки вибродатчиков методами лазерной интерферометрии [15,16] предъявляют жесткие требования к параметрам используемого при калибровке оборудования. По существующим методикам для калибровки используют специализированные вибростенды, в которых обеспечиваются требуемые параметры вибрации и решены вопросы измерения нормируемых характеристик. С учетом того, что в России такие вибростенды не выпускаются, а импортные очень дороги, проблема выполнения требований стандартов в этой части является весьма актуальной.

В [17] приведена одна из методик калибровки датчиков вибрации, использующая возможности голографической интерферометрии. Трудоемкость метода голографической интерферометрии (необходимость виброизоляции интерферометра, проблема автоматизации измерений и обработки результатов) обосновывает необходимость перехода в эталонных средствах контроля к методам цифровой спекл-интерферометрии.

В лабораторной работе рассмотрен пример применения помехоустойчивого ЦСИ для выполнения сравнительных измерений амплитуды колебаний объекта совместно с контактным вибродатчиком. Для этого производится регистрация спеклограммы колеблющегося объекта с закрепленным на его поверхности вибродатчиком. Полученная спекл-интерферограмма дает значение амплитуды в каждой точке поверхности объекта из условия, что шагу в одну интерференционную полосу соответствует изменение амплитуды

$\Delta A = \lambda/4$ (λ -длина волны излучения).

Анализируя результаты, полученные помехоустойчивым ЦСИ, можно достаточно оперативно классифицировать вибродатчики по точности измерения амплитуды колебания. Это достигается тем, что, обрабатывая зарегистрированную спекл-картину, мы получаем поле распределения амплитуд в каждой точке поверхности объекта с точностью до долей микрометра.

Зная положение крепления вибродатчика на объекте и имея его показания, можно определить величину амплитуды колебаний объекта в области крепления вибродатчика и сравнить их с данными, полученными самим датчиком.

Расшифровка полученной спеклограммы формы колебаний проводится следующим образом. Первоначально необходимо определить положение нулевой полосы (наиболее яркая полоса на спеклограмме). Прежде всего, нулевая полоса должна находиться в районе заделки исследуемого объекта в узле крепления. Распределение яркости B полос спеклограммы на экране монитора описывается выражением:

$$B \approx \left| \sqrt{I_s \cdot I_r} J_0 \left(\frac{4\pi A}{\lambda} \right) \cdot \cos \delta\varphi \right|, \quad (2.22)$$

где I_s и I_r - распределение интенсивности объектного и опорного пучков, соответственно; A -амплитуда колебаний объекта, $\delta\varphi$ -случайная разность фаз между опорным и предметным пучками, обусловленная внешними воздействиями на интерферометр, J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Из формулы (2.22) видно, что информацию о форме колебаний содержит только произведение функции Бесселя и косинуса.

При этом яркость B в точке (x,y) изображения объекта может принимать в зависимости от фазы $\delta\varphi$ любое значение в пределах, зависящих от значения функции Бесселя, аргумент которой привязан к амплитуде вибрации A соответствующей точки (x,y) на изображении объекта (см. теоретическое введение к лабораторным работам №5-12).

В тех точках изображения, где функция Бесселя равна нулю, яркость не зависит от фазы $\delta\varphi$ и $B=0$. В остальных точках при случайном изменении фазы $\delta\varphi$ в интервале $[-\pi, \pi]$ яркость изображения изменяется от 0 до значения B_i на некотором интервале, причем ширина интервала и значение B_i определяются локальными значениями функции Бесселя.

Числовые значения k_i аргумента функции Бесселя, при которых она обращается в нуль, называются корнями функции Бесселя (индекс i – номер корня). Значения корней заранее известно (см. таблицу 2.5 в лаб. работе №7). Множество точек изображения, в которых функция Бесселя, описывающая форму резонансных колебаний объекта (2.22), принимает значение равное одному из своих нулей, представляет собой линию равных амплитуд.

Приравнивая аргумент функции Бесселя числовым значениям её корней, получим семейство кривых в совокупности представляющих собой топографическую карту (спеклограмму) формы собственных колебаний объекта:

$$A_i = \frac{k_i}{4\pi} \cdot \lambda \quad (2.23)$$

Из теории бesselевых функций известно, что корни (за исключением первых 2÷3 корней) функции Бесселя первого рода нулевого порядка отстоят друг от друга на величину, приблизительно равную π . Это означает, что кривые (2.23) представляют собой сечения функции $A(x, y)$, описывающей форму собственных колебаний объекта, плоскостями, отстоящими друг от друга приблизительно на четверть длины волны. Таким образом, фактическую амплитуду колебаний в заданной точке объекта с точностью до четверти длины волны можно определить простым подсчётом числа полос, начиная от узловой линии. Для количественного определения малых амплитуд колебаний, т.е. в пределах нескольких первых полос, необходимо учитывать конкретные значения корней функции Бесселя.

Амплитуда колебаний точек изображения, находящихся между темными линиями, может быть найдена линейной интерполяцией.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание объекта исследования

В качестве объекта исследования (см. рис.2.11) используется алюминиевая пластина, установленная вертикально и закреплённая в тисках на платформе ЦСИ. Для измерения амплитуд колебаний пластины с помощью вибродатчика на пластине предварительно закрепляется (с помощью клея) вибродатчик 4 (рис.2.11). Для возбуждения пластины используется пьезокерамический вибратор 3. Место контакта толкателя вибратора с пластиной выбирается как мож-

но ближе к заделке. В этом случае вибратор оказывает наименьшее влияние на форму колебаний пластины. Координаты точки контакта вибратора с пластиной показаны на рис.2.11

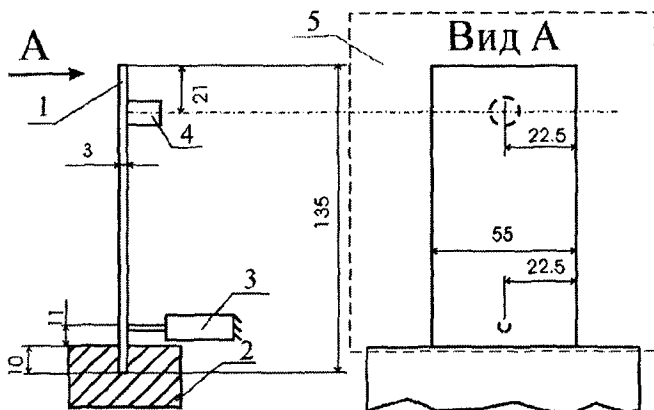


Рис.2.11. Схема объекта исследования: 1-пластина; 2-тиски; 3-вибратор; 4-вибродатчик; 5-область обзора ЦСИ

Задание. Выполнить сравнительные измерения амплитуд колебаний в заданной точке поверхности пластины с помощью вибродатчика и помехоустойчивого ЦСИ

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе помехоустойчивый ЦСИ и виброметр ВШВ-003-М2.

