

На правах рукописи

Зрюмов Павел Александрович

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
ПО ДИНАМИКЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ В ИЗОБРАЖЕНИИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА**

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2012

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И.Ползунова

Научный руководитель: **Пронин Сергей Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Поляков Виктор Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор, Алтайский государственный университет, кафедра прикладной физики, электроники и информационной безопасности, заведующий кафедрой

Букатый Владимир Иванович
доктор физико-математических наук, профессор, Институт водных и экологических проблем СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории физики атмосферно-гидросферных процессов

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Защита диссертации состоится 31 мая 2012 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.06 Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова

Автореферат разослан 28 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.Е. Кривобоков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Определение параметров вибрации актуально, например, для таких областей исследования, как механическая обработка металлов, перемешивание сыпучих материалов, исследование коэффициента трения покоя, динамическое воздействие на мостовые пролеты.

Разработано большое количество методов и средств, позволяющих измерять параметры гармонической вибрации. Существует две группы методов измерения параметров вибрации: контактные, подразумевающие механическую связь датчика с исследуемым объектом, и бесконтактные, т.е. не связанные с объектом механической связью.

Наиболее простыми являются контактные методы измерения вибрации. Они позволяют проводить измерения с высокой точностью в диапазоне низких частот и относительно больших амплитуд вибрации, но вследствие своей высокой инерционности, приводящей к искажению формы сигнала, становится невозможным измерение вибрации высокой частоты и малой амплитуды. Кроме того, если масса исследуемого объекта, а, следовательно, и его инерционность не велика, то такой датчик может существенно влиять на характер вибрации, что вносит дополнительную ошибку в измерения.

Одной из важных задач измерения параметров вибрации является получение частот и размахов вибрации на значительных расстояниях от измерительного устройства до объекта, такого, например, как мостовой пролет. Общим достоинством бесконтактных методов измерения является отсутствие механического воздействия на исследуемый объект и пренебрежительно малая инерционность, что позволяет избежать основных недостатков, присущих контактными методами.

В настоящее время классифицируют три группы бесконтактных методов измерения вибрации: ультразвуковые, радиоволновые и оптические. Использование ультразвуковых методов ограничивают невысокая разрешающая способность (виброперемещения от 10 мкм), сильное затухание ультразвука в воздухе, зависимость от состояния атмосферы. Недостатками СВЧ-преобразователей является необходимость выполнения сложных процедур калибровки при смене объекта или изменении расстояния до него, зависимость от состояния атмосферы. Недостатками существующих оптических методов являются жесткие требования к состоянию атмосферы, к качеству и к температуре поверхности исследуемого объекта.

Указанных недостатков лишен метод, основанный на использовании стробоскопического эффекта, однако он обеспечивает измерение только частоты вибрации. Существует метод измерения размаха вибрации по размытию изображения (E.Rule, F.J.Suellentrop and T.A.Peris Optical Method for Measurement of Vibration Amplitudes, «Rev. Scientif. Instrum.», 1959, №1, p.40-41), но он не обеспечивает измерение частоты вибрации. Современные высокоскоростные видеокамеры по-

зволяют объединить указанные методы и реализовать устройство, сочетающее в себе их положительные качества.

В простейшем варианте применение этих методов было реализовано в устройстве для визуального контроля частоты и размаха гармонической вибрации с помощью ПЗС-матрицы. Однако недостатками этого устройства является то, что процесс контроля не автоматизирован, и не исследован процесс изменения контраста в изображении парных штрихов при полигармонической вибрации.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Разработка интеллектуальных оптических средств контроля параметров вибрации объекта, основанных на применении генетического алгоритма» (Договор № 17/нр от « 10 » декабря 2008 г., договор № 28/нр от « 20 » апреля 2010 г.)

Целью работы является создание оптического метода и программно-аппаратного комплекса измерения частоты и размаха вибрации, основанного на использовании стробоскопического эффекта и изменении контраста в оптическом изображении тест-объекта.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачи:

1. Выполнить аналитический обзор методов и средств измерения параметров вибрации и обосновать необходимость создания нового оптического метода и средства измерения частоты и размаха вибрации.

2. Разработать модель изменения контраста в изображении тест-объекта в виде парных штрихов с различными пространственными частотами в зависимости от частоты и размаха полигармонической вибрации при условии стробоскопического эффекта и от задаваемых параметров видеокамеры.

3. Провести экспериментальные исследования изменения контраста в изображении парных штрихов в зависимости от их пространственной частоты, размаха и частоты гармонической вибрации, а также от времени накопления линейного ПЗС-фотоприемника.

4. Разработать программно-аппаратный комплекс для измерения частоты и размаха гармонической вибрации.

Объектом исследования является оптический метод измерения частоты и размаха гармонической вибрации, основанный на применении стробоскопического эффекта и изменения контраста в динамическом изображении.

Методы и достоверность результатов исследований. В процессе выполнения поставленных задач были использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Для калибровки экспериментальной установки использовали генератор сигналов низкой частоты ГЗ-118 с погрешностью 0,01 Гц, объект-микрометр в проходящем свете (ОМП) с ценой деления шкалы 0,01 мм,

которые обеспечивали высокую точность определения частоты вибрации, амплитуды вибрации и размеров штрихов тест-объекта.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель изменения контраста в динамическом изображении параллельных парных штрихов в зависимости от частоты и размаха стационарной вибрации тест-объекта, на котором расположены парные штрихи, а также от кадровой частоты и времени экспозиции видеокамеры.

2. Экспериментальная установка для исследования параметров гармонической вибрации, которая содержит звуковой генератор синусоидальных колебаний, динамик, на диффузоре которого закреплен тест-объект, видеокамеру и персональный компьютер.

3. Экспериментальные исследования изменения контраста в изображении парных штрихов от параметров стационарной вибрации

4. Средство измерения параметров гармонической вибрации и программное обеспечение для обработки изображения тест-объекта

Научная новизна полученных результатов.

1. На основе теории О'Нейла разработана и экспериментально подтверждена модель изменения контраста в динамическом изображении тест-объекта в виде параллельных парных штрихов в зависимости от их пространственной частоты, частоты и размаха вибрации тест-объекта, а также от кадровой частоты и времени экспозиции ПЗС-фотоприемника.

2. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что нулевой контраст в изображении парных штрихов возникает в той паре, которая имеет размер штрихов равный размаху вибрации, при условии равенства кадровой частоты ПЗС-фотоприемника частоте вибрации (стробоскопический эффект).

3. Введено новое понятие “частотно-контрастная характеристика стробоскопического эффекта” для разработанной математической формулы, по которой определяют диапазон пространственных частот тест-объекта и изменение контраста в них.

4. На основе стробоскопического эффекта и признака нулевого контраста разработан программно-аппаратный комплекс для измерения частоты и размаха вибрации. Применение генетического алгоритма позволило увеличить быстродействие при измерении частоты вибрации.

5. Обнаружен эффект оптических биений в изображении вибрирующих парных штрихов, который возникает при наложении двух гармонических колебаний с близкими частотами и проявляется в периодическом изменении контраста.

