

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2004 В.С. Гуревич<sup>1</sup>, М.Е. Гусев<sup>2</sup>, В.И. Редкоречев<sup>1</sup>, В.Е. Гапонов<sup>2</sup>,  
И.В. Алексеенко<sup>2</sup>, А.М. Исаев<sup>1</sup>, А.Н. Малов<sup>3</sup>, Ю.Н. Захаров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Алматинский инженерный центр по лазерной технологии, Казахстан

<sup>2</sup> Калининградский государственный университет

<sup>3</sup> Иркутский государственный технический университет

<sup>4</sup> Нижегородский государственный университет

Последние достижения в области голографической и спекл-интерферометрии, физике твердотельных лазеров и цифровой обработки изображений создали реальные предпосылки применения голографических методов в бесконтактной диагностике на качественно новом уровне. Рассматривается общая концепция универсальной голографической установки для бесконтактных исследований *nondestructing* в промышленных условиях и приведены результаты испытания некоторых подсистем такого комплекса.

### Введение

Благодаря таким преимуществам, как бесконтактность, высокая чувствительность, возможность проведения измерений одновременно на значительных площадях для объектов любой формы и материалов, голографические методы вызывают серьезный интерес специалистов, занятых в области неразрушающих испытаний и широко используются в условиях специализированных оптических лабораторий.

Различными научными коллективами уже накоплен большой опыт практического использования голографических методов в лабораторных условиях при отработке различных конструкций. В частности, указанные методы успешно использовались при испытаниях сосудов давления, исследовани-

ях качества изготовления многослойных ячеистых конструкций, остаточных напряжений в керамических и композиционных материалах, релаксации внутренних напряжений изделий из полимеров, акустической доводке звуковоспроизводящей аппаратуры, изделий аэрокосмической промышленности и т. д. Значительный опыт накоплен также в исследовании вибрационных свойств самых различных объектов. Некоторые результаты, полученные при таких исследованиях, приведены на рис. 1 – 2.

Многолетняя практика применения голографической интерферометрии (ГИ) позволяет авторам заключить, что данные методы являются весьма эффективными и универсальными при решении задач экспериментальной механики. Как правило, с помощью

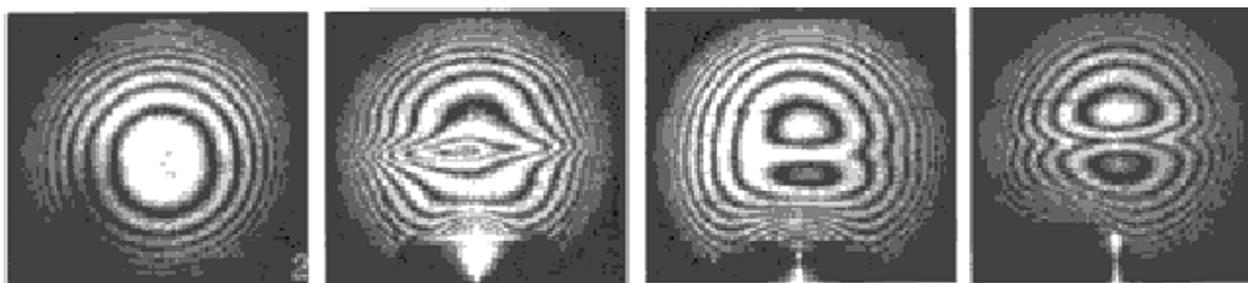


Рис. 1. Интерферограммы деформации сосуда давления:  
а – сферический баллон без дефектов, б – сварной шов с провисанием,  
в – локальный непровар, г – протяженный непровар

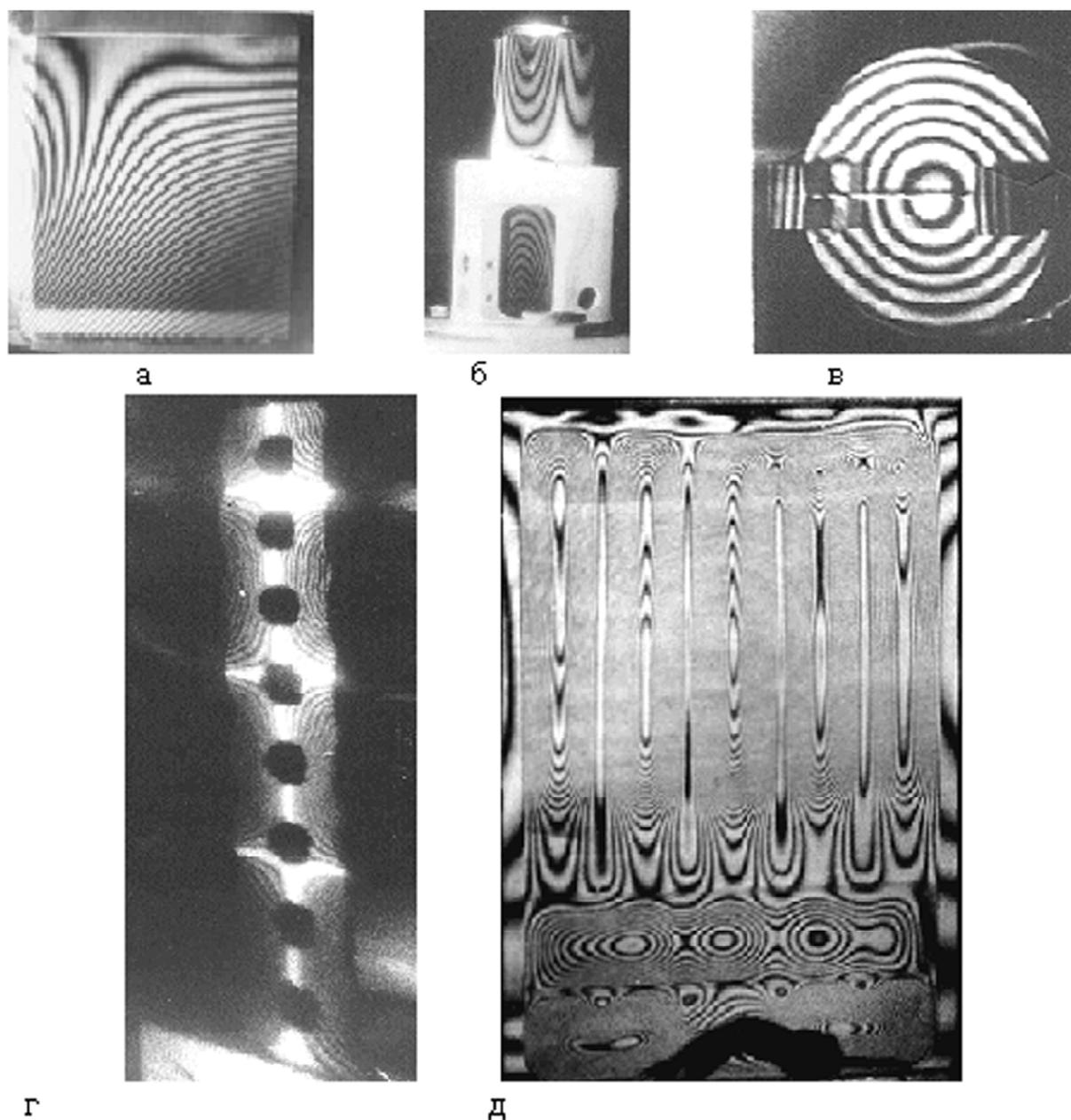


Рис. 2. Примеры голографических интерферограмм некоторых конструкций:  
 а - проявление остаточных напряжений в керамической пластине при нагреве;  
 б, в - формы колебаний элементов конструкции малогабаритных датчиков;  
 г - форма колебаний турбинной лопатки; д - проявление качества внутренней структуры ячеистой панели, выполненной сверхпластической формовкой в сочетании с диффузионной сваркой

других методов измерений и неразрушающего контроля получить подобные результаты чрезвычайно сложно, а в ряде случаев просто невозможно. Эффективность получаемых с применением ГИ результатов подтверждается также тем, что на их основе авторам практически всегда удавалось решить те конкретные проблемы и задачи, которые возникли в реальных конструкциях.

