

На правах рукописи

Юденков Андрей Владимирович

**КОНТРОЛЬ ЧАСТОТЫ И РАЗМАХА ВИБРАЦИИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ
КОНТРАСТА В ИЗОБРАЖЕНИИ ШТРИХОВ
ПИРАМИДАЛЬНОЙ МИРЫ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пронин Сергей Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Еськов Александр Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Шатохин Александр Семенович

Ведущая организация: Федеральный научно-производственный центр
«Алтай», г. Бийск

Защита диссертации состоится 29 декабря 2009 г. в 10-00 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 26 ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.Е. Кривобоков

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы. На современном этапе развития технологических процессов возрастает потребность в конструктивно простых, доступных и надежных средствах контроля вибрации. Вибрация в том или ином проявлении сопутствует протеканию любого динамического процесса. Безопасной эксплуатации зданий и сооружений, нормальной работе производственного оборудования и силовых установок соответствует определенный уровень вибрации. Превышение допустимых норм параметров вибрации приводит к разрушению объектов, о чем свидетельствует, например, авария на Саяно-Шушинской ГЭС. Таким образом, одной из актуальных задач современной техники является измерение параметров вибрации. К основным параметрам вибрации относятся частота и размах.

Существующие методы контроля вибрации разделяют на контактные, подразумевающие механическую связь с исследуемым объектом контроля, и бесконтактные, т.е. не связанные с объектом контроля механической связью. Применение контактных методов при измерении вибрации не всегда возможно реализовать в условиях производственного процесса, исходя, прежде всего, из их высокой инертности, а зачастую и требований техники безопасности.

Одним из значимых направлений решения данной проблемы является применение бесконтактных методов. Оптические методы в решении этой задачи занимают ведущую позицию. Наиболее известными оптическими методами являются: интерференционный метод, метод мерного клина, метод двойных марок, а также методы, в основу которых положен стробоскопический эффект. Вместе с тем оптическим методам присущи некоторые недостатки. Во-первых, зачастую это сложная схема реализации, в частности интерференционного метода. По этой же причине не рассматриваются исследовательские системы вибрационного мониторинга и диагностики бесконтактного принципа действия, имеющие значительно более сложную структурную схему и требующие специальных навыков обращения с ними. Во-вторых, узкая область применения вследствие контроля одного параметра. Например, метод двойных марок технологически является достаточно простым, однако он обеспечивает контроль только размаха колебаний. Стробоскопический метод также является технологически простым и достаточно точным, но при этом обеспечивает контроль только частоты периодических вибраций.

Современные технические устройства – это скоростная видеокамера с изменяемой кадровой частотой и персональный компьютер позволяют объединить указанные методы и реализовать устройство, сочетающее в себе все их положительные качества. Согласно известному стробоскопическому эффекту при совпадении кадровой частоты ПЗС-фотоприемника и частоты колебаний объекта его изображение воспринимается неподвижным. Однако в течение времени экспози-

ции оптическое изображение объекта оказывается смазанным. Смаз изображения имеет научное объяснение через понятие контраста. Изменение контраста в радиальной штриховой мире при продольном ее смещении относительно оси объектива изучал О'Нейл. Эффект изменения контраста в пирамидальной штриховой мире при поперечном ее смещении относительно объектива изучал С.П. Пронин. Высказано научное предположение, что по изменению контраста в штрихах с различными пространственными частотами можно с высокой точностью установить размах вибрации.

Таким образом, путем синтеза стробоскопического эффекта и эффекта изменения контраста в изображении парных штрихов с различными пространственными частотами, может быть реализован новый метод контроля параметров вибрации.

Цель работы - дать научное обоснование новому методу оптического контроля параметров гармонической вибрации объекта, основанному на синтезе стробоскопического эффекта и эффекта изменения контраста в штрихах пирамидальной миры и разработать визуальный метод контроля параметров вибрации по оптическому изображению штрихов на экране монитора персонального компьютера.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачи:

1. Выполнить аналитический обзор методов и средств контроля параметров вибрации и обосновать возможность синтеза двух оптических эффектов и их применения в контроле параметров вибрации.

2. Разработать модель изменения контраста в изображении штрихов пирамидальной миры с различными пространственными частотами в зависимости от частоты и размаха вибрации при условии стробоскопического эффекта.

3. Создать экспериментальную установку для исследования изменения контраста в штрихах пирамидальной миры. Провести эксперименты и уточнить математическую модель с учетом характеристик видеокамеры.

4. Разработать визуальный метод контроля параметров гармонической вибрации по оптическому изображению штрихов на экране монитора персонального компьютера.

Объект исследования - процесс изменения оптического изображения штрихов пирамидальной миры на экране монитора компьютера от параметров вибрации.