Практическая значимость работы состоит в исследовании движения материальных объектов и взаимодействия между ними по параметрам вибрации, возникающей, например, при механической обработке металлов, перемешивании сыпучих материалов, движении соприкасающихся поверхностей, выполненных из наноматериалов, динамическом воздействии на мостовые пролеты и т.д.

Реализация результатов исследований.

Разработанное средство измерения параметров гармонической вибрации внедрено в лаборатории ООО «Малое инновационное предприятие сельскохозяйственного назначения АлтГТУ» для исследования установок по перемешиванию жидких кормов.

Апробация работы.

Материалы работы обсуждались на научно-технических семинарах кафедры информационных технологий АлтГТУ, а также докладывались на различных конференциях, среди которых: Международная научно-практическая конференция «Виртуальные и интеллектуальные системы» (Барнаул, 2008-2011), XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технология» (Томск, 2009), VII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 2009), I научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2010), XLVIII Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2010), Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» (Оренбург, 2009), Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Молодая мысль: Наука, технологии и инновации» (Братск, 2010), Международная научно-практическая конференция «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010» (Одесса, 2010).

Публикации. По материалам исследований диссертации опубликована 31 печатная работа, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, 2 монографии, 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 102 страницы, включая 32 рисунка, 2 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методы исследований, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, приведено краткое описание каждой главы.

В первой главе «Аналитических обзор существующих методов и средств измерения параметров гармонической вибрации» проведен обзор и анализ методов и средств измерения параметров гармонической вибрации и приведена их классификация. Анализ данных методов позволил сделать вывод о перспективности разработки оптического метода и средства измерения частоты и размаха вибрации, основанного на использовании стробоскопического эффекта и изменении контраста в изображении парных штрихов. Изменение контраста изображения тест-объекта при продольном и поперечном смещении изучал О'Нейл.

При перемещениях происходит смаз изображения. Он дал теоретическое описание этим явлениям в виде частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Изменение контраста в изображении радиальной миры при продольном смещении он подтвердил экспериментально и установил наличие положительного, нулевого и отрицательного контраста. Однако эти эффекты не были подтверждены О'Нейлом экспериментально для поперечного смещения, тем более для периодических смещений. С учетом этого формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе «Теоретические исследования изменения контраста в изображении парных штрихов от частоты и размаха гармонической вибрации» приведена модель изменения контраста в динамическом изображении параллельных парных штрихов в зависимости от частоты и размаха стационарной вибрации тест-объекта, на котором расположены парные штрихи, а также от кадровой частоты и времени экспозиции видеокамеры.

Модель измерения параметров гармонической вибрации основана на использовании стробоскопического эффекта. При кадровой частоте видеокамеры f_{TV} , равной частоте вибрации объекта f_0 , наблюдается неподвижное изображение тест-объекта. При этом размах вибрации R можно определить по размытию изображения тест-объекта.

Несмотря на то, что изображение вибрирующего тест-объекта при стробоскопическом эффекте неподвижно, оно все-таки отличается от изображения неподвижного тест-объекта своим контрастом на высоких пространственных частотах. Поэтому изображения, возникающие при стробоскопическом эффекте, будем называть квазистатическими. Также следует отметить, что контраст в изображении тест-объекта может существенно изменяться в зависимости от размаха вибрации и времени экспозиции.

Под контрастом K понимают отношение разности яркостей в изображении к их сумме:

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (1)$$

где B_{\max} и B_{\min} – максимальная и минимальная яркости в изображении тест-объекта соответственно.

В изображении неподвижного тест-объекта максимальная яркость приходится на область между штрихами, а минимальная – на штрихи, поэтому для всех парных штрихов формула (1) дает положительный контраст. В квазистатическом изображении вибрирующего тест-объекта в штрихах с различными пространственными частотами наблюдаются изменения контраста. Если для описания контраста использовать классическую формулу (1), то существенного отличия контраста не получим. Почти у всех парных штрихов можно выделить максимальную и минимальную яркости. Поэтому контраст всегда будет положительным, хотя даже визуально наблюдаются явные отличия. Для исключения возникающей неопределенности запишем формулу (1) в виде:

$$K = \frac{B_m - B_u}{B_m + B_u}, \quad (2)$$

где B_m – яркость в фиксированной области изображения между штрихами, и $B_{ш}$ – яркость в фиксированной области изображения штриха.

Следовательно, парные штрихи имеют положительный контраст, если яркость между штрихами выше, чем яркость темных штрихов в изображении тест-объекта. Пара штрихов имеет нулевой контраст, если яркости в изображении штрихов и между ними равны. Парные штрихи имеют отрицательный контраст, если яркость между штрихами меньше, чем яркость самих штрихов.

Таким образом, формула (2) верно интерпретирует изменения контраста в изображении парных штрихов, но она не в состоянии предсказать его изменение.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), предложенная О'Нейлом, показывает изменение контраста в изображении тест-объекта в зависимости от изменения пространственной частоты. Для матричного фотоприемника ЧКХ вдоль оси перемещения изображения имеет вид:

$$ЧКХ = \frac{\sin(\pi v t_{экс})}{\pi v t_{экс}} \cdot \frac{\sin(\pi v p)}{\pi v p}, \quad (3)$$

где v – скорость перемещения изображения тест-объекта относительно фотоприемника; $t_{экс}$ – время экспозиции; v – пространственная частота парных штрихов; p – размер дискретных фоточувствительных элементов.

Первый сомножитель в формуле (3) характеризует влияние вибрации на контраст в изображении парных штрихов. Вторым сомножителем в этой формуле характеризует влияние размера дискретного фоточувствительного элемента на контраст в изображении парных штрихов. Его влияние на результат эксперимента желательно исключить. Этой цели можно достичь при калибровке измерительной системы в статическом изображении штрихов тест-объекта. Необходимо установить такое увеличение оптической системы, чтобы светлый промежуток между штрихами в изображении тест-объекта на самой высокой пространственной частоте составлял $1 \div 2$ пикселя, что соответствует размеру $1p \div 2p$ мм в области фотоприемника.

Очевидно, что статическое изображение можно получить при стробоскопическом эффекте, когда частота вибрации тест-объекта f_0 равна кадровой частоте ПЗС-фотоприемника $f_{тв}$. Величину пространственного смещения в этом случае может определять время экспозиции фотоприемника $t_{экс}$. Задавая время экспозиции у фотоприемника равным периоду смены кадров, а также принимая во внимание стробоскопический эффект, когда каждая точка тест-объекта за время смены кадров проходит путь L , равный удвоенному размаху вибрации $2R$, аргумент синуса в формуле (3) преобразуется к виду:

$$\pi v \cdot t_{экс} = \pi v \cdot L = \pi v \cdot 2R. \quad (4)$$

Следовательно, аргумент синуса в формуле (4) будет представлять собой величину, не зависящую от времени.

Обозначим размеры штриха равные a и расстояние (период) между центрами штрихов A . Причем размеры штрихов и расстояние между ними равны. Учитывая, что размер $A = 2a$ и пространственная частота $v = 1/A$, из аргумента функции $\sin(\pi v \cdot 2R)$ несложно получить условие возникновения первого нулевого контраста: размах вибрации R должен быть равен ширине штриха a , то есть $R = a$.