2. Возбудить пластину на первой изгибной форме колебаний с помощью звукового генератора и вибратора 3.

3. Изменяя напряжение выходного сигнала звукового генератора, установить такой уровень возбуждения исследуемого объекта, при котором на спеклограмме на экране монитора наблюдаются 3 или 4 полосы.

4. Зарегистрировать спеклограмму, с последующей ее записью на жесткий диск ПЭВМ.

5. С помощью виброметра ВШВ-003-М2 определить соответствующие указанному режиму возбуждения показания виброскорости V , характеризующие перемещения пластины в области нахождения вибродатчика. Полученные результаты занесите в таблицу 2.6.

6. Вычислить амплитуду колебаний пластины по следующей формуле:

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{2\pi\nu}, \quad (2.24)$$

Результаты вычислений занесите в таблицу 2.6.

7. На основе зарегистрированной спеклограммы, получить распределение амплитуд колебаний по высоте пластины. Для этого:

- определяется нулевая полоса на спеклограмме;
- определяется число темных полос на изображении объекта и производится привязка середины каждой темной полосы к соответствующим координатам объекта (рис. 2.12);
- для каждой темной полосы рассчитывается соответствующее значение амплитуды по формуле (2.24);
- строится график распределения амплитуды колебаний по высоте пластины;
- из графика находится значение амплитуды, соответствующее месту крепления вибродатчика;

8. Повторить эксперимент несколько раз, ступенчато увеличивая уровень возбуждения объекта путем изменения выходного напряжения на звуковом генераторе. Результаты эксперимента занести в таблицу 2.6.

Таблица 2.6

Значения амплитуд колебаний

№	Значение виброскорости, мм/с	Рассчитанное значение амплитуды (вибродатчик), мкм	Рассчитанное значение амплитуды (ЦСИ), мкм
1			
2			
3			

На основании полученных результатов определите степень сходимости данных, полученных датчиковым методом и методом спекл-интерферометрии. Укажите источники погрешности измерений.

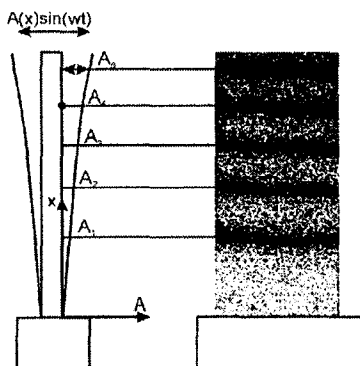


Рис. 2.12. Привязка темных полос на изображении объекта к координатам пластины

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему лазерные приборы на основе интерферометра Майкельсона являются рабочими эталонами для проверки вибрационных датчиков?
2. Как провести калибровку датчиков с помощью помехоустойчивого ЦСИ?
3. Какова последовательность количественной обработки спеклограмм колеблющегося объекта? Как определить нулевую полосу?
4. Как привязаны полосы на изображении объекта к амплитудам его колебаний?
5. Почему точку контакта вибратора с пластиной необходимо переносить ближе к заделке?
6. Как рассчитать амплитуду колебаний в любой точке поверхности объекта?
7. Какова чувствительность помехоустойчивого ЦСИ к амплитуде колебаний объекта?
8. Как рассчитать амплитуду колебаний объекта из значений виброскорости, зарегистрированных вибродатчиком?

Лабораторная работа №9

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОДНОВРЕМЕННО НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

Цель работы. Изучение методики возбуждения резонансных колебаний объектов; изучение видоизменения форм колебаний объекта при одновременном его возбуждении в двух точках.

Оборудование: помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр (ЦСИ); два частотомера; два звуковых генератора; два возбудителя колебаний; исследуемая пластина.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Цифровые спекл-интерферометры (ЦСИ) являются надежным инструментом исследования вибраций ответственных деталей различных конструкций. Они нашли широкое применение в процессе поузловой доводки авиационных двигателей, в частности, при исследовании динамических характеристик лопаток компрессора и турбины. Разработанный в СГАУ программный метод статистической обработки спеклограмм обеспечил повышение стабильности оптико-электронной схемы интерферометра с непрерывным лазером к случайным динамическим нагрузкам. Это позволило создать помехоустойчивый ЦСИ для исследования вибрационных характеристик сложных колебательных систем, для которых пока затруднена разработка численных моделей. К таким задачам относится исследование многомодовых колебаний, когда, например, объект возбуждается независимыми вибраторами в пространственно разнесенных точках.

Рассмотрим случай, когда объект одновременно колеблется на двух резонансных частотах ω_1 и ω_2 , т.е. функция $F(t)$ движения его поверхности представлена в виде:

$$F(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \psi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \psi_2), \quad (2.25)$$

где A_1 и A_2 , ψ_1 и ψ_2 – амплитуда и фаза колебаний в точке (x, y) изображения объекта на частотах ω_1 и ω_2 .