Однако особый интерес для науки и промышленности представляет использование уникальных возможностей голографии при

неразрушающих испытаниях натуральных крупногабаритных конструкций, таких как элементы энергетических силовых установок (реакторы, котлы, насосные агрегаты), изделия аэрокосмической, автомобильной, кораблестроительной промышленности, поскольку их отказы в эксплуатации приводят к существенным материальным и людским потерям, серьезным экологическим последствиям. Указанные конструкции проходят испытания на специальных стендах или на месте эксплуатации и поэтому не могут быть иссле-

дованы в лабораторных условиях.

На сегодняшний день на рынке голографического оборудования практически отсутствуют современные промышленные установки, обеспечивающие эффективное использование голографических методов для неразрушающего контроля крупногабаритных изделий в производственных условиях при реальном нагружении и не требующие от пользователя значительных усилий по адаптации оборудования для решения каждой конкретной задачи. Имеющиеся работы по использованию голографии для контроля натуральных конструкций в большинстве случаев выполняются на узкоспециализированных экспериментальных стендах, специально изготовленных для каждого конкретного случая, и носят характер уникальных экспериментов с целью демонстрации возможностей метода [1, 2, 3, 4].

В 70-80 г.г. XX века рядом западных фирм были разработаны и поставлялись на рынок мобильные импульсные голографические установки РНС (фирма Rottenkolber GmbH, Германия); ДРН (фирма Dr. Steinbichler GmbH, Германия); НС-3000 (фирма Newport Corp, США). Указанные установки изготовлены по принципу “конструктора”, т. е. собраны из узлов, изготовленных различными фирмами и практически не адаптированными друг к другу. Основными недостатками указанных систем являются:

- относительно низкая энергия излучения и недостаточная частотная стабильность рубинового лазера (лазер HLS, фирма JK Lasers, Великобритания с энергией излучения 0,5 Дж/имп);

- использование галоидосеребряных или фототермопластических регистрирующих устройств, требующих обработки и дифракционного восстановления интерферограмм;

- отсутствие универсальной системы синхронизации излучения лазера с фазой исследуемого процесса;

- слабая компьютерная оснащенность;

- чувствительность только к одному компоненту перемещений.

Авторами настоящей статьи в 80-90-е годы также был разработан ряд промышлен-

ных голографических комплексов на базе рубинового лазера, впервые оснащенных универсальной системой синхронизации [5, 6]. Хотя эти комплексы внедрены в ряде крупнейших научных и промышленных организаций СНГ, им свойственны те же основные недостатки, что и перечисленным западным аналогам. Поэтому следует полагать, что указанное оборудование является на сегодня морально устаревшим и не обеспечивает в полной мере реализации потенциальных возможностей голографических методов диагностики, что препятствует широкому внедрению голографии в инженерную практику.

В то же время новейшие достижения в голографической и спекл-интерферометрии, физике твердотельных лазеров, технике цифровой записи и обработки изображений создали реальные предпосылки для вывода голографических методов диагностики на качественно новый уровень.

В связи с изложенным авторами в 2002 г. при финансовой поддержке Международного научно-технического центра начаты работы по созданию мобильного голографического комплекса нового поколения, который позволит решать широкий круг задач в области неразрушающего контроля натуральных конструкций и будет максимально приспособлен для использования инженерами-практиками.

В настоящей работе рассматривается общая концепция универсальной голографической установки для проведения неразрушающих исследований в промышленных условиях и приводятся результаты испытания ряда подсистем такого комплекса.

### **Концепция конструкции голографического комплекса**

Проектируемая установка представляет собой автономный автоматизированный измерительный комплекс, обеспечивающий проведение полного цикла измерений деформаций реальных конструкций (в том числе крупногабаритных) в производственных условиях при различных видах динамического и статического нагружения.

В процессе создания установки планируется:

1. Разработка нового варианта мобиль-

ного двухимпульсного голографического лазера, который обеспечивает многократное повышение энергии излучения в сравнении с существующими аналогами, а также существенное повышение когерентности, качества излучения и стабильности параметров. Предлагаемый к разработке лазер превосходит по основным параметрам существующие мировые аналоги.

2. Оснащение комплекса современными цифровыми голографическими измерительными модулями (ЦГИМ) на базе ССД-камеры. Использование ЦГИМ позволит обеспечить селективную чувствительность комплекса к различным компонентам деформаций, а также получать интерферограммы практически в реальном масштабе времени без использования промежуточных носителей.

3. Разработка автоматизированной компьютерной системы синхронизации работы лазера и ЦГИМ с фазами исследуемых процессов деформирования конструкции, что позволит существенно повысить эффективность применения комплекса при решении практических задач.

4. Разработка специального программного обеспечения для управления работой лазера, процессами цифровой записи и обработки интерферограмм с целью получения измерительной информации, необходимой для инженеров-практиков (полей перемещений, первой и второй производной от перемещений), а также ее представления в виде, удобном для пользователя.

5. Включение в состав комплекса прецизионного лазерного виброметра оригинальной конструкции для обеспечения бесконтактной синхронизации измерительной части комплекса с фазами исследуемых процессов. Это позволит значительно повысить точность и достоверность измерений.

### **Технический подход**

Работа комплекса основана на использовании метода двухэкспозиционной голографической и спекл-интерферометрии, согласно которому с помощью лазерного излучения регистрируются два голографических изображения объекта, соответствующие раз-

личным фазам процесса деформирования. Регистрация осуществляется с помощью ССД-камеры, что позволяет получать фазовые картины в цифровом виде. Последующее компьютерное вычитание полученных фазовых картин приводит к появлению интерференционных полос, связывающих точки изображения с одинаковой разностью оптических фаз. Путем цифровой обработки поле разности фаз может быть преобразовано в поле перемещений или деформаций поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями.

При исследовании объектов особо большого размера (до 10 кв.м) предусмотрен комбинированный способ регистрации, а именно:

1) на первом этапе регистрация интерферограммы объекта в целом выполняется на серийных фотопластинах типа ВРП (ФПР) с последующим дифракционным восстановлением с помощью входящего в комплект установки юстировочного твердотельного лазера непрерывного излучения. Путем качественного анализа полученной интерферограммы выявляются локальные зоны поверхности объекта, в наибольшей степени интересующие исследователя.

2) на втором этапе с использованием цифровых модулей проводится подробное исследование выделенных областей поверхности объекта.

В качестве основного источника излучения используется мощный двухимпульсный лазер, что позволяет:

– за счет малой длительности импульсов устранить влияние внешних возмущающих факторов в производственных условиях;

– за счет большой энергии излучения проводить исследования крупногабаритных объектов;

– исследовать нестационарные динамические процессы деформирования, наиболее часто встречающиеся при реальных условиях нагружения;

– в широких пределах регулировать чувствительность измерительных схем путем изменения межимпульсного интервала.