Методы исследования. Для теоретических исследований использовано уравнение Фредгольма первого рода с ядром типа свертки, а также применен спектральный анализ оптического сигнала. При исследовании процессов, происходящих в измерительной системе, были использованы математическое и компьютерное моделирование. В экспериментальных исследованиях использован метод

непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. Для реализации методов использованы эталонные средства.

Научная новизна полученных результатов.

На основе синтеза стробоскопического эффекта и эффекта изменения контраста в парных штрихах с различной пространственной частотой предложен и научно обоснован новый метод оптического контроля параметров вибрации. Реализация метода современными средствами исключает, во-первых, применение теоремы Котельникова и увеличивает, таким образом, диапазон контроля частот в 2 раза. Во-вторых, способен обеспечить одновременный контроль частоты и размаха гармонической вибрации на значительных расстояниях объекта контроля от видеокамеры. В-третьих, исключает влияние инерционности первичного измерительного преобразователя на процесс контроля.

Разработана математическая модель контроля параметров вибрации, которая позволяет анализировать оптическое изображение штрихов в зависимости от частоты и размаха вибрации с учетом времени экспозиции и кадровой частоты ПЗС-фотоприемника.

Достоверность научных выводов и результатов диссертации обеспечивается: использованием физических основ получения информации при построении математических моделей; обеспечением представительности выборок при проведении измерений; хорошим совпадением теоретических и экспериментальных результатов; использованием рекомендаций, изложенных в соответствующих государственных стандартах при выполнении экспериментальных исследований; использованием в качестве эталонных приборов генератора низкочастотных колебаний ГЗ-117, микроскопа «Мир-2», объект-микрометра ОМП ГОСТ 7513-55, измерительной лупы 10^x.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный метод контроля параметров вибрации объекта по оптическому изображению штрихов в пирамидальной мире позволяет создавать новые автоматические и автоматизированные средства контроля параметров вибрации: частоты, размаха, виброскорости и виброускорения.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы в технической оптике при контроле качества опико-электронных и оптических приборов при регистрации динамических изображений.

Реализация результатов исследований.

Результаты диссертационной работы одобрены для применения в качестве метода контроля вибрации двигателей внутреннего сгорания при изготовлении и пробной эксплуатации на ОАО «Барнаултрансмаш».

На защиту представлены:

Математическая модель контроля параметров вибрации, позволяющая анализировать оптическое изображение штрихов в зависимости от частоты и размаха вибрации с учетом времени экспозиции и кадровой частоты ПЗС-фотоприемника.

Метод и средство визуального контроля частоты и размаха гармонической вибрации по оптическому изображению в штрихах пирамидальной миры на экране монитора персонального компьютера.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на VI Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2007), 8-ой и 9-ой Международных научно-технических конференциях «Измерение, контроль и информатизация» (Барнаул, 2007, 2008), VI Межрегиональной научно-технической конференции «Строительство: материалы, конструкции, технологии» (Братск 2008),

Публикации. Основное содержание работы изложено в 11 печатных работах. Из них 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК, 5 статей в региональных журналах, 5 – доклады и тезисы докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 95 страниц, включая 21 рисунок, 8 таблиц.

Содержание работы

Во введении к диссертации обоснована ее актуальность, сформулированы цели, задачи и методы исследований, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы, отражены вопросы апробации и реализации полученных научных результатов.

В первой главе «Аналитический обзор методов и средств контроля параметров вибрации» представлен обзор существующих методов и средств, используемых для контроля частоты и размаха вибрации. Из анализа существующих методов, выявлены их достоинства и недостатки, на основании чего выбраны три оптических метода: мерного клина, двойных марок и стробоскопического метода. Выполнен анализ вибрационного размытия при вибрации мерного клина, двойных марок и прямоугольных штрихов. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения контраста в прямоугольных штрихах, выполненные в научных работах О'Нейла, О.Ф. Гребенникова, Г.И. Василенко, А.М. Тараторина, Б. Фридена и других авторов. В качестве теоретической основы создания метода контроля параметров вибрации выбрана частотно-

контрастная характеристика матричного фотоприемника, приведенная в коллективной монографии «Системы технического зрения». В качестве тест-объекта выбраны парные штрихи, организованные в пирамидальную миру, предложенную С.П. Прониным. Она состоит из нескольких групп парных штрихов с увеличивающейся пространственной частотой, расположенных одна над другой и имеющих общую ось симметрии. Такая пространственная организация штрихов позволяет визуально легко анализировать изменение контраста на различных пространственных частотах. Сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

Во второй главе «Теоретическое исследование изменения контраста в изображении штрихов от размаха вибрации» выполнено теоретическое исследование изменения контраста в плоскости изображения колеблющихся парных штрихов ортогонально оптической оси объектива от размаха колебаний в частотной и пространственных областях при условии возникновения стробоскопического эффекта.