Характеристическая функция спеклограммы будет теперь опи-

сываться модулем произведения функций Бесселя, аргументами которых являются амплитуды колебаний каждой из частот [1]:

$$M_t = \left| J_0\left(\frac{4\pi A_1}{\lambda}\right) J_0\left(\frac{4\pi A_2}{\lambda}\right) \right|. \quad (2.26)$$

Поскольку функция M , является произведением двух функций, зависящих только от амплитуд колебаний точек поверхности, то темные полосы на изображении, соответствующие нулям функций Бесселя, появляются во всех тех местах, где они появились бы в результате колебаний на каждой резонансной частоте отдельно. Поэтому темные полосы будут непрерывными, в то время как светлые полосы будут распадаться на отдельные малые области. При расчете амплитуд колебаний порядковый номер интерференционной полосы в каждой точке поверхности объекта необходимо определять отдельно для каждой из функций Бесселя. При этом светлые полосы одной из функций являются фоном, на котором по числу пересечений их темными полосами, представляется возможным установить порядковый номер интерференционной полосы, принадлежащей другой функции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание объекта исследования

В качестве объекта для исследования резонансных колебаний используется плоская дюралевая пластина. Пластина зажата в тисках, которые жестко связаны с платформой спекл-интерферометрического стола.

При проведении исследований колебания пластины возбуждаются одновременно в двух пространственно разнесенных точках независимыми возбудителями. Расположение точек контакта возбудителей относительно пластины представлены на рис. 2.13.

Блок-схема экспериментальной установки для возбуждения колебаний пластины приведена на рис. 2.14.

Пластина 1, зажата в тисках 2, закрепленных оптическом столе спекл-интерферометра. Колебания пластины возбуждаются с помощью двух пьезокерамических возбудителей (вибраторов) 3 и 4, питаемых от звуковых генераторов 5 и 6.

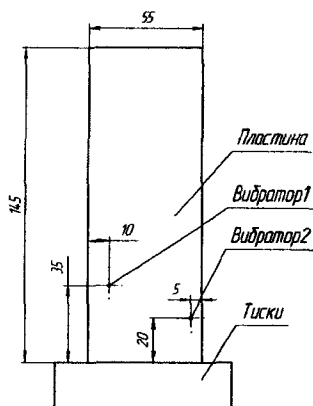


Рис.2.13 Расположение точек контакта возбуждителей относительно пластины

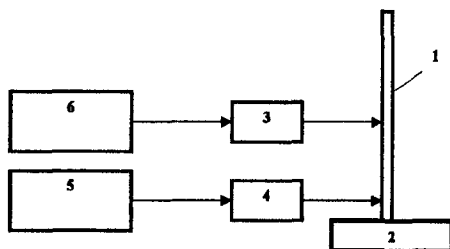


Рис.2.14 Блок-схема установки для возбуждения колебаний пластины в двух точках: 1- 2 исследуемая пластина; 2 – тиски; 3,4 – возбуждители колебаний; 5,6 – звуковые генераторы

Задание 1. Регистрация спеклограмм форм колебаний пластины

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе цифровой спекл-интерферометр .
2. Включить звуковой генератор 6.
3. Подать напряжение питания $U=10$ В на возбуждители колебаний 3 и, сканируя частоту колебаний звукового генератора в заданном преподавателем диапазоне частот, по интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора, определить все резо-

начные частоты колебаний пластины. Зафиксировать эти частоты с помощью звукового генератора 6.

4. На каждой резонансной частоте с помощью программы «Форма колебаний» зарегистрировать спеклограмму формы колебаний.

Задание 2. Сравнительные исследования форм колебаний пластины.

Порядок выполнения работы:

1. Включить звуковой генератор 5.
2. Подать напряжение питания $U=10$ В на возбудитель колебаний 4 и, сканируя частоту колебаний звукового генератора в заданном диапазоне частот, определить все резонансные частоты колебаний пластины. Зарегистрировать эти частоты с помощью звукового генератора 4.
3. Сравнить полученные резонансные частоты с частотами, зарегистрированными при возбуждении колебаний первым возбудителем 3.
4. На каждой резонансной частоте зарегистрировать спеклограмму формы колебаний.
5. Сравнить формы колебаний с формами колебаний, зарегистрированными при возбуждении колебаний первым возбудителем 3.

Задание 3. Исследование колебаний пластины при одновременном возбуждении двух резонансных форм.

Порядок выполнения работы:

1. Выбрать две соседние резонансные частоты, определенные в предыдущих заданиях.
2. На одной из выбранных частот подать напряжение питания $U=10$ В на первый возбудитель и зарегистрировать спеклограмму. Снизить до нуля напряжение питания, подаваемое на возбудитель.
3. На второй из выбранных частот подать напряжение питания $U=10$ В на второй возбудитель и зарегистрировать спеклограмму.
4. Не снижая напряжение питания, которое подается на второй возбудитель, вновь подать напряжения питания $U=10$ В на первый возбудитель и зарегистрировать спеклограмму.
5. Сравнить эту спеклограмму со спеклограммами, зарегистрированными на каждой из резонансных частот по п. 2 и 3.

6. Возбуждая колебания пластины на двух резонансных частотах одновременно, зарегистрировать спеклограммы колебаний при следующих отношениях U_1/U_2 напряжений питания, подаваемых на первый и второй возбудители: а – 0,75; б – 1,25; в – 1,5; г – 2; д – 3 и е – 6.

7. Сравнить зарегистрированные спеклограммы. Объяснить их вид.

Задание 4. Исследование устойчивости резонансных форм колебаний.

Порядок выполнения работы:

1. На одной из собственных частот подать напряжение питания $U=10$ В на первый возбудитель колебаний. Зарегистрировать спеклограмму.

2. Не снижая напряжение питания, которое подается на первый возбудитель, подать напряжение питания $U=10$ В на второй возбудитель на частоте, не совпадающей ни с одной из резонансных частот колебаний пластины. Зарегистрировать спеклограмму.

3. Сравнить зарегистрированные спеклограммы.

4. Повышая напряжение питания, подаваемого на второй возбудитель до 60 В с шагом равным 10 В зарегистрировать спеклограммы резонансных колебаний пластины.

5. Сравнить зарегистрированные спеклограммы со спеклограммой, полученной по п. 1.

Задание 5. Исследование резонансных колебаний пластины при одновременном возбуждении в двух точках.

Порядок выполнения работы:

1. На одной из резонансных частот подать напряжение питания $U=10$ В одновременно на два возбудителя колебаний.