Для обеспечения возможности реше-

ния максимально широкого круга задач при неразрушающих испытаниях комплекс оснащается сменными цифровыми голографическими модулями на базе CCD-камеры, а именно:

– электронный спекл-интерферометр для измерения полей перемещений при быстропротекающих воздействиях;

– сдвиговый спекл-интерферометр для измерения градиента перемещений и дефектоскопии при статическом нагружении.

Указанная система регистрации позволяет получать интерферограммы практически в реальном времени в незатемненном помещении.

Для обеспечения максимальной воспроизводимости и достоверности результатов измерений в состав комплекса включена автоматизированная система управления, которая позволяет синхронизировать работу основных устройств с заданными фазами исследуемых быстропротекающих процессов, наиболее часто встречающихся на практике, а также проводить автоматизированную расшифровку и отображение результатов. При этом в качестве универсального бесконтактного датчика, обеспечивающего получение информации о характере исследуемого процесса, планируется использовать прецизионный лазерный виброметр оригинальной конструкции.

С целью обеспечения максимальной приспособленности установки для использования в производственных условиях все вышперечисленные устройства komponуются в виде мобильного автономного комплекса. Предполагаемая компоновка комплекса представлена на рис. 3.

### Особенности конструкции основных систем

#### Импульсный лазер

Переход от диагностики отдельных деталей методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии к контролю узлов и механизмов требует значительного увеличения площади предметного поля. Эта задача может решаться двумя способами - повышением мощности когерентного источника освещения или повышением светочувствительности регистрирующей среды. Улучше-

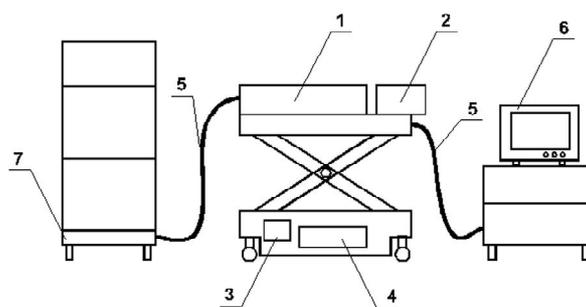


Рис. 3. Компоновка комплекса для голографических исследований:

- 1 – двухимпульсный лазер; 2 – цифровой голографический интерферометр; 3 – подъемный механизм; 4 – система охлаждения; 5 – кабель; 6 – автоматическая компьютерная система управления; 7 – блок накачки лазера

ние характеристик регистрирующей среды находится, как правило, за пределами возможностей экспериментатора, работающего в области голографической интерферометрии. В связи с этим становится актуальной проблема улучшения энергетических характеристик лазерных источников света и, прежде всего, задача выяснения предельных возможностей существующих лазеров для голографической интерферометрии.

Обычно анализ процесса получения голографических двухэкспозиционных интерферограмм при исследовании деформации поверхности диффузно отражающих предметов основывается на предположении об отсутствии изменений спектральных характеристик лазерного излучения между экспозициями. Такое условие обычно выполняется при экспериментах, использующих стабилизированные непрерывные лазеры и виброизолированные голографические установки, что позволяет исследовать, как правило, предметы относительно небольших размеров. Однако, современные применения голографической интерферометрии в промышленности для целей исследования динамических деформаций и контроля сложных крупногабаритных изделий требуют для записи голографических интерферограмм импульсных лазеров, генерирующих парные импульсы за один цикл накачки с обеспечением возможности изменения временного расстояния между импульсами в довольно широком диапазоне.

Режим генерации парных импульсов имеет ряд специфических особенностей, ко-

торые могут приводить к изменению спектральных характеристик второго импульса по отношению к первому. Одна из основных причин этого обусловлена различием температур активной среды в момент формирования каждого из импульсов пары. Изменение температуры происходит из-за разогрева активного элемента при поглощении излучения ламп накачки в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра и в результате передачи энергии кристаллической решетке при безизлучательном переходе. Разогрев кристалла приводит к изменению его плотности, показателя преломления и, как следствие, к изменению оптических характеристик резонатора лазера, что, в конечном счете, и обуславливает нестабильность спектральных характеристик генерируемых импульсов. Большое значение пороговой энергии генерации рубина и необходимость получения по крайней мере двух импульсов с высокими энергетическими параметрами при регистрации крупногабаритных объектов требует значительного уровня энергетической накачки, что, очевидно, увеличивает вероятность изменения спектральных характеристик второго импульса по отношению к первому. Другой особенностью режима генерации парных импульсов является сильная зависимость ширины и положения линии усиления рубина от температуры. Спектр излучения рубинового лазера состоит из целого ряда отдельных узких линий, определяемых различными собственными типами колебаний резонатора.

Стабильность воспроизведения частоты излучения и ширины его линии, а, следовательно, и длина когерентности, во многом определяются задающим генератором. Поэтому его конструкция для применения в импульсной голографии приобретает принципиальное значение - импульсный лазер является ключевым узлом разрабатываемого комплекса и должен обеспечивать следующие параметры:

- длина волны излучения 527 нм;
- длительность импульса излучения 10-50 нс;
- энергия излучения в импульсе до 3 Дж;
- модовый состав – одномодовый,  
одночастотный

режимы работы:

- режим генерации одиночных гигантских импульсов;
- режим генерации парных гигантских импульсов с регулируемым междуимпульсным интервалом;
- диапазон регулировки междуимпульсного интервала 1-1000 мкс.

По приведенным характеристикам проектируемый лазер превосходит мировые аналоги и обеспечивает запись во внелабораторных условиях голографических интерферграмм объектов площадью до 3х3 м. Оптическая схема лазера представлена на рис. 4.

Лазер состоит из следующих основных узлов.

#### *1. Генератор опорного излучения (ГОИ)*

Стабильность воспроизведения частоты излучения и ширины его линии, а, следовательно, и длина когерентности, во многом определяются задающим генератором – генератором опорного излучения. Поэтому его конструкция для применения в импульсной голографии приобретает принципиальное значение. Фосфатное неодимовое стекло имеет относительно широкую полосу люминесценции, поэтому, для того, чтобы получить генерацию с узкой спектральной линией и высокой спектральной стабильностью излучения, в схему генератора необходимо вводить селекционирующие элементы, использовать сложные двухрезонаторные схемы, поэтапное включение добротности и т.д., что приводит к усложнению конструкции и трудностям юстировки. Поэтому в качестве активного элемента в задающем генераторе целесообразно использовать кристалл YLF, полоса генерации которого (1.053 мкм) попадает в полосу усиления фосфатного стекла с неодимом. Для получения большей длины когерентности можно использовать кольцевой резонатор. Нечетное количество зеркал (три) и призма-крыша обеспечат поворот сечения пучка при каждом проходе. Для выделения приоритетного направления обхода резонатора в одно из его плеч устанавливается телескоп с 3х увеличением. При этом для селекции продольных мод достаточно использовать резонансный отражатель, а для селекции поперечных мод - апертурную диафрагму.