Таким образом, опуская постоянный множитель в (3), изменение контраста в парных штрихах при стробоскопическом эффекте можно записать в виде:

$$ЧКХ = \frac{\sin(\pi \nu t_{\text{экс}})}{\pi \nu t_{\text{экс}}} = \frac{\sin(\pi \nu S)}{\pi \nu S}, \quad (5)$$

где S – расстояние, на которое перемещаются штрихи тест-объекта за время экспозиции $t_{\text{экс}}$.

Первым критерием возникновения нулевого контраста является стробоскопический эффект, поэтому назовем ЧКХ (5) – ЧКХ стробоскопического эффекта. Данная формула является теоретической основой для измерения параметров вибрации. При кадровой частоте f_{TV} , равной частоте вибрации f_0 ($f_{TV} = f_0$), а также равенстве времени экспозиции $t_{\text{экс}}$ времени смены кадров t_s ($t_{\text{экс}} = t_s$) переход ЧКХ через нуль характеризует возникновение нулевого контраста в изображении парных штрихов с пространственной частотой ν_0 , равной:

$$\nu_0 = \frac{1}{A} = \frac{1}{2a} = \frac{1}{S} = \frac{1}{2R}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует еще один важный теоретический вывод. Нулевой контраст возникает в той паре штрихов, в которой ширина штриха равна размаху вибрации: $a = R$. Этот вывод не противоречит результату, полученному О'Нейлом для радиальной мины.

Согласно ЧКХ, в изображении парных штрихах, имеющих частоты ν менее, чем ν_0 , должен наблюдаться положительный контраст, а в изображении парных штрихов с пространственной частотой выше, чем ν_0 – отрицательный контраст.

В качестве основных параметров вибрации приняты частота f_0 , период $T_0 = 1/f_0$ и размах R , а в качестве основных параметров ПЗС-фотоприемника – время экспозиции $t_{\text{экс}}$, частота кадров f_{TV} и время кадра $t_s = 1/f_{TV}$.

Из формулы ЧКХ (5) видно, что изменение контраста зависит от расстояния S , пройденного тест-объектом, поэтому необходимо выразить изменение расстояния от указанных основных параметров.

Пусть гармонические вибрации тест-объекта имеют период T_0 и размах R , как показано на рисунке 3. Линейный ПЗС-фотоприемник регистрирует процесс вибраций за время экспозиции $t_{\text{экс}}$. Считывание изображений с линейного ПЗС-фотоприемника повторяется с периодом смены кадров t_s . Найдем расстояние S_i , на которое перемещаются штрихи тест-объекта за время экспозиции $t_{\text{экс}}$ в любом i -ом кадре.

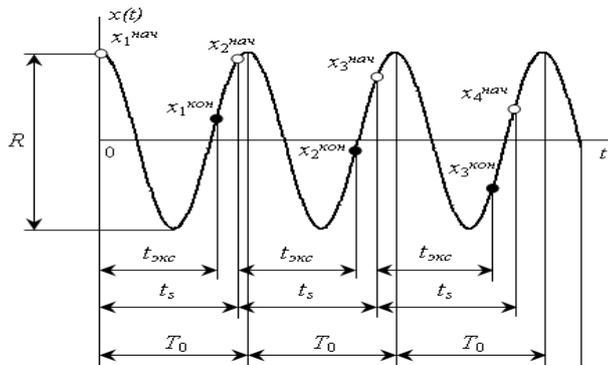


Рисунок 3 – Графическое представление пространственно-временного процесса вибраций тест-объекта с помощью линейного ПЗС-фотоприемника

Как видно из рисунка 3, за время экспозиции $t_{\text{экс}}$ в первом кадре тест-объект пройдет расстояние:

$$S_1 = 2R - |x_1^{\text{нач}} - x_1^{\text{кон}}|.$$

За время экспозиции $t_{\text{экс}}$ во втором кадре расстояние равно:

$$S_2 = 2R - |x_2^{\text{нач}} - x_2^{\text{кон}}|.$$

Следовательно, за время экспозиции $t_{\text{экс}}$ в i -ом кадре расстояние, пройденное тест-объектом, равно:

$$S_i = 2R - |x_i^{\text{нач}} - x_i^{\text{кон}}|, \quad (7)$$

где $x_i^{\text{нач}}$ – начальное положение тест-объекта в i -ом кадре; $x_i^{\text{кон}}$ – конечное положение тест-объекта в i -ом кадре.

Для вычисления значений $x_i^{\text{нач}}$ и $x_i^{\text{кон}}$ представим закон вибраций тест-объекта в виде:

$$y = \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 t).$$

Для вычисления $x_i^{\text{кон}}$ за время смены кадров t_s составим математическую цепочку:

$$\begin{aligned} x_1^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot t_s), \\ x_2^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot 2t_s), \\ x_3^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot 3t_s), \\ &\vdots \\ x_i^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot i \cdot t_s) = \frac{R}{2} \cos(2\pi \cdot i \cdot \beta), \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\beta = f_0 \cdot t_s = \frac{t_s}{T_0} = \frac{f_0}{f_{TV}} \quad (9)$$

– коэффициент, характеризующий отношение периода смены кадров к периоду вибрации тест-объекта, или частоты вибрации к кадровой частоте линейного ПЗС-фотоприемника.

Для вычисления $x_i^{\text{нач}}$ за время экспозиции $t_{\text{экс}}$ составим математическую цепочку:

$$\begin{aligned} x_1^{\text{нач}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot t_{\text{экс}}), \\ x_2^{\text{нач}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot (t_s + t_{\text{экс}})), \\ x_3^{\text{нач}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot (2t_s + t_{\text{экс}})), \\ &\vdots \\ x_i^{\text{нач}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot ((i-1) \cdot t_s + t_{\text{экс}})). \end{aligned} \quad (10)$$

Введем коэффициент γ , характеризующий отношение разности периода смены кадров и времени экспозиции к периоду вибраций тест-объекта:

$$\gamma = \frac{t_s - t_{\text{экс}}}{T_0} = \beta \left(1 - \frac{t_{\text{экс}}}{t_s} \right). \quad (11)$$

Подставляя (8), (10) в (7) и учитывая коэффициенты (9) и (11), получим расстояние S_i , которое проходит тест-объект за время экспозиции $t_{\text{экс}}$ в i -ом кадре:

$$S_i = 2R - \frac{R}{2} |\cos(2\pi(i\beta - \gamma)) - \cos(2\pi(i-1)\beta)|. \quad (12)$$

Подставляя S_i из (12) в формулу (5), можно вычислить изменения контраста в изображении парных штрихов тест-объекта:

$$\text{ЧКХ}_i = \frac{\sin(\pi\nu S_i)}{\pi\nu S_i}. \quad (13)$$

Получен очень важный результат. При неизменном размахе вибрации контраст в изображении штрихов может меняться от кадра к кадру, то есть во времени. Это означает, что на месте светлого промежутка между штрихами через определенное время может возникнуть темный промежуток.