На рис.1 показан одномерный объект в виде парных штрихов, совершающий гармонические вибрации ортогонально оптической оси объектива с размахом R . За время экспозиции штрихи проходят путь $2R$. ПЗС-фотоприемник фиксирует этот кадр и передает его на экран монитора ПК.

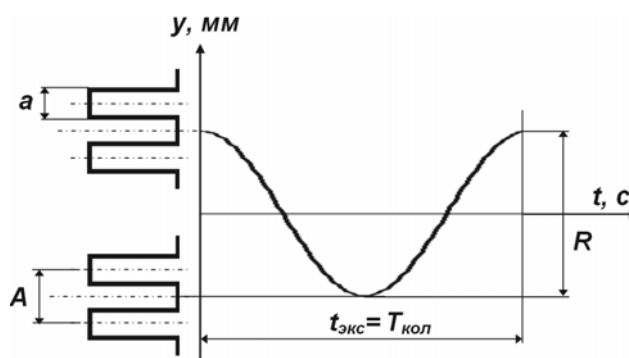


Рис.1. Пространственно-временное представление движения парных штрихов с шириной штриха a и пространственной частотой $\nu=1/A=1/2a$

За основу модели изображения штрихов $g(y)$, которое получается на выходе фотоприемника за время экспозиции, принято уравнение Фредгольма первого рода с ядром типа свертки. При условии идеального объектива получено уравнение:

$$g(y) = \frac{1}{2} \left[\delta\left(y - \frac{A}{2}\right) + \delta\left(y + \frac{A}{2}\right) \right] * \text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) * \text{rect}\left(\frac{y}{2R}\right), \quad (1)$$

где функция $\text{rect}(y/a)$ – функция прямоугольного импульса шириной a ; $\delta(y-A/2)$ и $\delta(y+A/2)$ – дельта функции, отстоящие друг от друга на расстоянии A ;

$rect(y/2R)$ называют прямоугольной характеристикой сдвига, функцией рассеяния. В любом случае – это функция прямоугольного импульса шириной $2R$.

Этому уравнению, согласно правилам математических преобразований, в частотной области соответствует уравнение:

$$G(\nu) = \cos(\pi 4\nu) \cdot \text{sinc}(\pi a \nu) \cdot \text{sinc}(\pi 2R\nu), \quad (2)$$

где $G(\nu)$ – спектр изображения подвижных штрихов; $\cos(\pi 4\nu)\text{sinc}(\pi a \nu)$ - спектр неподвижного изображения штрихов.

Третий множитель в (2) представляет ЧКХ:

$$\text{sinc}(\pi 2R\nu). \quad (3)$$

Поскольку фиксация изображения производится при времени равном периоду вибрации, то удобно назвать эту характеристику ЧКХ стробоскопического эффекта.

Под контрастом K в изображении штрихов использовали известное соотношение яркостей:

$$K = \frac{(L_{\text{ш}} - L_0)}{(L_{\text{ш}} + L_0)}, \quad (4)$$

с той лишь разницей, что вместо максимальной и минимальной значениями яркостей фиксировали значение яркости L_0 между светлыми штрихами и значение яркости $L_{\text{ш}}$ на одном из штрихов. Фиксация яркостей в изображении позволяет согласовать изменения контраста, вычисленных по формулам (1) и (2). Формула (2) дает возможность оценить изменение контраста в частотной области, а формула (1) – в пространственной. При условии разрешения штрихов, когда яркость $L_{\text{ш}}$ больше яркости L_0 , контраст больше нуля: $K > 0$. При условии равенства яркостей ($L_{\text{ш}} = L_0$) получаем нулевой контраст $K = 0$. При условии $L_{\text{ш}} < L_0$ возникает отрицательный контраст $K < 0$.

Рассмотрено изменение контраста в штрихах при различных соотношениях размаха R и размера штриха a . ЧКХ стробоскопического эффекта (3) переходит через первое нулевое значение на пространственной частоте $\nu = 1/2R$. При условии $R = a$ частота перехода ЧКХ через нуль и пространственная частота штрихов совпадают. Подставляя в (2) вместо R значение a получим спектр изображения штрихов:

$$G(\nu) = \text{sinc}(\pi 4a\nu) \cdot \text{sinc}(\pi a\nu). \quad (5)$$

Функция (5) в пространственной области представляет трапецию, которая и на штрихах и между штрихами имеет одинаковые яркости, поэтому контраст в изображении равен нулю: $K = 0$. Результат вычислений изображен на рисунке 2,в.

Таким образом, если пространственная частота парных штрихов с коэффициентом заполнения 0,5 совпадает с частотой перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта, то в данных штрихах будет нулевой контраст. В простран-

ственной области эффект нулевого контраста возникает при равенстве размаха колебаний штриха, или половине пространственного периода штрихов: $R=a=A/2$.