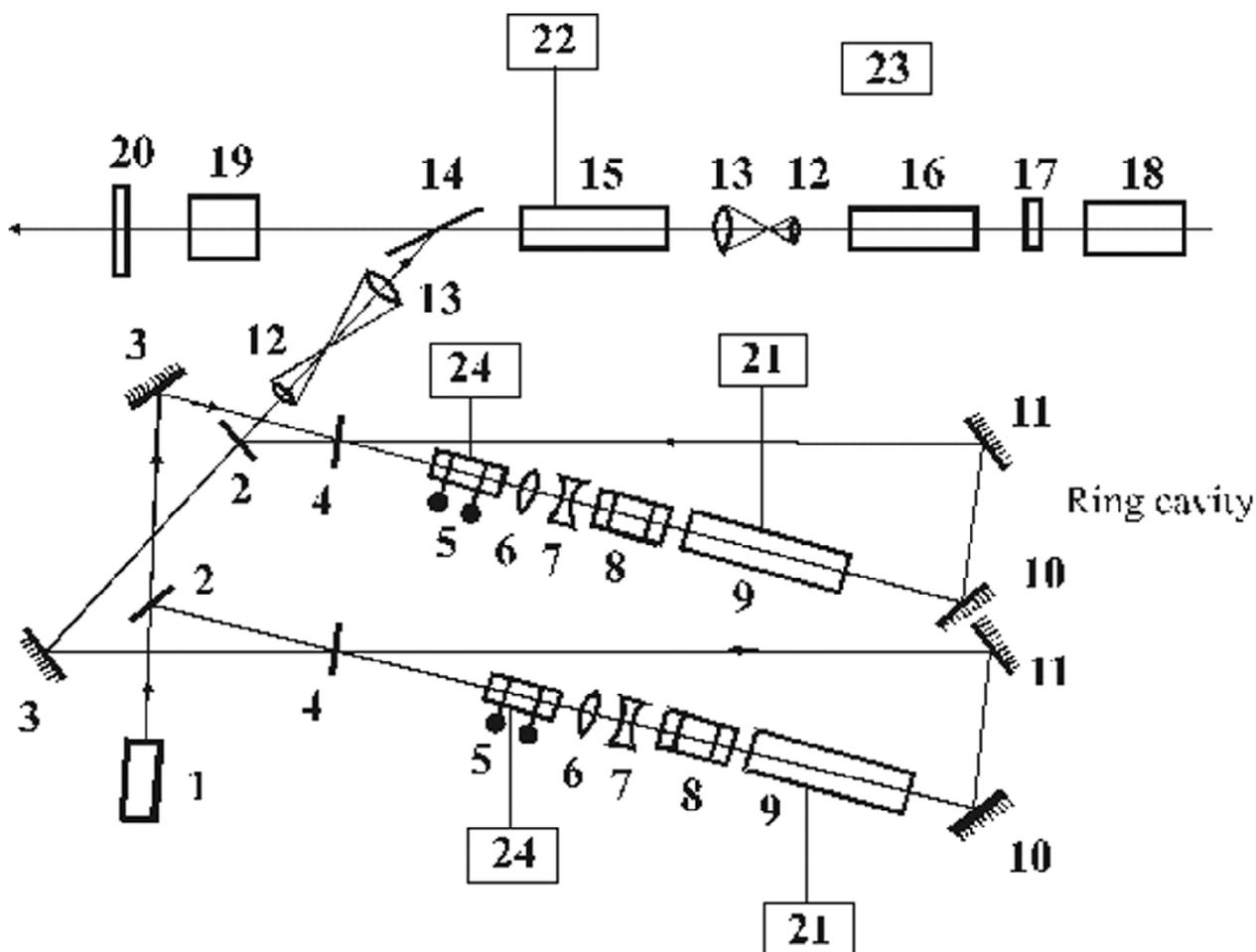


Рис. 4. Импульсный лазер:

1 - генератор опорного излучения; 2, 4 – полупрозрачное зеркало; 3-поворотное зеркало; 5- ячейка Поккельса; 6, 7 коллиматор; 8 - призма Дове; 9 – активный YLF; 10,11 – зеркала кольцевого резонатора; 12, 13 – телескоп; 14 – поляризатор; 15,16 - активные элементы усилителя Nd:Glass 17 – четвертьволновая пластина; 18 - ВРМБ зеркало; 19 – кристалл ДКДР для удвоения частоты; 20 - светофильтр; 21, 22, 23 – блоки накачки активных элементов

му. Плоскопараллельная стеклянная пластина, расположенная под углом Брюстера к оси резонатора, будет служить поляризатором излучения. Модуляция добротности излучения будет осуществляться благодаря пассивному затвору на центрах окраски в кристалле фторида лития. Длительность импульса при общей длине резонатора около 2 м составит примерно 30 нс. Резонатор должен собираться на инваровых стержнях. Головка с активным элементом должна быть установлена на термоизоляционной прокладке. Для повышения стабильности работы генератора и уменьшения габаритов источника питания, его блок питания помещается отдельно от блоков питания усилителей. В целом, ГОИ представляет собой квазинепрерывный одночастотный твердотельный лазер на кристалле YLF с длительностью накачки до 10 мс и

предназначен для формирования затравочного (опорного) излучения на длине волны 1054 нм, обеспечивающего идентичность параметров излучения двух кольцевых генераторов.

### 2. Кольцевые задающие генераторы (ЗГ)

Резонатор ЗГ образован зеркалами 4,10,11. В качестве активного элемента используется кристалл YLF (9). Каждый из двух ЗГ по сигналу открытия ячейки Поккельса (5) формирует один гигантский импульс излучения на частоте затравочного излучения. Временной интервал между импульсами, излучаемыми каждым из ЗГ, регулируется с помощью задержки сигналов открытия ячеек Поккельса.

### 3. Усилители излучения (ОУ)

В схеме используется двухкаскадный усилитель на неодимовом стекле (15, 16) обеспечивающий усиление излучения ЗГ до уров-

ня порядка 6 Дж/имп на длине волны 1054 нм.

4. *ВРМБ-зеркало* (17, 18) предназначено для обращения волнового фронта излучения, что позволяет повысить эффективность усиления за счет дополнительного прохода через усилители и устраняет искажения волнового фронта в активном веществе усилителей.

5. *Удвоитель частоты* (19,20) предназначен для получения на выходе лазера излучения в зеленой области спектра (527 нм).

Накопившиеся при генерации и предусилении пространственные возмущения волнового фронта излучения должны устраняться в фильтре пространственных частот, представляющем собой две софокусно расположенные положительные линзы с микродиафрагмой в точке общего фокуса. От размера диафрагмы будет зависеть степень фильтрации пространственных частот и профиль излучения на выходе всей системы. Профиль излучения после фильтра пространственных частот желательно иметь гипергауссовой формы, т.е. приближающейся к прямоугольной, для лучшего заполнения апертуры усилителей с целью более эффективного энергосъема инверсии в активных элементах и повышения эффективности нелинейных процессов преобразования частоты излучения. Телескоп данного пространственного фильтра также должен обеспечить согласование диаметр пучка после предусилителя с последующим основным трактом усиления. Выходная линза телескопа обеспечивает дифракционную расходимость излучения на выходе всего лазерного комплекса.

Основной тракт усиления может состоять из двух усилителей диаметром 20 и 10 мм соответственно, разделенных телескопом Кеплера для согласования диаметра пучка с их апертурами. В качестве материала активных элементов предпочтительно использовать фосфатное стекло, которое обладает достаточно высоким коэффициентом усиления при хорошем оптическом качестве элементов большего размера. Оба усилителя будут находиться на одной оси с ВРМБ-зеркалом. Накачку активных элементов основного канала усиления, также как и предусилителя, ввиду необходимости получения большой

энергии излучения предлагается выполнить традиционной ламповой. Основной канал усиления не должен срабатывать чаще одного раза в минуту. Поэтому блок питания можно минимизировать по размерам ввиду требования малого тока заряда конденсаторных батарей. Также ввиду низкой скорости основного канала усиления значительно упрощается система охлаждения всей системы.