2. Объяснить наблюдаемую на экране монитора картину.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом повышают контраст интерференционной картины, выводимой на экран монитора ЦСИ, если объект колеблется на резонансной частоте?

2. Какова последовательность действий для определения из спеклограммы амплитуды колебаний в заданной точке поверхности объекта?

3. Как определить номер интерференционной полосы в заданной точке поверхности объекта?

4. Как изменяется спеклограмма формы колебаний объекта, если уровень возбуждения объекта усиливается или ослабляется?

5. Изменяются ли резонансные частоты и формы колебаний при изменении места приложения возбуждающего усилия?

6. Можно ли определить амплитуду колебаний в заданной точке поверхности, если объект одновременно возбуждается на одной резонансной частоте двумя возбудителями? на двух различающихся резонансных частотах?

7. Укажите наблюдаемые видоизменения формы колебаний пластины при одновременном возбуждении ее на двух резонансных частотах, которые имеют:

- одинаковое значение частоты;
- близкие значения частот;
- различающийся уровень напряжения на вибраторе;
- одинаковое значение частоты, подаваемое от одного звукового генератора.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА ЧАСТОТУ И ФОРМУ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ДИСКОВОГО ТИПА

Цель работы. Изучение резонансных колебаний конструкций дискового типа; изучение влияния присоединенной массы на частоту и форму колебаний осесимметричного объекта.

Оборудование: помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр (ПЦСИ); звуковой генератор; частотомер; пьезокерамический возбудитель колебаний; микрофон; шумомер; осциллограф; модельный объект – однородный диск.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рабочие колеса газотурбинных двигателей различного назначения относятся к конструкциям дискового типа, основным отличием которых от других линейно-упругих систем является наличие осевой поворотной (циклической) симметрии.

Любой объект обладает свойством осевой поворотной симметрии в том случае, если он имеет некоторую прямую ось и будучи повернутым относительно этой оси на любой угол, кратный $2\pi/S$, где S – целое положительное число, называемое порядком симметрии, сохранит инвариантность совокупности своих значащих характеристик, определяемых в неподвижной системе координат. В случае рассмотрения колебаний к таким значащим характеристикам следует отнести геометрические, массовые и упругие.

В соответствии с этим определением любой объект можно представить как поворотно-симметричный с порядком симметрии $S=1$. Наибольшее целое число S , присущее данному объекту, называют главным порядком его поворотной симметрии $S_{гл}$. Если главный порядок симметрии составное число, то такой объект имеет другие, меньшие, порядки симметрии. Любые тела вращения, такие как, например, диски, шестерни и т.п. также обладают поворотной симметрией. Рабочие колеса турбомашин различного назначения обладают поворотной симметрией, порядок которой обычно совпа-

даст с числом лопаток в колесе (рис.2.15).

Та часть поворотной-симметричного объекта, которая заключена между полуплоскостями, опирающимися на ось симметрии и отстоящими друг от друга на угол $2\pi/S$, называется периодом объекта (системы). Точки объекта, совпадающие при мысленном совмещении его различных периодов, носят название сходственных точек.

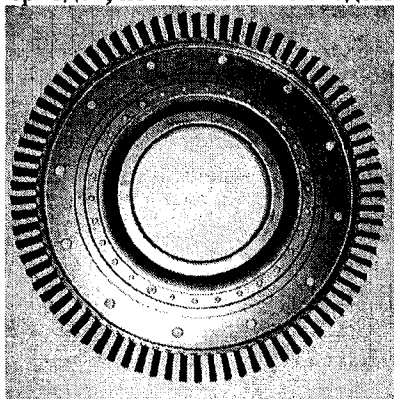


Рис.2.15. Рабочее колесо турбомашин с 79 лопатками, как поворотной-симметричная система с порядком симметрии $S=79$

Используя методический подход, развитый В.П. Ивановым в [18], уравнения движения линейно-упругой системы, обладающей свойством поворотной симметрии и находящейся под воздействием усилий, изменяющихся во времени по гармоническому закону, можно получить, расчленив ее на периоды с шагом $2\pi/S$ и рассматривая динамические свойства одного периода. Множество собственных колебаний, составляющее полный спектр собственных форм и соответствующих собственных частот такой системы, распадается на группы. Число групп совпадает с порядком симметрии S .

В результате такого подхода В.П. Иванов показал, что спектр колебаний поворотной-симметричной конструкции состоит из множества пар взаимортогональных форм с одним и тем же числом n узловых диаметров с совпадающими частотами, т.е. вместе с колебаниями по форме

$$W_1(r, \Theta, t) = A_{n1}(r) \cos n\Theta \cos(\omega_n t - \xi_1) \quad (2.27)$$

существует другое, ортогональное первому колебание по форме

$$W_2(r, \Theta, t) = A_{n2}(r) \sin n\Theta \cos(\omega_n t - \xi_2). \quad (2.28)$$

где r, Θ – полярные координаты, связанные с центром диска; A_{n1} и A_{n2} – амплитуды колебаний в любом выделенном вдоль радиуса r направлении для формы с n диаметрами (n – число волн колебаний в окружном направлении); ω_n – частота колебаний; ξ_1, ξ_2 – фазовые соотношения по времени; t – время.

Основным неотъемлемым свойством колебаний поворотно-симметричных систем является присутствие в спектрах множества пар линейно-независимых форм колебаний с совпадающими собственными частотами. Собственные колебания с совпадающими частотами располагаются в парах различных групп, имеющих одинаковую абсолютную величину числа n . Таким образом, двукратные собственные частоты присутствуют всегда в попарно объединенных группах $|n|=1, 2, 3, \dots, S/2-1$ [$(S-1)/2-1$ при нечетном S], т.е. при положительных n из последовательности $0 < n < S/2$. В группах $n=0$ и $n=S/2$ при S четном размещаются собственные колебания, частоты которых однократны (парных групп у них нет).