При условии $t_{\text{экс}} = t_s$, имеем простое выражение:

$$S_i = 2R. \quad (14)$$

Следовательно, расстояние, которое проходят парные штрихи при гармонической вибрации в любом i -ом кадре, остается неизменным, поэтому и ЧКХ_i тоже остается неизменной в любой момент времени.

Представим закон вибраций тест-объекта в виде:

$$y(t) = \sum_{j=1}^n \frac{R_j}{2} \cos(2\pi f_j t), \quad (15)$$

где j – номер гармоники.

Если вибрация содержит одну гармонику, то

$$y(t) = \frac{R_1}{2} \cos(2\pi f_1 t). \quad (16)$$

Путь, проходимый тест-объектом за время кадра t_s в любом i -ом кадре будет равен:

$$S_i = 4y_i = 2R_1 \cos(2\pi f_1 i t_s) = 2R_1 \cos(2\pi f_1 \frac{i}{f_{tv}}), \quad (17)$$

При условии стробоскопического эффекта, когда $f_1 = f_{tv}$, значение косинуса всегда равно единице при любом i . Поэтому путь S_i остается неизменным и равным:

$$S_i = 2R_1, \quad (18)$$

Согласно формуле (13) остается неизменной и частотно-контрастная характеристика:

$$\text{ЧКХ}_i = \frac{\sin(\pi\nu S_i)}{\pi\nu S_i} = \frac{\sin(\pi\nu 2R_1)}{\pi\nu 2R_1}. \quad (19)$$

Как видно из формулы (19), в случае одной гармоники мы будем наблюдать постоянный контраст во всех парных штрихах тест-объекта в любой момент времени. Нулевой контраст будет в паре штрихов с пространственной частотой:

$$\nu = \frac{1}{2R_1}. \quad (20)$$

Если вибрация содержит две гармоники, то путь, проходимый тест-объектом за время t_s в любом i -ом кадре будет равен:

$$S_i = 4y_i = 2R_1 \cos(2\pi f_1 \frac{i}{f_{iv}}) + 2R_2 \cos(2\pi f_2 \frac{i}{f_{iv}}). \quad (21)$$

При условии, что $f_{iv} = f_1$, значение S_i будет равно:

$$S_i = 2(R_1 + R_2 \cos(2\pi f_2 \frac{i}{f_{iv}})). \quad (22)$$

Соответственно, частотно-контрастная характеристика примет вид:

$$ЧКХ_i = \frac{\sin(\pi 2(R_1 + R_2 \cos(2\pi f_2 \frac{i}{f_{iv}})))}{\pi 2(R_1 + R_2 \cos(2\pi f_2 \frac{i}{f_{iv}}))}. \quad (23)$$

Из формулы (23) можно сделать следующий вывод: при наличии двух гармоник в сигнале, который создает вибрацию тест-объекта, в штрихах должны наблюдаться периодические изменения контраста. В частном случае, когда $R_1 = R_2$ и близких частотах $f_1 = f_{iv}$ и $f_2 \approx f_{iv}$, получим медленно изменяющееся значение S_i от 0 до $4R_1$. Этот результат характерен для известного физического эффекта биений. С увеличением разности частот между f_2 и f_{iv} уменьшается период изменения контраста в штрихах тест-объекта.

При наличии n гармоник, характеризующих вибрацию, амплитуду сигнала в i -ом кадре можно записать в виде:

$$y_i = \sum_{j=1}^n \frac{R_j}{2} \cos(2\pi f_j i t_s). \quad (24)$$

Соответственно этой амплитуде, путь, проходимый тест-объектом, может быть представлен как:

$$S_i = 4y_i = \sum_{j=1}^n 2R_j \cos(2\pi f_j \frac{i}{f_{iv}}). \quad (25)$$

При этом частотно-контрастная характеристика вычисляется по формуле (13), а переходы частотно-контрастной характеристики через первый ноль вычисляются по формуле:

$$\nu_i = \frac{1}{S_i}. \quad (26)$$

В третьей главе «Экспериментальные исследования изменения контраста в изображении парных штрихов от частоты и размаха гармонической вибрации» приведены экспериментальные исследования изменения контраста в изображении парных штрихов от параметров стационарной вибрации.

Для исследования гармонических вибраций была разработана экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 4. Экспериментальная установка состоит из звукового генератора синусоидальных колебаний, динамика, на диффузоре которого закреплен тест-объект, видеокамеры и персонального компьютера.

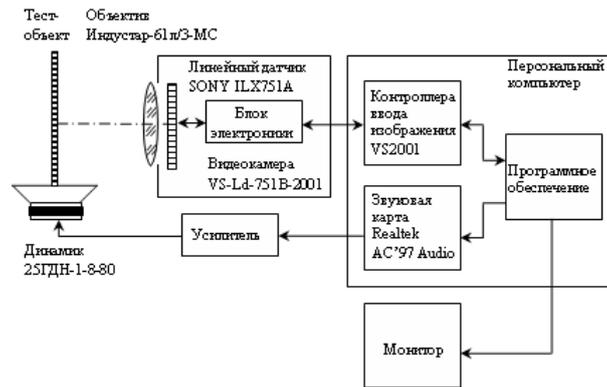


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки

Генератором формируют синусоидальный сигнал с задаваемой частотой и размахом в диапазоне частот от 20 Гц до 2 кГц с амплитудой напряжения от нуля до 1 В, который через усилитель приводит в движение диффузор динамика 25ГДН-1-8-80. К диффузору динамика жестко прикреплен тест-объект.

Видеокамера устанавливается от тест-объекта на расстоянии 0,3 м и состоит из объектива Индустар-61л/3-МС и линейного датчика VS-Ld-751B-2001 с электронным блоком ввода данных в персональный компьютер. С помощью программного обеспечения можно изменять кадровую частоту видеокамеры и время экспозиции.

Тест-объект представляет собой десять пар черных штрихов, нанесенных на белую бумагу и расположенных параллельно друг другу. Ширина штрихов и размер светлого промежутка между ними равны, поэтому коэффициент заполнения составляет 0,5.

Длина штрихов равна 40 мм. Ширина штриха в первой паре равна $0,91 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Размеры штрихов в последующих парах составляют 0,91; 0,83; 0,75; 0,66; 0,58; 0,50; 0,42; 0,33; 0,25; 0,17 мм соответственно с аналогичной погрешностью.

Пространственные частоты пар штрихов, равные количеству штрихов проходящих на единицу длины, составляют 0,54; 0,60; 0,67; 0,75; 0,86; 1,00; 1,20; 1,50; 1,99; 2,99 мм^{-1} соответственно (рисунок 5).

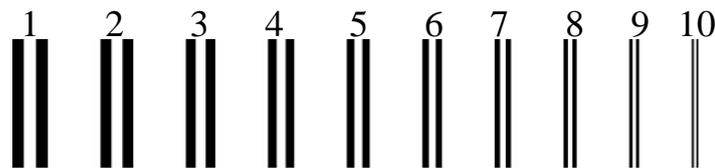


Рисунок 5 – Статическое изображение тест-объекта в виде набора парных штрихов

Теоретически при стационарной гармонической вибрации и стробоскопическом эффекте контраст остается неизменным во времени во всех штрихах.