Для обеспечения второго прохода излучения по основному каналу усиления предполагается использовать ВРМБ-зеркало, служащее также для компенсации фазовых искажений, наведенных в усилителях. Для повышения коэффициента отражения предпочтительно использовать двухкаскадную схему из двух кювет (генератор-усилитель) с четыреххлористым углеродом или титаном. Между ними предполагается установить фокусирующую линзу и нейтральный светофильтр для оптимизации параметров обращения волнового фронта. Использование ВРМБ-зеркала обеспечит гладкий профиль распределения интенсивности заданной формы на входе в систему нелинейного преобразования частоты. Использование относительно большого количества усилителей и меры по улучшению качества пучка позволят на выходе системы получить энергию излучения около 20 Дж в одиночном импульсе.

После второго прохода по основному каскаду усиления, благодаря поляризационной развязке, излучение будет направляться в нелинейный кристалл KDP, в котором будет происходить эффективная генерация второй гармоники. Благодаря гладкому профилю пучка, высокой интенсивности излучения, дифракционной расходимости излучения, оптимизации длины нелинейного кристалла, ожидается получение эффективности преобразования во вторую гармонику около 65%. В итоге на выходе из кристалла-удвоителя энергия излучения на длине волны 531 нм достигнет около 13 Дж. Затем излучение второй гармоники и остаток излучения на основной частоте будет попадать на нелинейный кристалл-сумматор KDP. Ожидается эффективная генерация третьей гармоники излучения неодимового лазера на длине волны 351 нм с эффективностью до 40% от суммар-

ной падающей энергии, что составит около 7-8 Дж. Уменьшение эффективности преобразования и, соответственно, выходной энергии третьей гармоники предпочтительно осуществлять поворотом кристалла-сумматора по оси падающего излучения или подбором соответствующей длины кристалла.

### Цифровые голографические измерительные модули ESPI-конфигурация

Оптическая схема электронного спекл-интерферометра представлена на рис. 5. Данная схема обеспечит максимальную чувствительность интерферометра к нормальным перемещениям поверхности исследуемого объекта и является наиболее предпочтительной при исследовании изгибных колебаний и упругих поперечных волн.

Для обеспечения максимального качества измерений планируется применить следующие технические решения:

- использование в интерферометре оптической системы, включающей телевизионный зум-объектив, полевую линзу и передаточную линзу, что позволит сформировать изображение объекта на ПЗС матрице телекамеры без виньетирования и аберраций;
- использование светоделителя с высоким коэффициентом отражения; при этом

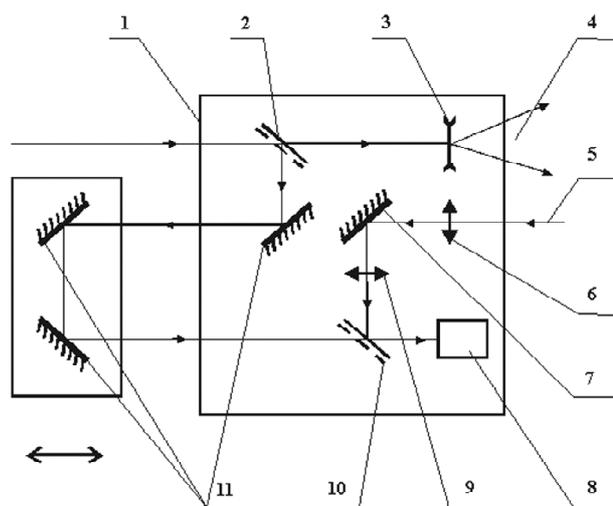


Рис. 5. Спекл-интерферометр:

- 1 – платформа интерферометра; 2 – светоделитель; 3 – формирователь объектного пучка; 4 – освещающий пучок (на объект); 5 – объектный пучок (от объекта); 6 – объектив ССД-камеры; 7 – поворотное зеркало; 8 – ССД-камера; 9 – корректирующая линза; 10 – светоделитель; 11 – поворотные зеркала опорного пучка

лучи, формирующие изображение, не проходят через светоделитель, что исключит искажения за счет переотражений от второй грани;

– формирование и передача опорного пучка на телекамеру с помощью оптического волокна, что позволит устранить искажения волнового фронта за счет дифракции на пылевых частицах и обеспечить высокую устойчивость к разбюстировке при воздействии внешних возмущающих факторов в производственных условиях.

– планируется реализовать калибровочный режим, включающий измерение с помощью компьютера соотношения интенсивностей опорного и объектного пучков на телекамере; регулировка интенсивности опорного пучка осуществляется путем расфокусировки на конце оптического волокна.

### Сдвиговый спекл-интерферометр

Конструкция подобного типа (рис. 6) обеспечивает чувствительность интерферометра к градиенту нормальных перемещений в выбранном направлении в плоскости объекта и является наиболее предпочтительным для неразрушающего контроля. Кроме того, сдвиговый интерферометр обладает высокой помехоустойчивостью и может быть использован для исследования деформаций объекта при статическом нагружении и работе лазера в режиме одиночных импульсов.

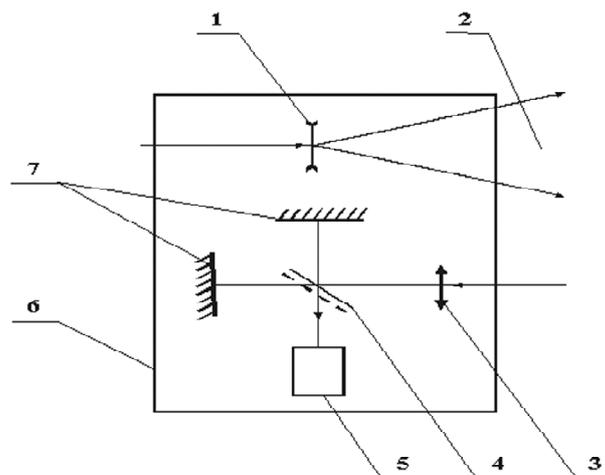


Рис. 6. Сдвиговый спекл-интерферометр:

- 1 – расширяющая линза; 2 – освещающий пучок; 3 – зум-объектив; 4 – светоделитель; 5 – ССД-камера; 6 – основание; 7 – юстируемые зеркала (одно – с пьезоприводом)

Для объединения описанных устройств в единую конструкцию мобильного комплекса используются следующие методы и технические подходы:

- в качестве средства для регистрации интерферограмм используется CCD-камера с междустрочной передачей зарядов (interline transfer format). Это позволяет обеспечить запись и запоминание экспозиций от парных импульсов на два отдельных последовательных телевизионных кадра в широком диапазоне междуимпульсных интервалов;

- для получения картины интерференционных полос используется метод с применением малого наклона опорного пучка по отношению к оси CCD-камеры, выделением интерференционного фазового члена методом быстрого преобразования Фурье и вычитанием фазовых картин, соответствующих двум импульсам излучения лазера;

- в состав автоматизированной компьютерной системы управления комплексом включена специальная подсистема, обеспечивающая синхронизацию работы CCD-камеры с моментами излучения лазерных импульсов и заданными фазами исследуемого процесса деформирования

#### **Автоматизированная компьютерная система управления (АКСУ) комплексом**

Система представляет собой управляющий компьютер, снабженный специальными управляющими платами и программным обеспечением для координации работы всего голографического комплекса в целом.

Входной информацией для АКСУ служат:

- сигнал от датчика процесса (лазерного виброметра, акселерометра, микрофона и т.д.), содержащий информацию об основных параметрах исследуемого процесса (частота, фаза, амплитуда в опорной точке);

- разрешающий сигнал от импульсного лазера о готовности к излучению очередного гигантского импульса (наличии достаточно уровня инверсной населенности в активном веществе);

- разрешающий сигнал готовности CCD-камеры к записи очередного кадра.