При пространственной частоте штрихов меньшей, чем частота перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта, в штрихах должен наблюдаться положительный контраст. Меньшей пространственной частоте соответствуют большие размеры штрихов. Зададим условие $R=a/2$, то есть для второй пары штрихов размах колебания равен половине ширины штриха. Подставим значение R в уравнение (2). В результате получим спектр изображения:

$$G(v) = \cos(\pi Av) \cdot \text{sinc}^2(\pi av). \quad (6)$$

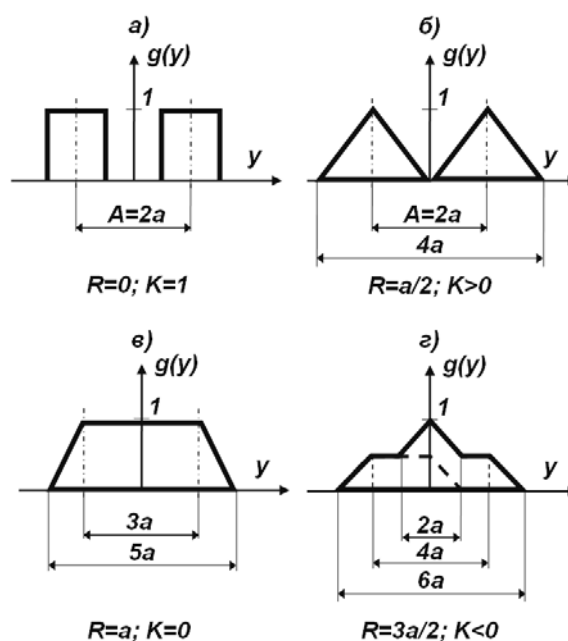


Рис.2. Графическое представление изменения контраста в изображении штрихов в зависимости от соотношения размаха колебаний R и размера штрихов a

В пространственной области функция (6) представляет два треугольных импульса шириной $2a$, отстоящих друг от друга на расстоянии A (см. рис.2,б). Поскольку яркости на штрихах больше яркости между штрихами, то контраст в изображении принимает положительное значение: $K>0$. Таким образом, если пространственная частота парных штрихов меньше частоты перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта, то в штрихах наблюдается положительный контраст. В пространственной области положительный контраст, или разрешение в штрихах возникает при условии, когда размах колебания меньше ширины штрихов.

Зададим пространственную частоту штрихов, превышающую частоту перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта. Пусть $R=3a/2$, то есть для

третьей пары штрихов размах колебания равен полуторному размеру штриха. Уравнение (2) приобретает вид:

$$G(v) = \cos(\pi Av) \cdot \text{sinc}(\pi a v) \cdot \text{sinc}(\pi 3av) \quad (7)$$

Два последних сомножителя в пространственной области представляют трапецеидальную функцию с верхним основанием $2a$ и нижним основанием $4a$. В пространственной области (7) преобразуется к виду:

$$g(y) = \frac{1}{2} \left[\text{ТРАП} \left(\left(y - \frac{A}{2} \right), 2a, 4a \right) + \text{ТРАП} \left(\left(y + \frac{A}{2} \right), 2a, 4a \right) \right], \quad (8)$$

где ТРАП $(y, 2a, 4a)$ – функция, имеющая контур трапеции по оси y , симметричная относительно начала координат с верхним и нижним основаниями $2a$ и $4a$ соответственно.

Графическое изображение суммы двух трапецеидальных функций представлено на рис. 2,г. Как видно из рисунка, яркость между штрихами приобретает большее значение, чем на самих штрихах, поэтому контраст становится отрицательным: $K < 0$. Таким образом, если пространственная частота парных штрихов превышает частоту перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта (2), то в изображении возникает отрицательный контраст. В пространственной области значение размаха колебаний, в этом случае, превышает размер штриха.

В этой же главе проведен анализ влияния фоточувствительных элементов на изображение штрихов. В результате получено важное условие калибровки применяемой системы. Увеличение объектива в статическом положении штрихов должно быть таким, чтобы размер светлого штриха составлял не менее 2 экранных пикселей.

Третья глава «Экспериментальная установка контроля параметров гармонической вибрации» посвящена описанию разработанной экспериментальной установки и исследованию изменения оптических эффектов, наблюдаемых на экране монитора персонального компьютера при изменении частоты и размаха гармонической вибрации.