В таблице 2.7 схематично показаны несколько первых собственных форм (узловых линий) изгибных колебаний системы дискового типа (круглой пластины, для которой $S_{gr}=\infty$). Для такой системы число n , указывая на номера объединенных групп, соответствует также числу узловых диаметров, а число m , указывая на порядковый номер собственной частоты в каждой группе, совпадает с числом узловых окружностей ($m=0, 1, 2, 3, \dots$). Каждой клетке таблицы с числом диаметров n , не равным 1, соответствует пара собственных форм с совпадающими собственными частотами. Однократные частоты присущи лишь группе колебаний без узловых диаметров (с $n=0$). Формы колебаний, относящиеся к этой группе, называют «зонтичными».

Таким образом, формы колебаний сплошного диска могут быть составлены из узловых диаметров (n) и узловых окружностей (m), или их комбинации.

При наличии полной осевой симметрии угловое положение узловых диаметров на поверхности диска является произвольным и зависит только от начальных условий.













Общее решение уравнений для свободных колебаний такого однородного диска на резонансной частоте ω_n в случае, например, только узловых диаметров имеет вид:

$$W(r, \Theta, t) = A_{n1}(r) \cos(n\Theta - \alpha) \cos(\omega_n t - \xi_1) + A_{n2}(r) \sin(n\Theta - \alpha) \cos(\omega_n t - \xi_2). \quad (2.29)$$

Физически уравнение (2.29) означает суперпозицию двух форм, имеющих резонансную частоту ω_n . Хотя узловые конфигурации форм разделены углом $\pi/2n$, они обладают произвольной ориентацией на диске, обозначенной через α .

Таблица 2.7

Формы собственных колебаний системы дискового типа

m	n			
	0	1	2	3
0				
1				
2				

Характеристическая функция спектрограммы будет описываться выражением:

$$M_t = \left| J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A_{n1}(r) \cos(n\Theta - \alpha) \right] J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A_{n2}(r) \sin(n\Theta - \alpha) \right] \right| \quad (2.30)$$

При наличии асимметрии угловые положения узлов формы колебаний перестают быть произвольными. В этом случае возможны только две, различающиеся на угол $\pi/2n$, позиции узлов для каждого значения n . Положения этих позиций будут четко ориентированы под некоторым определенным углом α относительно системы координат, связанной с диском. Частоты ω_{n1} и ω_{n2} этих позиций формы колебаний будут различаться на величину, зависящую от асимметрии. Эти частоты называются частотами расслоившейся формы с n -диаметрами. Величина расслоения частот, определяемая как

$(\omega_{n1} - \omega_{n2})/\omega_{n1}$ будет расти с увеличением асимметрии.

Характеристические функции спеклограмм, зарегистрированных на этих различающихся частотах ω_{n1} и ω_{n2} можно записать в виде:

$$M_{m1} = \left| J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A_{n1}(r) \cos(n\Theta - \alpha) \right] \right|, \quad (2.31)$$

$$M_{m2} = \left| J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A_{n2}(r) \sin(n\Theta - \alpha) \right] \right|.$$

Из уравнений (2.31) видно, что диаметральные узловые линии формы колебаний с первой частотой (ω_{n1}) будут располагаться в пучностях формы колебаний с другой частотой (ω_{n2}).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Для проведения экспериментов по исследованию влияния асимметрии на собственные частоты и формы колебаний используется однородный металлический диск постоянной толщины. При изготовлении геометрические размеры диска выдерживались с высокой точностью.

Диск по центральному отверстию жестко крепится к массивному угольнику. Угольник с диском установлен на платформе оптического стола цифрового спекл-интерферометра (ЦИ).

Схема возбуждения форм колебаний диска и регистрации резонансных частот приведена на рис.2.16.

Возбуждение колебаний диска 4 осуществляется звуковым генератором 1, сигнал от которого поступает на возбудитель колебаний 3, размещенный на поверхности диска. В качестве возбудителя колебаний используется пьезоэлемент из материала ЦТС-19. Масса возбудителя равна 1,4 грамма, а его диаметр равен 12мм. Частота возбуждения колебаний фиксируется по частотомеру 2. Акустический сигнал отклика возбуждаемого диска поступает на микрофон 5, установленный вблизи поверхности диска. Сигнал микрофона усиливается и регистрируется шумомером 6. Микрофон установлен таким образом, чтобы его диаграмма направленности охватывала всю поверхность исследуемого объекта. Сигнал отклика от микрофона, кроме того, подается на вход электронного осцилло-

графа 7, на который одновременно поступает сигнал от звукового генератора, возбуждающего колебания диска. При сканировании частоты звукового генератора 1 в момент резонанса резко возрастает уровень сигнала отклика от объекта, регистрируемого микрофоном 5, а на экране осциллографа 7 наблюдается фигура Лиссажу. Резонансная частота по табло частотомера 2 должна определяться при максимальном уровне сигнала отклика. Кроме того, при настройке на резонансную частоту, форму колебаний можно в реальном времени визуально наблюдать на экране монитора ЦСИ (см. лабораторную работу №4).

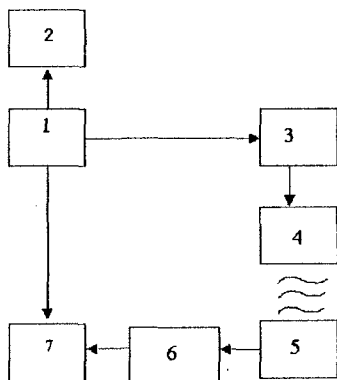


Рис.2.16. Схема возбуждения и регистрации резонансных колебаний исследуемого объекта: 1 – звуковой генератор; 2 – частотомер; 3 – возбудитель колебаний; 4 – диск; 5 – микрофон; 6 – шумомер; 7 – осциллограф

Задание 1. Получить спеклограммы форм колебаний однородного диска

Порядок выполнения работы:

1. Подготовить к работе цифровой спекл-интерферометр.
2. Включить звуковой генератор, частотомер, шумомер и осциллограф.
3. Подать напряжение питания от звукового генератора 1 на возбудитель колебаний 3 и, сканируя частоту колебаний звукового генератора в заданном преподавателем диапазоне частот, по интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора определить все резонансные частоты колебаний диска. Зафиксировать эти частоты с помощью частотомера.