Система вырабатывает управляющие сигналы на запись интерферограммы при

одновременном выполнении трех условий:

- исследуемый процесс деформирования находится в заданной фазе;

- импульсный лазер готов к излучению гигантского импульса;

- CCD-камера готова к записи очередного кадра.

Совпадение всех трех вышеуказанных условий в каждом случае гарантирует строгое соответствие процесса записи интерферограмм заданным фазам процесса, что обеспечивает высокую воспроизводимость и достоверность результатов измерений.

Для реализации указанных возможностей в состав АКСУ входят ряд подсистем:

*1. Система обработки входных сигналов.*

Система включает в себя программные средства и преобразователи, которые обеспечивают усиление, коммутацию, смешивание, фильтрацию, спектральный анализ сигнала, поступающего от внешнего датчика и содержащего информацию об исследуемом процессе. На выходе подсистемы формируется сигнал, с фазами которого синхронизируется работа всех устройств комплекса.

*2. Система управления лазером*

Система выполняет две основные функции:

- компьютерное управление зарядом и поджигом импульсного лазера (установка напряжения на разрядных емкостях, формирование управляющих импульсов на включение заряда и начала поджига ламп накачки, установка временных задержек между началом накачки задающего генератора и усилителей, контроль выходных характеристик излучения);

- управление моментами открытия электрооптических затворов (формирование управляющих импульсов на открытие ЭОЗ в соответствии с заданными фазами процесса, процессом накачки и сигналом готовности CCD-камеры).

В данной подсистеме реализован ряд алгоритмов, обеспечивающих синхронизацию излучения с фазами различных быстропротекающих процессов, наиболее часто встречающихся на практике (гармонические, нестационарные, многокомпонентные вибра-

ции, ударное и взрывное нагружение, вращающиеся объекты и т.д.). При этом используются разработанные ранее схемы автоматической стабилизации и корректировки моментов выработки управляющих импульсов [7, 8].

*Система управления работой CCD-камеры.*

Система обеспечивает:

- регистрацию на два последовательных кадра и запоминание двух экспозиций, соответствующих последовательным импульсам излучения лазера и заданным фазам процесса, для чего используется интерфейсная плата, обеспечивающая подготовку CCD-камеры к записи и формирование сигнала готовности;

- генерирование цифровых интерферограмм с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье (FFT).

В состав АКСУ входит также подсистема настройки и отображения параметров.

Функциональная схема АКСУ представлена на рис. 7.

*Лазерный виброметр*

Лазерный виброметр (ЛВ) представляет собой единый оптико-механический блок, основу которого составляет интерферометр

Майкельсона (рис. 8). В качестве источника излучения в ЛВ используется непрерывный лазер мощностью 15-20 мВт. Принцип измерения основан на анализе аналогового гармонического сигнала, получаемого в реальном масштабе времени при интерференции объектного и опорного лазерных пучков. При этом интерференция измеряется в пределах отдельного спекла, что обеспечивается соответствующей оптической схемой ЛВ. Основная функция ЛВ в составе комплекса состоит в измерении амплитуд вибраций в отдельных точках объекта, вибрирующего на определенной частоте для обеспечения синхронизации работы комплекса с фазами исследуемого процесса (стационарное положение, заданная фаза колебаний, начало деформации или движения и т.д.).

*Пакет прикладных программ.*

Прикладная программа по обработке исходных интерферограмм, получаемых измерительными модулями комплекса, обеспечивает:

- повышение общего уровня контраста интерференционных полос и снижение влияния спекл-шумов (фильтрация, сплайн-аппроксимация, коррекция уровней отражательной способности объекта);

- выделение контуров интерференцион-

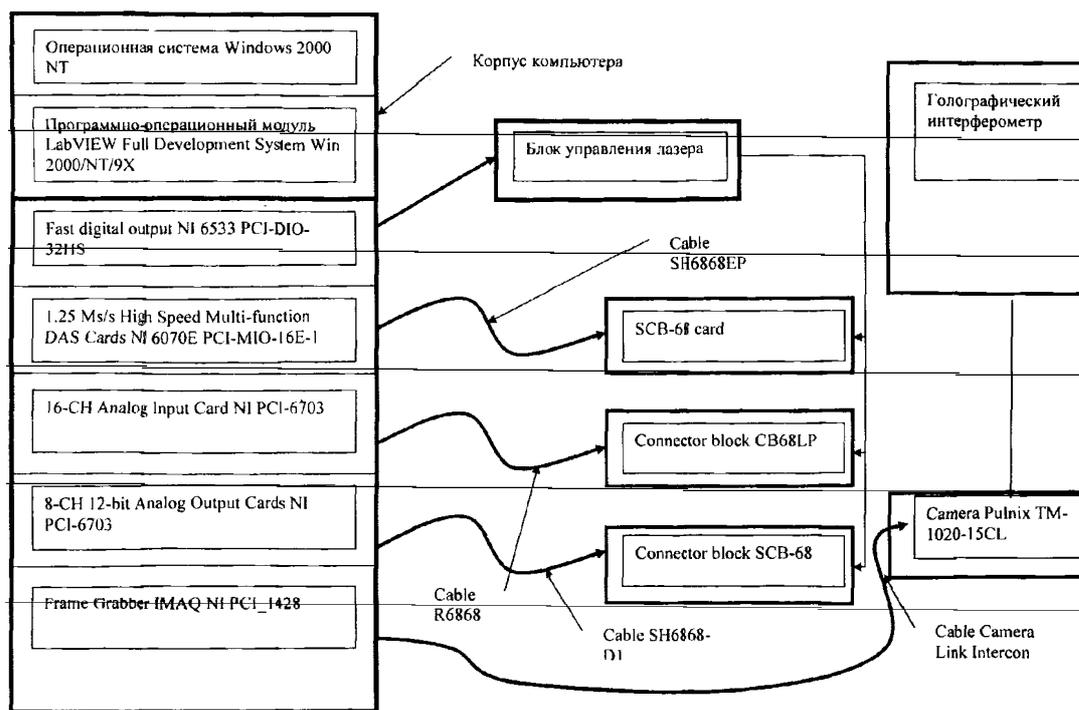
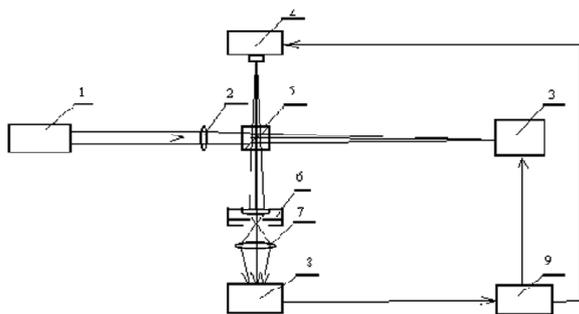


Рис. 7. Функциональная схема компьютерной системы управления



**Рис. 8.** Лазерный виброметр:

1 – лазер; 2 – длиннофокусная линза; 3 – объект; 4 – вибрирующее опорное зеркало; 5 – светоделительный элемент; 6 – фильтр оптический; 7 – линза; 8 – фотоприемное устройство (ФПУ); 9 – измерительно-управляющий комплекс.

ных полос (определение распределений экстремумов яркости, интерполяция в зонах резких изменений рельефа объекта, интерполяция в зонах слабого разрешения полос и резкого изменения характера их поведения);

- присвоение абсолютных значений (номеров) выделенным полосам;
- интерполяцию промежуточных фазовых распределений;
- определение полей распределения измеряемого параметра (нормальной и тангенциальной составляющих вектора перемещений, амплитуд вибраций);
- определение полей распределений интегральных параметров (общего вектора перемещений);
- определение первых и вторых производных от полученных распределений измеряемых параметров по заданным направлениям.