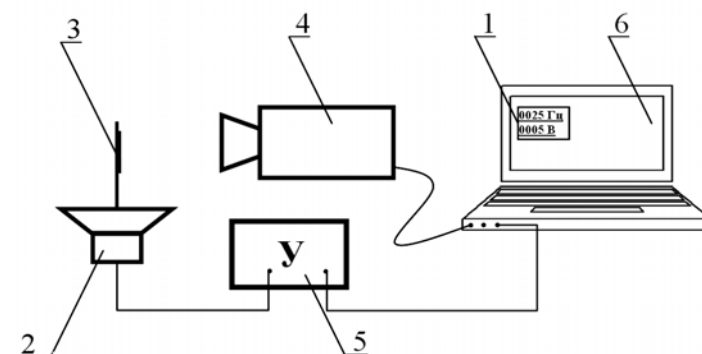


Рис.3. Структурная схема экспериментальной установки контроля размаха и частоты гармонической вибрации

В состав экспериментальной установки входит виртуальный звуковой генератор синусоидальных колебаний 1, динамик 2, на диффузоре которого закреплена пирамидальная мира 3, видеокамера 4, усилитель сигнала 5, подаваемого с персонального компьютера 6.

Виртуальный генератор «РадиоМастер» позволяет получать электрические сигналы в звуковом диапазоне частот от 20 Гц до 20 КГц с амплитудой напряжения от нуля до 1 В. Частота дискретизации (цифроаналогового преобразования) фиксированная - 48 кГц, разрядность ЦАП - 16. Выходное напряжение генератора определяется регулятором «Амплитуда», а также положением звуковых регуляторов громкости и баланса Windows, максимальная амплитуда сигналов без искажений - около 1 В.

Виртуальным генератором моделируется синусоидальный сигнал с задаваемой частотой и амплитудой, который через усилитель приводит в движение диффузор динамика.

Для моделирования колебаний применяется динамик 25ГДН-1-8-80. К диффузору динамика жестко прикреплен тест-объект в виде пирамидальной миры.

Пирамидальная мира изображена на рис.4. В табл.1 приведены параметры пирамидальной миры. В первой колонке указан номер пары штрихов. Во второй колонке размер штриха соответствующей пары, а в третьей – пространственная частота $\nu=1/A=1/2a$.

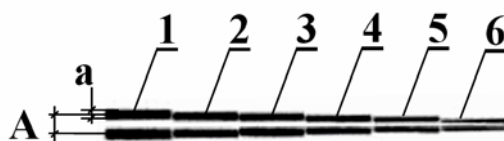


Рис.4. Изображение пирамидальной миры на экране монитора без пространственной вибрации

В экспериментальной установке использовалась видеокамера SAMSUNG VP-W 61(PAL), работающая в стандарте CCIR 625 строк, 25 кадров в секунду. В системах CCIR используются ПЗС-матрицы с чересстрочной разверткой. Каждую секунду 25 нечетных полей и 25 четных полей быстро сменяют друг друга, поэтому частота вертикальной развертки составляет 50 Гц.

Таблица 3.1 – Параметры пирамидальной миры

№ штрихов	Ширина штриха a , мм	Пространственная частота ν , мм ⁻¹
1	0,8	0,62
2	0,7	0,71
3	0,6	0,83
4	0,5	1,00
5	0,4	1,25
6	0,3	1,67

В видеокамере был установлен режим «АУТО». Скорость затвора в этом режиме автоматически изменяется от 1/50 с до 1/250 с в зависимости от уровня освещенности объекта и фона.

Штрихи пирамидальной миры располагают перпендикулярно направлению линейной вибрации и параллельно строкам ПЗС-фотоприемника. Увеличение оптической системы выбирается таким, чтобы был явно виден светлый промежуток между темными штрихами как это показано на рис.4. Виртуальный генератор имеет две шкалы: шкалу установки частоты колебаний и шкалу амплитуд. Шкала амплитуд для экспериментальной установки имеет относительные значения, изменяющиеся от 1 до 10. Перевод размаха гармонической вибрации из относительных единиц в абсолютные осуществляли следующим образом. С помощью микроскопа «Мир 2» с увеличением 25^x измеряли ширину узкой черной полоски на светлом фоне. Генератором задавали колебания диффузору динамика и производили измерение ширины полоски с размазанными границами. Разность между шириной полоски с размазанными границами и ее шириной в статике дает размах в абсолютных размерах.

Как видно из рис.4, в теории использовалась модель светлых штрихов и темного промежутка, а в эксперименте – модель темных штрихов и светлого промежутка. Этот факт вызван субъективным удобством. При рассмотрении теоретической модели отпадала необходимость введения дополнительного слагаемого и отрицательного знака. Зато инверсная модель дает преимущество в интерпретации экспериментального результата: светлый промежуток соответствует положительному контрасту, а темный – отрицательному. Теоретически обе модели равнозначны.