4. На каждой резонансной частоте с помощью программы «Форма колебаний» зарегистрировать спеклограмму формы колебаний.

5. По спеклограммам определить число узловых диаметров и узловых окружностей зарегистрированных форм. Результаты представить в виде таблицы, подобной табл. 2.7.

6. Рассчитать величину расслоения частот для каждой зарегистрированной формы колебаний.

7. Определить ориентацию расслоившихся форм колебаний относительно друг друга.

8. Определить ориентацию расслоившихся форм относительно точки приложения возбуждающего усилия.

Задание 2. Изучить влияние присоединенной массы на частоту и форму колебаний диска.

Порядок выполнения работы:

1. Выбрать расслоившуюся форму колебаний (см. задание 1) с числом n диаметров равным 2 или 3 и числом m окружностей равным нулю.

2. Определить угловую ориентацию расслоившихся форм.

3. Поместить груз с массой равной 50 грамм в произвольной точке поверхности диска вблизи обода. (Для размещения груза использовать пластилин). Определить частоты выбранной формы колебаний и зарегистрировать спеклограммы. Определить величину изменения частот из-за присоединения массы относительно частот исходного состояния и величину расслоения.

4. Определить угловую ориентацию расслоившихся форм относительно расположения присоединенной массы.

5. Поместить груз с массой равной 50 грамм на поверхности диска вблизи обода в точке, принадлежащей узловой линии низшей частоты выбранной расслоившейся формы колебаний. Определить частоты этой расслоившейся формы. Определить величину изменения частот. Определить величину расслоения. Зарегистрировать спеклограммы.

6. Определить угловую ориентацию расслоившихся форм относительно расположения присоединенной массы.

7. Поместить груз с массой равной 50 грамм на поверхности диска вблизи обода в точке, принадлежащей пучности низшей частоты выбранной расслоившейся формы колебаний. Определить

частоты этой расслоившейся формы. Определить величину изменения частот. Определить величину расслоения. Зарегистрировать спектрограммы.

8. Определить угловую ориентацию расслоившихся форм относительно расположения присоединенной массы.

9. Сравнить результаты исследований, полученные при расположении присоединенной массы в произвольной точке поверхности диска, в точке, принадлежащей узловой линии и в точке, принадлежащей пучности формы колебаний.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие особенностями характеризуют собственные колебания поворотно-симметричных объектов?

2. Что означает расслоение формы колебаний осесимметричной конструкции?

3. Как ориентированы расслоившиеся формы колебаний диска, обладающего полной осевой симметрией, относительно диска и друг друга?

4. Как различаются частоты расслоившейся формы колебаний диска, обладающего полной симметрией?

5. Почему различаются частоты расслоившейся формы колебаний диска, обладающего полной симметрией, при контактном способе возбуждения колебаний?

6. Как ориентированы расслоившиеся формы колебаний диска, обладающего полной симметрией, при контактном способе возбуждения колебаний?

7. Как изменится величина расслоения частот формы колебаний диска, обладающего полной симметрией, если масса возбудителя колебаний будет возрастать?

8. Какая из расслоившихся частот формы колебаний изменится больше, если присоединенная масса расположена на узловой линии расслоившейся формы колебаний?

9. Как изменится величина расслоения, если присоединенная масса будет возрастать или уменьшаться?

Лабораторная работа №11

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКЛОГРАММЫ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ INTERFEROAVI.EXE.

Цель работы. Изучение принципа работы программы и алгоритма обработки спеклограмм цифрового интерферометра.

Оборудование: цифровой спекл-интерферометр, звуковой генератор, изучаемый объект.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

В реальных условиях применения интерферометра интерференционная картина зависит не только от вибрации поверхности объекта (полезная информация), но и от случайной деформации всей оптической схемы (вредная деформация), обусловленной случайными внешними шумами, вибрацией и нестационарными тепловыми потоками.

Одним из способов уменьшения вредного влияния внешних возмущений и, тем самым, – расширения области применения оптического интерферометра до производственных условий, является статистическое усреднение результатов достаточно большого количества независимых измерений (см. Теоретическое введение к лабораторным работам №5-12).

В настоящей лабораторной работе рассматривается оптический интерферометр, алгоритм работы которого включает в себя следующие операции:

- видеосъёмка объекта, колеблющегося на резонансной частоте и запись информации в AVI-файл;
- представление AVI-файла последовательностью отдельных кадров;
- запись массива кадров во временную служебную папку;
- вычисление модуля разности пар различных кадров, накопление этих модулей разности и усреднение результата;
- вывод результирующего изображения на экран монитора (на результиру

ющем изображении будет присутствовать система полос, которая представляет собой искомую спеклограмму колеблющегося объекта);

- запись полученной спеклограммы под содержательным именем на жёстком диске ЭВМ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр, включающий в свой состав:

- He-Ne лазер;
- оптические элементы (линзы, микрообъективы, зеркала, фильтры, рейтеры и т.д.), обеспечивающие освещение объекта и формирование опорного сигнала;
- устройство ввода изображений AverTV, включающее в себя полупроводниковую телевизионную матричную камеру, интерфейсную плату и соответствующее программное обеспечение;
- ЭВМ и изучаемый модельный объект;
- электродинамический или пьезоэлектрический вибратор для возбуждения колебаний объекта;
- генератор звуковых частот;
- цифровой частотомер;
- программа InterferoAvi.exe на жёстком диске ЭВМ.

Примечание. Включение оборудования, настройка и юстировка оптической схемы производятся специально подготовленным лаборантом.

Интерфейс программы InterferoAVI.exe представлен на рис.2.17.

Нажатием кнопки «Интерферо» вводится видеоизображение объекта. При этом видеофайл разбивается на отдельные кадры, происходит обработка этих изображений, и выводится результирующая интерферограмма. В полях «Яркость» и «Контраст» можно устанавливать значение яркости. Для принятия установленных значений яркости и контраста необходимо нажать кнопку «Интерферо». При нажатии на кнопку «Сохранить» записывается полученная спеклограмма в виде *.bmp файла на жесткий диск компьютера в

папку *Interfero*.