Данный пакет является наиболее общим и минимально необходимым для большинства реальных задач. В то же время, в каждом конкретном варианте требуется привязка получаемых результатов к особенностям исследуемого объекта и специфике решаемой задачи. С этой целью в программном пакете, наряду с автоматизированным вариантом выполнения каждой процедуры, обеспечивается возможность интерактивной работы оператора.

### Текущее состояние разработки

В настоящее время завершены работы по разработке и испытаниям экспериментальных образцов основных узлов и систем комплекса.

Экспериментальный образец лазера, со-

бренный на мобильном оптическом столе в соответствии со схемой рис. 3, показан на рис. 9.

Для проверки максимальных параметров лазера проводилась регистрация голограмм и интерферограмм тест-объекта, представляющего собой металлическую пластину с размерами 1500x1500x5 мм (рис 10). Колебания объекта возбуждались с помощью пьезокерамического вибратора.

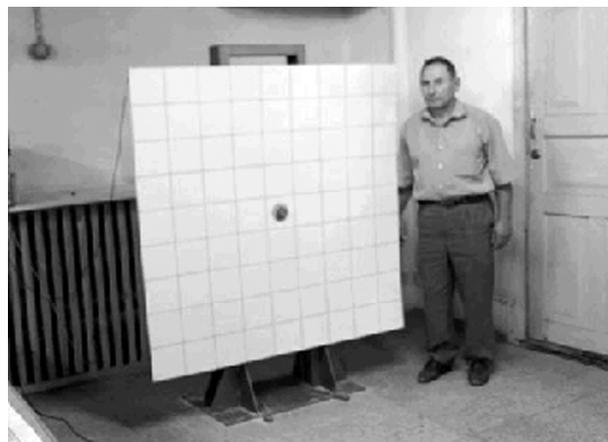
Регистрация голограмм и интерферограмм осуществлялась по схеме Лейта-Упатниекса на фотопластины ВРП. Лазер и объект располагались на полу лаборатории без какой-либо виброизоляции. При этом путем многократной регистрации проверялись:

- размер регистрируемой сцены,
- качество записи интерферограмм тест-объекта парными импульсами и
- качество записи интерферограмм одиночными импульсами.

Некоторые полученные результаты ил-



**Рис. 9.** Экспериментальный образец двухимпульсного лазера



**Рис. 10.** Тест-объект

люстрируются рис 11-13.

В ходе испытаний установлено, что предложенная схема двухимпульсного лазера обеспечивает регистрацию интерферограмм крупногабаритных объектов в условиях отсутствия виброизоляции.

Были проведены испытания работоспособности системы цифровой записи интерферограмм с использованием импульсного лазера.

Общий вид экспериментального образца электронного спекл-интерферометра представлен на рис. 14.

Испытания проводились на примере



Рис. 11. Проверка глубины регистрируемой сцены: расстояние от голограммы до тест-объекта – 4 м; расстояние от голограммы до держателя оптики – 0,5 м; глубина зарегистрированной сцены – более 3,5 м

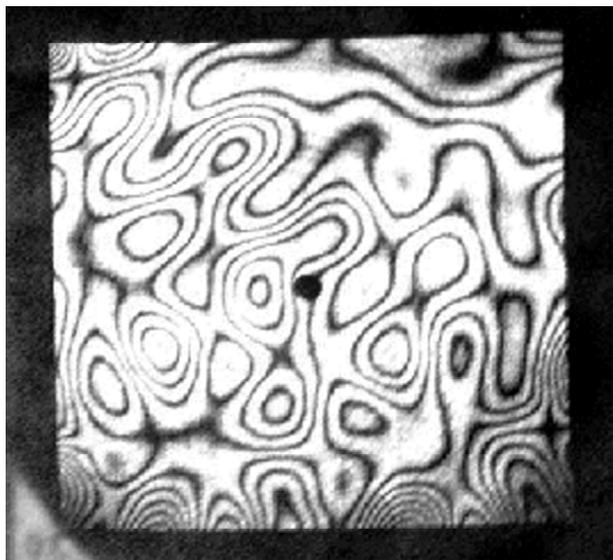


Рис. 12. Интерферограмма резонансных колебаний тест-объекта при регистрации парными импульсами: междуимпульсный интервал – 200 мкс

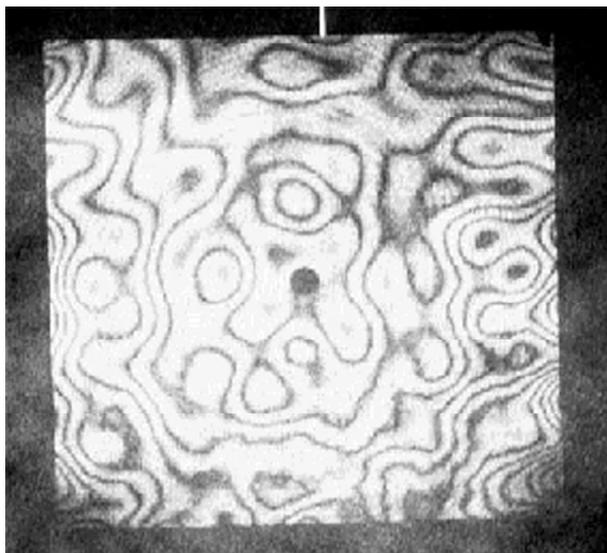


Рис. 13. Интерферограмма резонансных колебаний тест-объекта, зарегистрированная одиночными гигантскими импульсами: междуимпульсный интервал – 1 мин

цифровой регистрации резонансных колебаний стального диска диаметром 100 мм. Некоторые из полученных результатов, иллюстрирующие качество записи, представлены на рис 15-16.

### Заключение

Многолетний опыт работы авторов показывает, что голографические методы обеспечивают уникальные возможности для проведения неразрушающих испытаний конструкций. Однако широкое внедрение ГИ в инженерную практику сдерживается отсутстви-