При проведении эксперимента задавали сигнал, изменяющийся по гармоническому закону с частотой $f_1 = 25 \text{ Гц}$ и размахом $R_1 = 0,42 \text{ мм}$, кадровую частоту $f_{\text{TV}} = 25 \text{ Гц}$. Теоретическую ЧКХ_i рассчитывали по формуле (19). Она представлена на рисунке 6, б пунктирной линией.

На рисунке 6, а показано изображение вибрирующих штрихов. Как видно из рисунка, в любых двух произвольных сечениях изображения (А, В) контраст со временем остается неизменным во всех штрихах, что подтверждает справедливость формул (19) и (20).

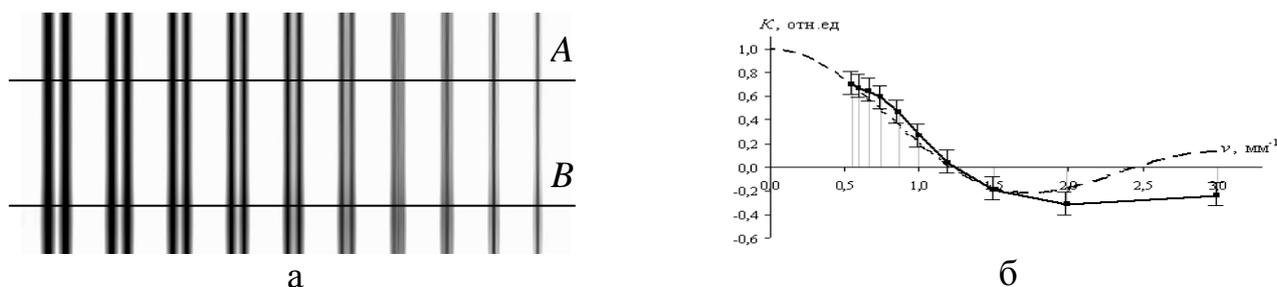


Рисунок 6 – Квазистатическое изображение вибрирующего тест-объекта (а) и график изменения контраста в парных штрихах (б)

Экспериментальный график изменения оптического сигнала в изображении штрихов от номера фоточувствительного элемента представлен на рисунке 7. Цифрами обозначены сигналы, принадлежащие соответствующей паре штрихов.

По формуле (2): $K = (S_M - S_{ш}) / (S_M + S_{ш})$, – рассчитывали контраст в каждой паре штрихов. Результат расчета представлен на рисунке 6, б сплошной линией.

Как видно из рисунка, теоретический и экспериментальный графики хорошо совпадают в области первого перехода ЧКХ через ноль.

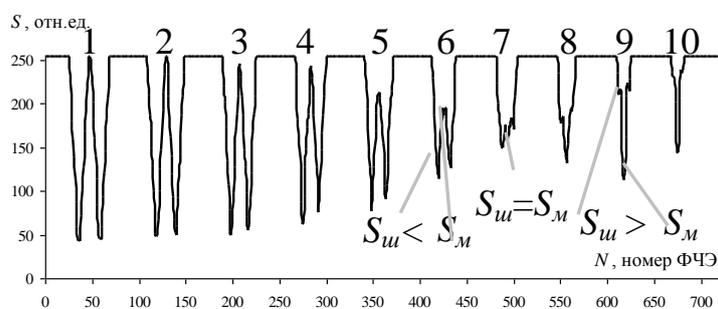


Рисунок 7 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов от номера фоточувствительного элемента (ФЧЭ)

На рисунке 8 представлены три изображения вибрирующего тест-объекта по гармоническому закону с частотой $f_1 = 25$ Гц и размахами $R_1 = 0,24$ мм, $R_1 = 0,36$ мм и $R_1 = 0,42$ мм соответственно. Как видно из рисунка, с возрастанием размаха вибрации нулевой контраст последовательно «перемещается» от одной пары штрихов к другой. При размахе $R_1 = 0,24$ мм нулевой контраст возникает в 9-ой паре штрихов. Размер каждого штриха этой пары равен $a = 0,25$ мм. При размахе $R_1 = 0,36$ мм – в 8-ой паре. Размер штрихов этой пары равен $a = 0,33$ мм. А при размахе $R_1 = 0,42$ мм – в 7-ой паре. Размер штрихов этой пары равен $a = 0,42$ мм.

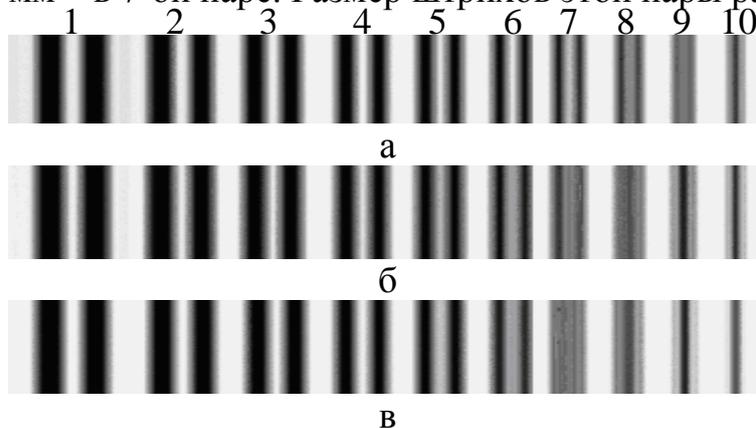


Рисунок 8 – Изображения вибрирующего тест-объекта по гармоническому закону с частотой $f_0 = 25$ Гц и размахом: а) $R = 0,24$ мм, б) $R = 0,36$ мм, в) $R = 0,42$ мм

Из проведенных исследований следует вывод, что при условии стробоскопического эффекта можно измерять частоту и размах гармонической вибрации, который равен размеру штриха той пары, в которой наблюдается нулевой контраст.

Рассмотрим изменение контраста в штрихах при вибрации, представляющей сумму двух гармоник с близкими частотами и близкими размахами. Назовем частоты двух гармоник близкими, если разность между ними меньше либо равна 1 Гц; размахи двух гармоник близки, если разность между ними меньше 2,5 %.

При проведении эксперимента была задана первая гармоника с частотой вибрации тест-объекта $f_1 = 25$ Гц и размахом $R_1 = 0,42$ мм и вторая гармоника с частотой $f_2 = 24,9$ Гц и размахом $R_2 = 0,42$ мм. На видеокамере была установлена кадровая частота $f_{TV} = 25$ Гц, при этом время экспозиции было равно периоду смены кадров видеокамеры. На рисунке 9 показано изображение вибрирующих штрихов. Как видно из изображения, в штрихах со временем наблюдается периодическое изменение контраста. Причем в сечении А – только положительный контраст.