Как видно из рис.5,а, изменение контраста в штрихах полностью соответствует теории, изложенной во второй главе. Ширина штриха в 5-й паре равна размаху вибрации: $R=0,4$ мм. При этом условии в штрихах должен возникать нулевой контраст, что и наблюдается в эксперименте. Штрихи слились в один серый прямоугольник. Ширина штрихов в 1-ой, 2-ой, 3-ей и 4-ой парах превышает заданный размах вибрации поэтому в этих штрихах наблюдается положительный контраст: при вибрации между темными штрихами остаются светлые промежутки. В штрихах 6-ой пары наблюдается отрицательный контраст. Изначально светлый промежуток между штрихами вырождается в темный промежуток.

На рис.6,а представлено экспериментальное изменение контраста в штрихах пирамидальной миры при размахе вибрации $R=0,5$ мм. Согласно теории нулевой контраст должен быть в 4-ой паре штрихов, потому что $R=a_4$, что и получилось в эксперименте. Контраст во всех остальных штрихах тоже полностью совпадает с теорией: $K_1>0$; $K_2>0$; $K_3>0$; $K_4=0$; $K_5<0$; $K_6<0$. ЧКХ стробоскопического эффекта, представленная ниже изображения миры на рис.6,а, также верно отражает изменение контраста.

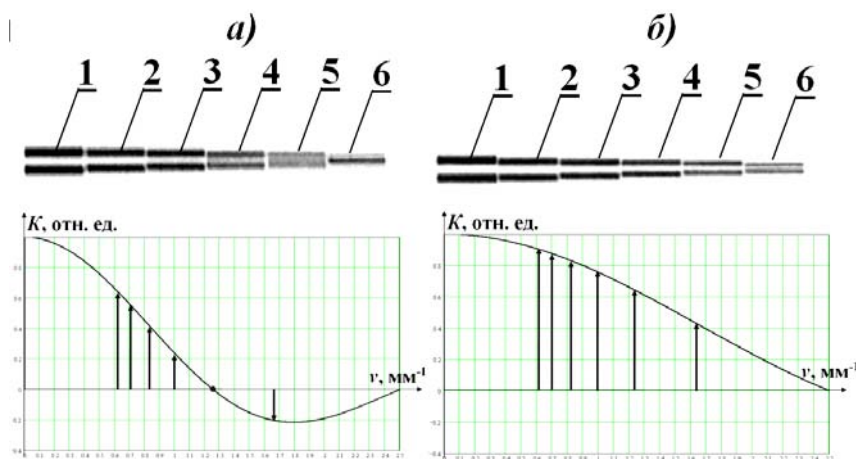


Рис.5. Экспериментальное изменение контраста в штрихах пирамидальной миры при размахе вибрации $R=0,4$ мм

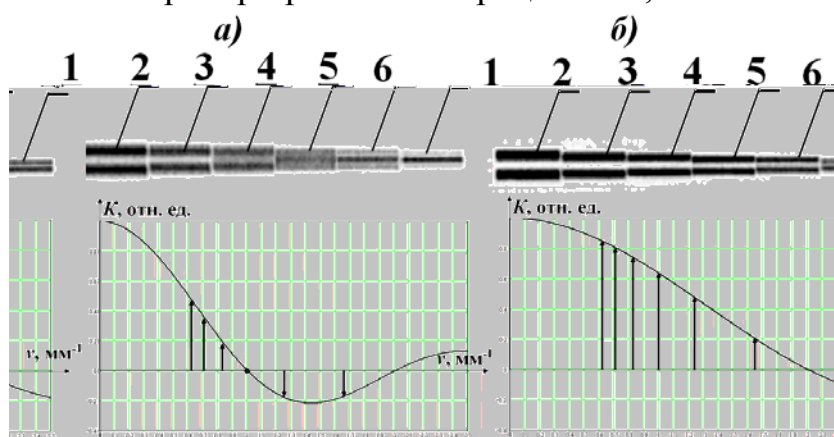


Рис.6. Экспериментальное изменение контраста в штрихах пирамидальной миры при размахе вибрации $R=0,5$ мм

Эксперименты, выполненные по остальным частотам подтверждают общие теоретические выводы. Между тем, оптическое изображение штрихов носит квазиустойчивый характер. При статическом изображении миры контраст в изображении штрихов периодически меняется из состояния, наблюдаемого на рисунке 5,а, в состояние, показанное на рис.5,б и обратно. Период изменения контраста составляет 10 с. Такой же эффект – эффект изменения контраста, наблюдался во всех других экспериментах.

Для многоэлементного фотоприемника удвоенный размах $2R$ в формуле (3) представляет частный случай перемещения штрихов во времени, когда время экспозиции, период колебаний и период кадра равны: $t_{\text{экс}}=T_{\text{кол}}=T_{\text{кадр}}$. В общем случае эти значения не равны. Перепишем формулу изменения контраста (3) в виде:

$$\text{ЧКX}_i = \frac{\sin(\pi\nu S_i)}{\pi\nu S_i}, \quad (9)$$

где S_i – расстояние, на которое перемещаются штрихи пирамидальной миры в i -ом кадре за время экспозиции фотоприемника $t_{\text{экс}}$.