Для корректного завершения программы (освобождение памяти, очистка папки временного хранения BMP-файлов, обнуление указателей) на поле диалоговой панели имеется кнопка “Выход”.



Рис.2.17. Интерфейс программы *InterferoAVI.exe*. с характерным видом получаемой спеклограммы

Порядок проведения работы:

1. Запись AVI-файла.

1.1 Включить и прогреть (не менее 5 минут) генератор звуковых частот, лазер, AVerTV и ЭВМ. (выполняет лаборант).

1.2 Установить режим работы AVerTV:

- время записи 1 секунда,
- темп записи 25 кадров в секунду,
- кодировка цвета RGB (24 бита на пиксел),
- сжатие полные кадры (без сжатия),
- размеры кадра ближайшие к 640x480 пикселей,
- локализация запись в файл,
- файл C:\Capture.avi.

- 1.3 В директории C:\ создать папки: “BMP”, “BOX” и “OUT”.
 - 1.4 Установить наименьший диаметр входного зрачка объектива телекамеры.
 - 1.5 Установить удобные для наблюдения яркость и контраст изображения AVerTV.
 - 1.6 Настроить частоту звукового генератора на одну из собственных резонансных частот объекта (при этом будет слышен звук возбуждённого объекта, а на статистически однородной спекл-структуре, покрывающей изображение объекта на экране монитора, будет просматриваться некоторый регулярный рисунок).
 - 1.7 На изображении панели управления AVerTV нажать кнопку “Capture”. При этом AVerTV запишет короткий AVI-файл.
2. Получение интерферограммы.
- 2.1. Запустите InterferoAvi.exe.
 - 2.2. Нажмите кнопку «Интерферо». При этом программа произведет загрузку Avi файла, кадрирование его и обработку кадров.
 - 2.3. Изменяя значение яркости и контраста в соответствующих окнах, добейтесь картины изображения приемлемого качества. Для того чтобы принять изменения необходимо нажать кнопку «Интерферо».
 - 2.4. Запишите полученное изображение на жесткий диск компьютера, используя кнопку «Запись». Изображение будет записано в папку /Interfero
 - 2.5. Завершите работу программы кнопкой «Выход» и распечатайте полученную спеклограмму на принтере.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой семейство тёмных кривых на спеклограмме?
2. Какие участки спеклограммы соответствуют узлам стоячей волны?
3. Как относительно узловых линий располагаются выпуклости и впадины формы собственных колебаний?

4. С какой амплитудой колеблются точки поверхности объекта, лежащие на первой (относительно узловой линии) тёмной полосе? И, соответственно – на второй, на третьей и т.д.
5. Запишите значения первых десяти корней функции Бесселя первого рода нулевого порядка (воспользоваться справочником)?
6. Как скажется на качестве спеклограммы внешнее периодическое возмущение измерительной схемы, если частота этого возмущения равна или кратна частоте следования кадров AVI-файла?
7. Из каких соображений выбирается диаметр апертурной диафрагмы объектива матричной полупроводниковой телекамеры?
8. Изобразите в аксонометрии форму колебания объекта, исходя из экспериментально полученной спеклограммы.
9. Чем ограничивается максимальный порядок уверенно распознаваемой интерференционной полосы (т.е. максимальная амплитуда колебаний)?

Лабораторная работа №12

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕННЫХ ВИДЕОФРАГМЕНТОВ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Цель работы. Ознакомление с программой «InterferoAvi» для помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра; отработка методики удаленного восстановления спеклограмм по получаемым видеофрагментам колеблющегося объекта.

Оборудование: персональный компьютер Пентиум с CD-ROM, принтер.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Программа «InterferoAvi», обеспечивающая работу помехоустойчивого ЦСИ, состоит из нескольких основных блоков:

- блок регистрации изображений колеблющегося объекта;
- блок математической обработки изображений;
- блок коррекции спеклограмм;
- блок записи спеклограмм и вывода для дальнейшего анализа.

Подробно принцип работы программы и алгоритм обработки спеклограмм описан в лабораторной работе № 11.

Программа регистрирует изображение колеблющегося объекта в виде видеофрагмента, состоящего из более чем 24-х кадров с названием Capture.avi в корневом каталоге на диске С:. Нажатием кнопки «Интерферо» обеспечивается ввод в программу видеоизображения, разбиение видеоизображения по кадрам и обработка всех кадров из видеоряда по алгоритму, описанному в предыдущей лабораторной работе.

Изменяя уровни яркости и контраста с помощью соответствующих окон в программной среде, можно повысить качество зарегистрированной спеклограммы. Откорректированные спеклограммы можно записать на жесткий диск в формате графических файлов BMP. В последствии эти данные можно использовать для дальнейшего анализа.

Подготовка к выполнению лабораторной работы

На диске, выдаваемом для проведения лабораторной работы, находится программа InterferoAvi.exe, а в каталоге AVI находятся видеозаписи колеблющихся на резонансных частотах объектов, записанные помехоустойчивым ЦСИ.

1. Скопируйте программу InterferoAvi.exe на жесткий диск вашего компьютера в корневой каталог.
2. Создайте в корневом каталоге папку /Interfero для сохранения полученных результатов.
3. Скопируйте из папки на диске AVI\XXX, соответствующем номеру вашего задания, файл Capture.avi в корневой каталог на диске C:\.
4. Запустите InterferoAvi.exe.
5. Нажмите кнопку «Интерферо». При этом программа произведет загрузку Avi файла, кадрирование его и обработку кадров.
6. Изменяя значение яркости и контраста в соответствующих окнах, добейтесь картины изображения приемлемого качества. Для того чтобы провести изменения необходимо нажать кнопку «Интерферо».
7. Запишите полученное изображение на жесткий диск компьютера, используя кнопку «Запись»
8. Завершите работу программы кнопкой «Выход» и распечатайте полученную спеклограмму на принтере.

Задание 1. Получить спеклограмму колеблющегося объекта с помощью предоставленных видеозображений.