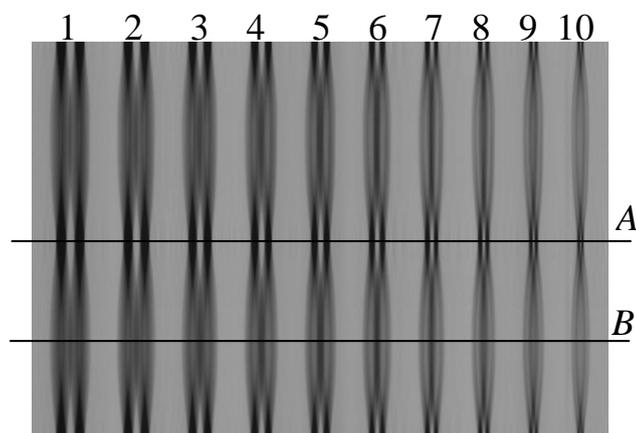
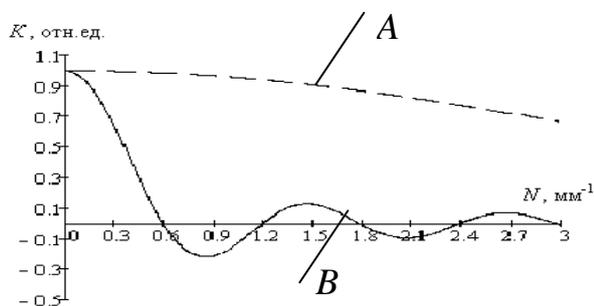
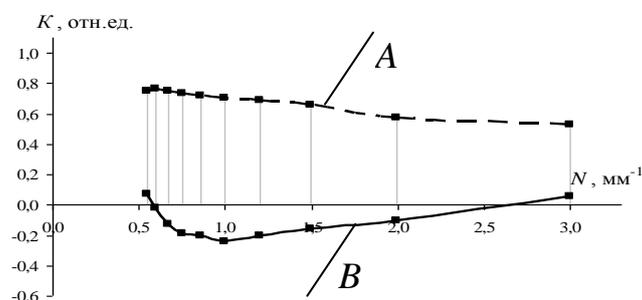


Рисунок 9 – Динамическое изображение вибрирующего тест-объекта

Теоретическую $ЧКХ_i$ рассчитывали по формуле (23). Она представлена на рисунке 10, а. Пунктирная линия на графике соответствует минимальному значению пути S_i , проходимому тест-объектом. Сплошная линия на графике соответствует максимальному значению пути S_i , проходимому тест-объектом.



а



б

Рисунок 10 – Теоретический график изменения контраста в парных штрихах (а), экспериментальный график изменения контраста в парных штрихах (б)

По формуле (2) $K = (S_M - S_{ш}) / (S_M + S_{ш})$ рассчитан контраст в каждой паре штрихов для сечений А и В рисунка 9. Результат расчета представлен на рисунке

10, б. Сплошная линия на графике соответствует минимальному значению пути S_i , пунктирная линия – максимальному значению.

Графики на рисунке 10, а и 10, б подтверждают, что если первый нулевой контраст соответствует пространственной частоте: $\nu = 1/2R$, то границей применимости является пространственная частота $\nu = 3/2R$. В сечении А наблюдается полное совпадение теоретических и экспериментальных изменений контраста. В сечении В наблюдается совпадение до 6-ой пары штрихов включительно.

Как видно из рис. 9, с течением времени периодически изменяется контраст в изображении всех парных штрихов, причем период изменений контраста T можно описать формулой биений:

$$T_b = \frac{1}{f_b} = \frac{1}{|f_1 - f_2|} \quad (27)$$

где T_b – период биений, f_b – частота биений, f_1, f_2 – частоты гармонических составляющих.

При заданных условиях эксперимента теоретический период биений равен $T_b = 1 / |25 - 24,9| = 10$ с. Из эксперимента было установлено, что значения контраста повторяются через каждые 250 кадров (строк). Частота опроса видеокамеры была задана $f_{TV} = 25$ Гц. Таким образом, период биений, вычисленный по изображению тоже равен: $T_b = 250 \cdot (1 / 25) = 10$ с.

По аналогии с биениями волн периодическое изменение контраста можно назвать оптическими биениями в изображениях вибрирующих парных штрихов. Таким образом, размах биений периодически изменяется от минимального значения, равного нулю: $R = 0$ (рис. 9, сечение А), до максимального значения, равного $R = 4 \cdot A_l = 0,84$ мм (рис. 9, сечение В). При $R = 0$ никакого размытия изображения тест-объекта не происходит, поэтому наблюдается разрешение всех пар штрихов, контраст в изображении которых принимает положительное значение.

При размахе биений, равном $R = 0,84$ мм, нулевой контраст возникает во второй паре штрихов. Размер штриха во второй паре составляет 0,83 мм. Как видно из постановки и результата эксперимента, размах вибрации и размер штриха практически совпадают, поэтому условия изменения контраста, рассмотренные для вибрации, содержащей одну гармонику, соблюдаются и при оптических биениях.

Рассмотрим влияние различия периода смены кадров и времени экспозиции на изменения контраста в изображении штрихов тест-объекта. Если в формуле (12) принять условие, что $t_{экс} < t_s$, то расстояние S_i уменьшится. Согласно (13) пространственная частота перехода ЧКХ через нуль в этом случае должна сместиться в сторону высоких пространственных частот, поэтому нулевой контраст должен наблюдаться в парных штрихах с более высокой пространственной частотой.

На рисунке 11, а представлено изображение тест-объекта при времени экспозиции $t_{экс} = 0,75 \cdot t_s = 30\ 000$ мкс. В данном изображении штрихи остаются неподвижными, но изменяется контраст в изображении штрихов. На рисунке 11, б приведены графики изменения контраста в изображении парных штрихов в сечениях С и D соответственно, вычисленные по формуле (2). Стрелками слева направо показаны изменения контраста в 6, 7 и 8 парах штрихов.

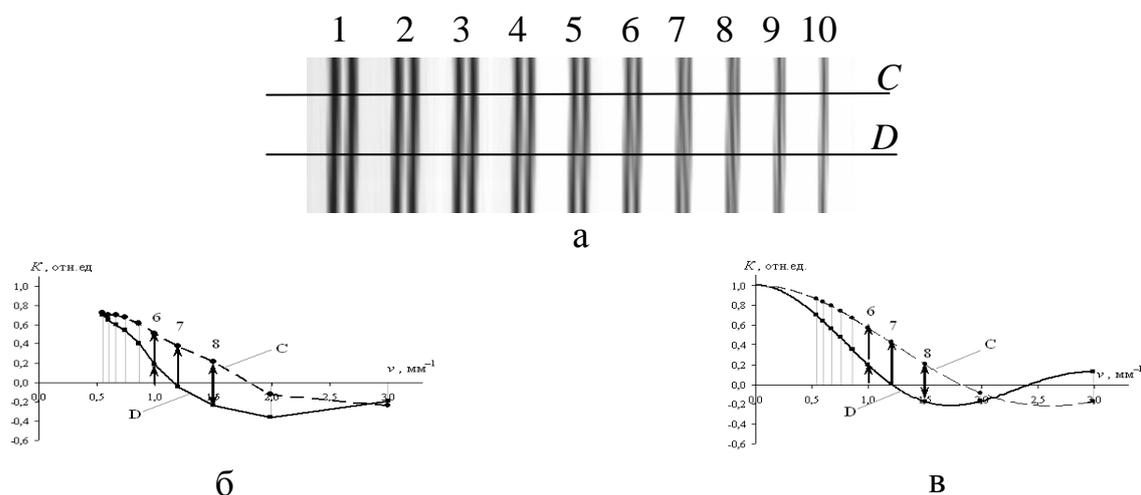


Рисунок 11 – Изображение вибрирующего тест-объекта при времени экспозиции $t_{\text{экс}} = 0,75 t_s = 30\,000$ мкс (а); экспериментальные изменения контраста в моменты времени, зафиксированные сечениями C (пунктирная линия) и D (сплошная линия) (б); теоретическое изменение CHK (в)

Как видно из рисунка, контраст в штрихах с течением времени периодически изменяется. В штрихах под номером 6 в сечении C наблюдается ярко выраженный положительный контраст. В сечении D контраст остается положительным, но значительно меньше, чем в сечении C .