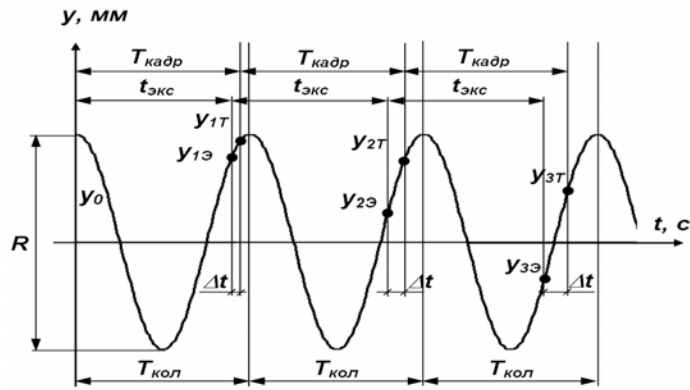


Рис.7. Графическое представление пространственно-временного процесса вибрации пирамидальной миры и времени считывания изображения ее штрихов многоэлементным фотоприемником

На рисунке 7 представлен пространственно-временной процесс вибрации пирамидальной миры. По оси y происходят пространственные смещения, а ось абсцисс представляет временную ось. На основе этого представления получено уравнение покадрового изменения расстояния S_i :

$$S_i = 2R - \frac{R}{2} |\cos 2\pi(i\beta - \gamma) - \cos 2\pi(i-1)\beta|, \quad (10)$$

где
$$\beta = T_{\text{кадр}} / T_{\text{кол}} = f_{\text{кол}} / f_{\text{кадр}} - \quad (11)$$

коэффициент, характеризующий отношение периода кадра к периоду колебаний пирамидальной миры, или частоты колебаний к кадровой частоте, а коэффициент γ характеризует отношение разности периода повторений и времени экспозиции к периоду колебаний тест-объекта:

$$\gamma = \frac{\Delta t}{T_{\text{кол}}} = \frac{T_{\text{кадр}} - t_{\text{экс}}}{T_{\text{кол}}} = \beta \left(1 - \frac{t_{\text{экс}}}{T_{\text{кадр}}} \right). \quad (12)$$

Подставляя S_i (10) в формулу $ЧКХ_y$ (9), можно определить изменения контраста, которые будут наблюдаться на экране монитора персонального компьютера для любой пары штрихов.

Для расчета изменения расстояния S_i использовали компьютерное моделирование. Исходя из скорости затвора $1/50$, рассчитали время экспозиции $t_{\text{экс}} = 0,02$ с. При моделировании за частоту кадров приняли вертикальную частоту ПЗС-фотоприемника: $f_{\text{кадр}} = 50$ Гц, поскольку вибрация штрихов происходит по оси y . При этих условиях коэффициент $\gamma = 0$, а коэффициент β имеет значение $\beta = f_{\text{кол}} / 50$. При этом на экране монитора компьютера кадры имеют частоту 25 Гц. Из экспериментов известно, что период изменения контраста равен 10 с. Несложно рассчитать, что при кадровой частоте 25 Гц за 10 с количество кадров i составит: $i = 250$. Путем компьютерного моделирования на основе формулы (10) при усло-

вии, что изменение расстояний S_i носит периодический характер и должны укладываться в 250 кадров, получен коэффициент β :

$$\beta = \frac{f_{\text{кол}}}{50} = \frac{29,4}{50} = 0,498.$$

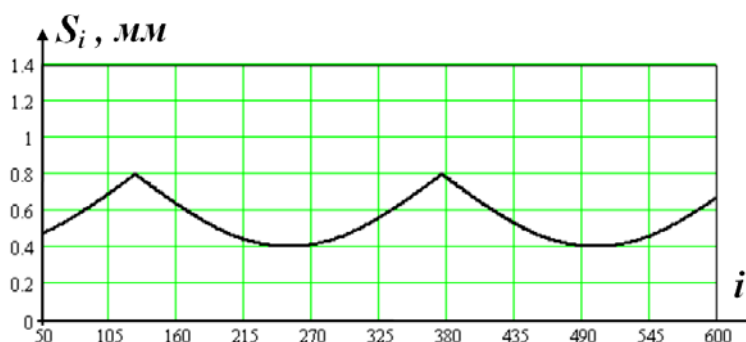


Рис.8. График изменения расстояния при размахе вибрации $R=0,4$ мм

На рис.8 представлен график изменения расстояния, проходимого штрихами пирамидальной миры, при размахе вибрации $R=0,4$ мм.

Как следует из расчетов, расстояние меняется от кадра к кадру, при этом максимальное расстояние равно $S_{max}=0,8$ мм, а минимальное $S_{min}=0,4$ мм.