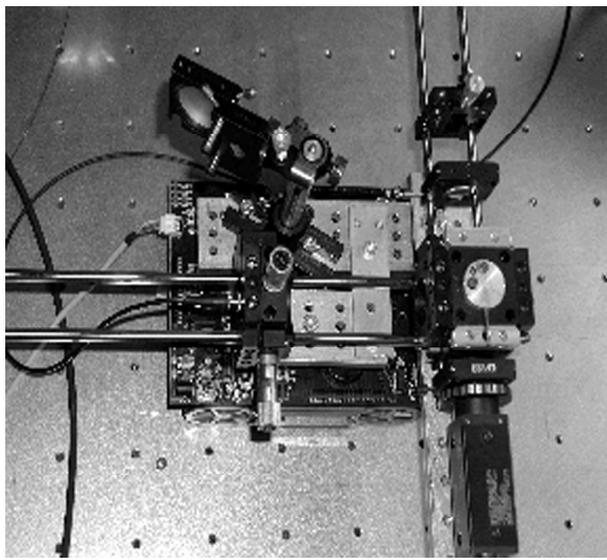


Рис. 14. Электронный спекл-интерферометр

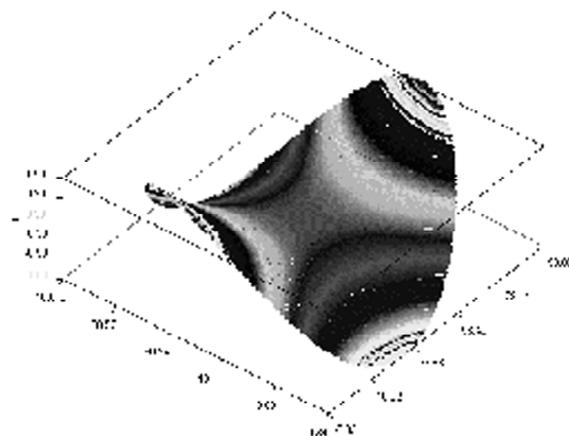
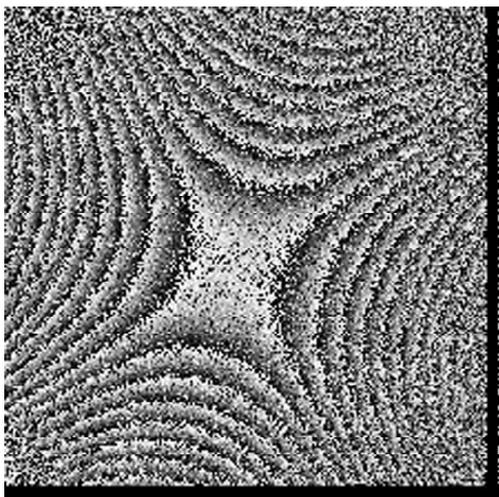


Рис. 15. Форма колебаний диска с двумя узловыми диаметрами

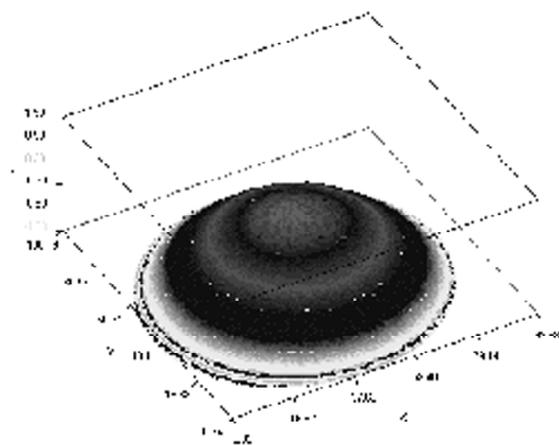
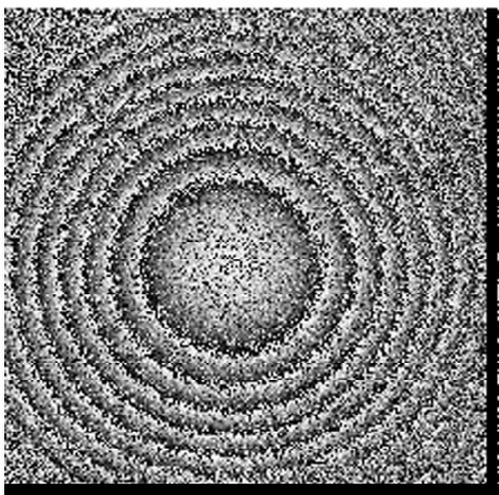


Рис. 16. Зонтичная форма колебаний

ем оборудования, позволяющего применять эти методы в производственных условиях. Для преодоления указанного ограничения авторами в рамках проекта МНТЦ к-127-2 разработан экспериментальный образец универсального мобильного голографического комплекса, который обладает рядом существенных преимуществ в сравнении с существующими аналогами, а именно:

1. Комплекс включает в себя три измерительных системы, обеспечивающих возможность получения интерферометрической информации различного уровня:

– систему регистрации сцен размером до 10 кв.м., что позволяет провести оценку деформированного состояния объекта на качественном уровне, локализовать зоны дефектов, определить наиболее нагруженные области и т.д.;

– систему цифровой регистрации интерферограмм выделенных зон размером до 50x50 см, обеспечивающую возможность автоматизированной количественной оценки напряженно-деформированного состояния;

– прецизионный лазерный виброметр, позволяющий проводить сверхточные измерения в отдельных точках поверхности.

2. Комплекс оснащен универсальной компьютерной системой управления, обеспечивающей максимальную эффективность измерений и не требующей от пользователя значительных усилий по адаптации комплекса для решения конкретных задач.

3. В качестве источника излучения использован мощный двухимпульсный лазер оригинальной конструкции, который обеспечивает практически 100% вероятность идентичности спектральных характеристик пар-

ных импульсов при максимальной длине когерентности и в широком диапазоне регулировки межимпульсного интервала. Это позволяет проводить измерения в условиях наличия внешних помех, существенно расширить диапазон измерений, повысить достоверность и воспроизводимость результатов.

4. Существенным преимуществом комплекса является его мобильность, что позволяет использовать систему в условиях цехов, полигонов, испытательных стендов.

В результате проведенных работ разработаны, изготовлены и испытаны опытные образцы основных систем мобильного голографического комплекса, предназначенного для решения широкого круга задач в науке и промышленности. Результаты испытаний показали, что разработанная аппаратура по основным рабочим характеристикам соответствует техническим требованиям, поставленным в начале разработки. В настоящее время проводятся исследовательские и опытно-конструкторские работы по доводке параметров систем комплекса до уровня опытно-промышленного образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pedrini G., Tiziani H.J.* Double Pulse-Electronic Speckle Interferometry for Vibration Analysis // *Applied Optics*, 33, 1994.
2. *Haberstock C., Freymann R., Steinbichler H., Auweraer H., Vanlanduit S.* Holographic modal analyses for the investigation of vibro-acoustic systems // *Laser Metrology and Inspection / Proceedings of SPIE*. Vol. 3823. 1999.
3. *Juptner W., Osten W, Kalms M.* Optical Inspection of Large Scale Technical Components // *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection / Proceedings of SPIE*. Vol. 3824. 1999.
4. *Krupka R., Burggraf H., Rathjen H.* Nondestructive Large Area Composite Testing using Shearography // *Optical Measurement System for Industrial Inspection / Proceedings of SPIE*, Vol. 3824. 1999.
5. *М. А. Заруцкий, В.С. Гуревич.* Голографическая установка для контроля технического состояния двигателей. А.с. СССР № 1322857, 1987.
6. *Гусев М.Е., Нарубин С.Л., Алексеенко И.В., Гуревич В.С.* Мобильный голографический комплекс // *Приборы и техника эксперимента*. 1999. № 3.
7. *Гуревич В.С., Гусев М.Е., Пятеренко С.А.* Стробирующее устройство для голографической интерферометрии неперерывных процессов. А.с. СССР № 13900991, 1987.
8. *Заруцкий М.А., Гуревич В.С., Гусев М.Е.* Голографический способ определения параметров вибраций. А.с СССР № 1271255, 1986.

#### NEW GENERATION HOLOGRAPHIC MEASUREMENT SYSTEM FOR INDUSTRIAL NONDESTRUCTIVE TESTING

© 2004 V.S. Gurevich<sup>1</sup>, M.E Gusev<sup>2</sup>, V.I. Redkorechev<sup>1</sup>, V.E. Gaponov<sup>2</sup>, I.V. Alexeseenko<sup>2</sup>, A.M. Isaev<sup>1</sup>, A.N. Malov<sup>3</sup>, Yu.N. Zaharov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AlmaAta Laser Technology Engineering Centre, Kazakhstan

<sup>2</sup> Kaliningrad State University

<sup>3</sup> Irkutsk State Technical University

<sup>4</sup> Nizhny Novgorod University

Advanced achievements in holographic and speckle interferometry, physics of solid-state lasers, digital record and image processing have created real preconditions for a conclusion of holographic methods of diagnostics to qualitatively new level. In the present work the general concept of universal holographic installation for realization of nondestructing researches in industrial conditions is considered and results of test of some subsystems of such complex are resulted.