В штрихах под номером 7 в сечении C наблюдается положительный контраст, в сечении D – нулевой контраст. В штрихах под номером 8 в сечении C наблюдается положительный контраст, а в сечении D – отрицательный контраст, что характеризует пространственный фазовый сдвиг на 180° согласно теории О’Нейла.

Теоретический график показывает, что 6 пара штрихов имеет только положительный контраст. Для 7 пары штрихов частотно-контрастные характеристики отражают и положительный, и нулевой контраст. 8 пара штрихов может быть в двух состояниях: положительный и отрицательный контрасты.

В четвертой главе «Разработка программно-аппаратного комплекса для измерения частоты и размаха гармонической вибрации» приведено разработанное средство и программное обеспечение для измерения параметров гармонической вибрации. Предложен метод оптимизации поиска частоты вибрации объекта, основанный на применении генетического алгоритма.

Для измерения размаха и частоты вибрации в автоматическом режиме разработано программное обеспечение в среде программирования Visual Studio 2005 с помощью языка программирования C++.

Наличие стробоскопического эффекта определяется по изменению границ изображения тест-объекта во времени. Оценкой изменения границ изображения служит дисперсия яркостей:

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(L_{ij} - \bar{L}_j)^2}{n \cdot m}, \quad (28)$$

где n – количество временных отсчетов, m – количество анализируемых областей изображения тест-объекта, L_{ij} – значение яркости j -ой области в i -ый момент времени, \bar{L}_j – среднее значение яркости j -ой области во времени.

Рассмотрим процесс измерения частоты и размаха гармонической вибрации. Сначала определяется частота вибрации объекта. Для этого задается начальный $t_{нач}$ и конечный $t_{кон}$ период смены кадров видеокамеры, шаг изменения периода смены кадров Δt_s . Далее устанавливается период смены кадров видеокамеры t_s , равный начальному значению $t_{нач}$ и время экспозиции видеокамеры $t_{экс}$, равное текущему периоду смены кадров t_s . Переменная T_0 будет содержать значение измеренного периода вибрации объекта.

После этого с видеокамеры считывается N изображений тест-объекта размером 1×2048 пикселей, из которых формируется графический файл размером $N \times 2048$ пикселей.

Далее по графическому файлу рассчитывается коэффициент D . Если рассчитанное значение коэффициента D меньше $D_{мин}$, то переменной $D_{мин}$ присваивается рассчитанное значение D , а переменной T_0 присваивается текущее значение периода смены кадров t_s . После этого к текущему значению t_s прибавляется шаг Δt_s , до тех пор пока значение t_s не превысит максимальное значение периода опроса видеокамеры $t_{кон}$. После этого происходит вычисление значения частоты вибрации f_0 , равное обратному значению T_0 , и вывод полученных значений на экран и в файл.

Далее определяется размах вибрации объекта. Для этого задается кадровая частота видеокамеры f_{TV} , равная ранее найденной частоте вибрации объекта f_0 . После этого устанавливается время экспозиции видеокамеры $t_{экс}$, равное периоду смены кадров видеокамеры t_s . С видеокамеры считывается изображение тест-объекта размером 1×2048 пикселей и формируется графический файл, по которому рассчитывается контраст K в изображении всех парных штрихов тест-объекта.

После этого перебираются все парные штрихи тест-объекта, начиная с наименьшей пространственной частоты. За одну итерацию рассматриваются три соседних парных штриха. Если контраст в изображении парных штрихов с наименьшей пространственной частотой больше нуля, контраст в изображении парных штрихов с наибольшей пространственной частотой меньше нуля, контраст в изображении средней пары штрихов равен нулю, то работа цикла прекращается. При этом значение размаха вибрации, равное размеру штриха в средней паре штрихов $R = a_i$, выводится на экран и в файл, и программа завершает работу.

Предложенный алгоритм определения частоты вибрации требует значительных затрат времени. Увеличить производительность измерения частоты вибрации объекта можно с помощью применения генетического алгоритма, так как в нашем случае задача измерения частоты вибрации сводится к поиску минимального значения коэффициента D . Для применения генетического алгоритма необходимо, прежде всего, закодировать значения периода смены кадров видеокамеры в виде двоичных последовательностей. Период смены кадров видеокамеры изменяется от 20000 мкс до 50000 мкс. Очевидно, что целые числа из этого интервала можно представить последовательностями нулей и единиц, используя их представление в двоичной системе счисления. Число 20000 при этом записывается как 0000000000000000, а число 50000 – как 111010100110000. В данном случае хромосомы приобретают вид двоичных последовательностей, состоящих из 15 битов, то

есть цепочками длиной $L = 15$. В роли функции приспособленности F_{np} примем величину, обратную коэффициенту D , полученному для каждого периода смены кадров видеокамеры. Следовательно, функция приспособленности должна быть максимальной для той частоты кадровой развертки видеокамеры, которая равна частоте вибрации объекта.

Основной генетический алгоритм, применяемый для оптического измерения частоты вибрации, состоит из следующих шагов. Сначала производится выбор исходной популяции хромосом. После этого происходит оценка приспособленности хромосом в популяции, заключающаяся в расчете функции приспособленности для каждой хромосомы этой популяции. Далее выполняется проверка условия остановки алгоритма, происходящего в случае, если его выполнение не приводит к улучшению уже достигнутого значения. В противном случае осуществляется селекция хромосом, производящаяся согласно принципу естественного отбора, по которому наибольшие шансы на участие в создании новых особей имеют хромосомы с наибольшими значениями функции приспособленности, и применение генетических операторов скрещивания и мутации. В результате работы данного алгоритма получается итоговая популяция, из которой необходимо выбрать особь с наибольшей функцией приспособленности, соответствующей частоте вибрации объекта.

Заключение

1) Разработан новый оптический метод измерения параметров гармонической вибрации на основе применения стробоскопического эффекта и регистрации нулевого контраста, позволяющий измерять частоту и размах вибрации на расстоянии до 30 метров. Ограничение измерения размаха вибрации связано с технической реализацией тест-объекта (до 2 мкм) и максимальной кадровой частотой видеокамеры (до нескольких мегагерц).

2) Разработана модель изменения контраста в динамическом изображении параллельных парных штрихов в зависимости от их пространственной частоты, частоты и размаха гармонической вибрации тест-объекта, а также от кадровой частоты и времени экспозиции видеокамеры.