Порядок выполнения работы:

1. Откройте на диске в папке AVI/ папку с заданием 1.
2. В папке AVI/задание1/вибратор приведены серии видеозображений колеблющегося объекта на двух резонансных частотах. Для каждой частоты даны 3 видеофрагмента, отличающиеся друг от друга местом установки контактного вибратора, возбуждающего объект. Во всех случаях вибратор устанавливался максимально близко к заделке пластины. В первом случае вибратор установлен по центру объекта, во втором - в левой части объекта, в третьем - в правой части объекта.
3. В папке AVI/задание 1/динамика приведены серии видеозображений колеблющегося объекта на двух резонансных частотах. Для каждой частоты даны 3 видеофрагмента, отличающиеся друг от друга местом установки акустического динамика.

ка, бесконтактно возбуждающего объект. Во всех случаях динамик устанавливался по оси симметрии пластины. В первом случае динамик установлен в верхней части объекта, во втором - по середине объекта, в третьем - в нижней части (в области заделки) объекта.

4. Получите спеклограммы всех приведенных видеоизображений и распечатайте их на принтере.
5. Сравните полученные спеклограммы и дайте обоснование наблюдаемым изменениям картины интерференционных полос.

Задание 2. Получить спеклограммы колеблющегося объекта для пяти представленных значений резонансных частот.

Порядок выполнения работы:

1. Откройте на диске в папке AVI/ папку с заданием 2.
2. В папке AVI/задание 2 приведены видеоизображения колеблющегося объекта для пяти характерных значений резонансных частот.
3. Получите спеклограммы для всех заданных видеоизображений, распечатайте их на принтере и проведите анализ соответствующих картин интерференционных полос.

Задание 3. Получить спеклограммы колеблющегося объекта для трех резонансных частот при различных уровнях возбуждения.

Порядок выполнения работы:

1. Откройте на диске в папке AVI/ папку с заданием 3.
2. В папке AVI/задание 3 приведены видеоизображения колеблющегося объекта на 3 резонансных частотах при различных уровнях возбуждения.
3. Получите спеклограммы для всех представленных видеоизображений.
4. Сравните картины, полученных спеклограммы, и дайте обоснование наблюдаемым изменениям интерференционных полос.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните, как влияет место установки контактного вибратора на колебания объекта?
2. Поясните, почему контактный вибратор влияет на форму колебаний пластины более эффективно, чем акустический динамик?

3. Объясните, почему при возбуждении акустическим динамиком в разных областях пластины, уровень возбуждения объекта отличается?
4. Как с помощью полученных спеклограмм можно представить характер колебаний объекта?
5. Укажите, на каких спеклограммах зарегистрированы изгибные колебания объекта, на каких - крутильные, а на каких - как крутильные, так и изгибные? Укажите номер формы колебаний для каждой спеклограммы.
6. Для зарегистрированной спеклограммы основного тона колебаний, получите график распределения амплитуды колебания объекта?
7. Поясните, почему яркость полос на спеклограмме падает с увеличением номера полосы? Укажите нулевые линии на всех спеклограммах.
8. Какое влияние на форму колебаний объекта оказывает увеличение уровня его возбуждения?
9. Поясните, почему уменьшается ширина интерференционных полос по мере их удаления от нулевой полосы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т.5. Измерения и испытания/Под ред. М.Д.Генкина. М.: Машиностроение, 1981. – 496с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. -М.: Мир, 1982. - 504 с.
3. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформации. - М.: Наука, 1988. -248 с.
4. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. –М.: Мир, 1986. –328 с.
5. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия.- М.: Наука, 1985. -224 с.
6. Экспериментальное исследование пульсационно-вибрационных процессов взаимодействия потока с конструкцией / О.А.Журавлев, С.Ю.Комаров, Ю.Н.Шапошников и др. // Вестник СГАУ, 2006, №1. – С. 69-76.
7. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций: Учебное пособие/Д.С.Еленевский, О.А.Журавлёв, Ю.Н.Шапошников, Ю.Д.Щеглов, С.Ю.Комаров; Под ред. В.П.Шорина. Самара: СГАУ, 2005. – 193с.
8. Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия //Соровский образовательный журнал. 2001,Т7, №5. – С.102-109.
9. Франсон М. Оптика спеклов - М.: Мир, 1980. -172 с.
10. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.- М.; Мир, 1973.-686с.
11. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. Учебное пособие - М.: Высшая школа, 1978. -384с.
12. Иванов В.П., Степаненко Н.Д. К вопросу об определении спектров собственных форм и частот лопаток турбомашин// Сб. трудов «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей».-Самара.: КуАИ.-1965.,вып.ХІХ. –С.41-60.
13. Шапошников Ю.Н. Применение зернистости лазерного излучения для исследования вибрационных характеристик деталей //Проблемы прочности, 1978, № 10. – С. 111-113.

14. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система получения и анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов //Известия Самарского научного центра РАН, 1999, №1.- С. 134-136.
15. ГОСТ ИСО 5347-0-96. Вибрация. Методы калибровки акселерометров вибрации и удара. Ч. 0. Общие положения.
16. ГОСТ ИСО 5347-1-96. Вибрация. Калибровка акселерометров вибрации и удара. Ч. 1. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии.
17. Калибровка датчиков вибраций лазерно-голографическими методами /В.Г. Атавин, В.В. Куранов, Н.Н. Романенко и др. //Измерительная техника, 2002, №6.-С. 41-43.
18. В.П.Иванов. Колебания рабочих колес турбомашин. – М. Машиностроение, 1983.-224 с.

**Автоматизированная виброметрия
механических конструкций
на основе помехоустойчивого цифрового
спекл-интерферометра**

Лабораторный практикум

Под редакцией:
В.П. Шорина

Авторы – составители:
Журавлев О.А., Ивченко А.В.,
Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д.

Подписано в печать: 16.05.2007.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Объем: 8 печ.л.
Тираж: 200 экз. Заказ № 140

Отпечатано в типографии: АНО «Издательство СНЦ РАН»
443001, Самара, Студенческий пер., За
тел.: (846) 242-37-07