3) Теоретически и экспериментально установлено, что при времени экспозиции равном времени кадра, а также равенстве частоты вибрации частоте видеокамеры, контраст в изображении штрихов остается неизменным во времени. При этом нулевой контраст наблюдается в той паре штрихов, в которой размеры штрихов равны размаху вибрации.

4) Теоретически и экспериментально установлено, что при наличии двух гармоник в сигнале, который создает вибрацию тест-объекта, в штрихах наблюдаются периодические изменения контраста. В случае, когда размахи двух гармоник равны и их частоты близки, путь, проходимый тест-объектом, изменяется от кадра к кадру от нуля до учетверенного размаха гармоники. Этот результат характерен для известного физического эффекта биений. Во временных точках, когда путь равен нулю, наблюдается положительный контраст одновременно во всех парных штрихах независимо от пространственной частоты. При этом период изменения положительного контраста равен периоду биений.

5) Разработано средство для исследования параметров гармонической вибрации, состоящее из видеокамеры с изменяемой кадровой частотой, генератора низкочастотных электрических сигналов, тест-объекта и персонального компьютера. Средство позволяет исследовать гармонические вибрации в диапазоне изменения частот от 1 до 88 Гц с погрешностью 0,1 Гц и от 17 до 2000 Гц с погрешностью 0,1 Гц. Разработаны и изготовлены тест-объекты, которые позволяют измерять размах вибрации в диапазоне от 0,01 до 0,1 мм с дискретностью 0,01 мм и от 0,17 мм до 0,91 мм с дискретностью 0,08 мм. Разработано программное обеспечение обработки видеосигнала для измерения размаха и частоты вибрации в автоматическом режиме в среде программирования Visual Studio 2005 с помощью языка программирования C++.

6) Для увеличения производительности измерения частоты вибрации предложен и реализован генетический алгоритм. Применение генетического алгоритма сокращает время измерения частоты в диапазоне от 20 до 50 Гц в среднем в 100 раз (до 10 секунд).

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах

1. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Юденков А.В., Зрюмов П.А. Измеритель размаха и частоты низкочастотных гармонических вибраций // Приборы и техника эксперимента. – М.: Изд-во МАИК Наука, 2010. №2. С. 151–152.
2. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Пронин С.П. Оптический метод и средство контроля частоты вибрации объекта, основанные на применении дискретного преобразования Фурье // Естественные и технические науки. – М.: Изд-во Спутник+, 2009. № 5, С. 260–263..
3. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Оптический метод контроля частоты гармонической вибрации, основанный на применении утечки спектра дискретного преобразования Фурье // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. №3/1. С. 58-63.
4. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Оптический метод измерения размаха и частоты гармонических вибраций с использованием многоэлементного фотоприемника // Датчики и системы. – М: Изд-во СенСиДат-Контрол, 2012. №1. С. 29-33.

Монографии

5. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Теоретические основы оптических методов измерения и контроля параметров гармонической вибрации: монография // Монография. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 73 с.
6. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Оптические методы измерения параметров гармонической вибрации: монография // Монография. – Саарбрюкен: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 80 с.

Свидетельства об официальной регистрации программ

7. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Интеллектуальный контроль частоты (Частотомер) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009616219. Дата регистрации 11.11.09.

8. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А., Пронин С.П., Юденков А.В. Измерение параметров вибрации (ИПВ) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009616220. Дата регистрации 11.11.09.

Статьи в других научных изданиях

9. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Разработка средства захвата изображения с видеоустройства // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. №3., С.-56.
10. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Юденков А.В., Пронин С.П. Исследование согласования частоты колебания тест-объекта и частоты опроса ПЗС – фотоприемника видеокамеры // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. №2, С. 50-53.
11. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Юденков А.В., Пронин С.П. Интеллектуальное оптическое средство контроля частоты вибрации объекта // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. №2, С. 91-92.
12. Теоретические и визуальные экспериментальные исследования изменения контраста в изображении колеблющихся парных штрихов / С.П. Пронин, А.В. Юденков, П.А. Зрюмов, С.В. Кононов, А.А. Фадеев, И.Н. Карташова, О.Е. Силаева // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «ВИС-2009». – Ползуновский альманах – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – №2; С. 108-112.
13. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Исследование погрешности оптического метода контроля частоты вибрации объекта, основанного на применении генетического алгоритма // Ползуновский альманах – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – №2, С. 123-125.
14. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Оптический метод измерения и контроля параметров гармонической вибрации по ее спектру // Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2010)». – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010.
15. Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А. Измерение параметров гармонических вибраций по стробоскопическому эффекту // Материалы V Международной научно-практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы – ВИС-2010» / Ползуновский альманах 2010 №2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 11-17.
16. Пронин С.П., Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А. Оптические биения // Материалы V Международной научно-практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы – ВИС-2010» / Ползуновский альманах 2010 №2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 33-34.
17. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А., Юденков А.В. Исследование оптического метода контроля частоты вибрации объекта, основанного на изменении периода опроса ПЗС-фотоприемника // Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», ч.1. – Томск: ТПУ, 2009, С. 127-128.

18. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Применение генетического алгоритма для контроля частоты вибрации объекта // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», т.1. – Томск: ТПУ, 2009, С. 169-171.
19. Зрюмов Е.А., Пронин С.П., Зрюмов П.А. Способ регистрации стробоскопического эффекта с помощью высокоскоростной видеокамеры для контроля параметров вибрации // Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований» – Одесса: Изд-во Черноморье, 2010, С. 55-57.
20. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Пронин С.П. Влияние времени экспозиции видеокамеры на погрешность оптического контроля частоты вибрации объекта, основанного на стробоскопическом эффекте // Материалы I научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск: ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010, С. 73-74.
21. Зрюмов П.А., Зрюмов Е.А. Исследование влияния периода смены кадров видеокамеры на погрешность оптического контроля частоты вибрации объекта, основанного на стробоскопическом эффекте // Материалы XVI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2010). – Томск: ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010, С. 169-170.
22. Зрюмов Е.А., Пронин С.П., Зрюмов П.А. Влияние низкочастотного шума на результат измерения частоты и размаха гармонической вибрации по контрасту изображения тест-объекта // MATERIÁLY VIII MEZINÁRODNÍ VĚDECKO – PRAKTICKÁ KONFERENCE «MODERNÍ VYMOŽENOSTIVĚDY – 2012». – Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2012, С. 6-9.
23. Зрюмов П.А. Изменение геометрического разрешения фотоприемного устройства для задач адаптации оптико-электронной системы // Микроэлектроника и информатика – 2008. 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2008, С-192.
24. Зрюмов П.А. Математическая модель контроля частоты вибрации объекта, основанная на применении дискретного преобразования Фурье // Материалы четвертой всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009, С. 196.
25. Зрюмов П.А. Исследование соотношения сигнал/шум при оптическом контроле частоты вибрации // Материалы II (VIII) Всероссийской научно-технической конференции «Молодая мысль: наука, технологии, инновации» – Братск, 2010, С. 75-76.
26. Зрюмов П.А. К вопросу о контроле параметров вибрации с помощью высокоскоростной видеокамеры // Материалы XLVIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» – Новосибирск, 2010, С. 15.