Подставляя значения S_{max} в ЧКХ стробоскопического эффекта (9), получен график, показанный на рис.5,а. Подставляя значение S_{min} в ЧКХ (9), получен график, показанный на рис.5,б. Таким образом, из-за различия в частотах и различия времени экспозиции и периода кадра появляется эффект «плавающей» ЧКХ, которая дает верное представление изменения контраста в штрихах с различными пространственными частотами. Так частоты в диапазоне от $\nu_1=0,62$ мм⁻¹ до $\nu_4=1,00$ мм⁻¹ имеют только положительный контраст, поэтому стрелки имеют положительное значение. В штрихах $\nu_5=1,25$ мм⁻¹ нулевой контраст переходит в положительный. На рис.5,а частота ν_5 совпадает с точкой перехода ЧКХ через нуль, а на рис.5,б приобретает положительное значение. Пространственная частота $\nu_6=1,67$ мм⁻¹ имеет два противоположных состояния. На рис.5,а она входит в область отрицательных значений ЧКХ, а на рис.5,б в область положительных.

Каждому кадру изображения парных штрихов вибрирующей пирамидальной миры соответствует своя ЧКХ, графически расположенная в области значений от S_{min} до S_{max} . Таким образом, при размахе вибрации $R=0,4$ мм в парах штрихов, ширина которых превышает значение размаха (с пространственными частотами от $\nu_1=0,62$ мм⁻¹ до $\nu_4=1,00$ мм⁻¹), значение контраста принимает только положительные значения. В паре штрихов с пространственной частотой $\nu_5=1,25$ мм⁻¹, ширина которых соответствует размаху вибрации, наблюдается периодическая смена положительного при S_{max} и нулевого при S_{min} контрастов. В паре штрихов с пространственной частотой $\nu_6=1,67$ мм⁻¹, ширина которых меньше размаха вибра-

ции наблюдается периодическая смена положительного при S_{max} и отрицательного при S_{min} контрастов.

Аналогичный результат получен для остальных вариантов эксперимента.

В четвертой главе «Разработка метода контроля частоты и размаха гармонической вибрации по оптическому изображению штрихов на экране монитора персонального компьютера» выполнена разработка метода и дана оценка погрешностям контроля параметров вибрации.

Вариант $f_{кол} \neq f_{кадр}$ и $t_{экс} \neq T_{кадр}$ является наиболее общим и сложным, поэтому его удобно выполнять на основе компьютерной модели. Она реализована с помощью математического пакета MathCAD. Текст программы представлен на рисунке 9. Анализ погрешности процесса контроля частоты и размаха вибрации сводится к следующей задаче. Заданы относительная погрешность измерения и частоты вибрации δf и отношение времени экспозиции к периоду кадра ПЗС-фотоприемника. Требуется найти период изменения контраста в изображении штрихов пирамидальной миры и диапазон пространственных частот, в котором «плавающая» ЧКХ стробоскопического эффекта приобретает нулевые значения. Зная время изменения контраста в штрихах с определенной пространственной частотой можно указать погрешность контроля частоты и размаха вибрации. Результаты вычислений сведены в таблицы.

Суть метода контроля частоты гармонической вибрации сводится к следующему алгоритму.

1. На объект контроля закрепить тест-объект в виде трех парных штрихов на белом фоне с различными пространственными частотами.

2. Выполнить калибровку оптико-электронной системы при статическом положении штрихов. Для этого установить такое увеличение оптической системы, при котором на экране монитора персонального компьютера у штрихов с самой высокой пространственной частотой отчетливо будет наблюдаться светлый промежуток (2 экранных пикселя).

3. Установить кадровую частоту ПЗС-фотоприемника видеокамеры $f_{кадр}$, равную контролируемой частоте вибрации: $f_{кадр} = f_{кол}$.

4. Установить время экспозиции ПЗС-фотоприемника в диапазоне $(0,5 \div 0,6) T_{кадр}$.

5. Наблюдая за изображением штрихов на экране монитора, измерить период изменения контраста T_s . На рис.10 представлены изображения штрихов, наблюдаемых на экране монитора персонального компьютера, в течении периода T_s . Левое изображение (а) соответствует начальному моменту периода T_s . Правое изображение (б) соответствует времени $T_s/2$. Через период T_s изображение штрихов возвращается в первоначальное состояние (а).

Если период изменения контраста составляет $T_s \geq 4$ секунды, то частота вибрации $f_{кол}$ будет равна кадровой частоте:

$$f_{кол} = f_{кадр} \pm \Delta,$$

где Δ - погрешность контроля, равная

$$\Delta = \Delta f_{кадр} + 0,005 \cdot f_{кадр}.$$

Первое слагаемое характеризует погрешность установки кадровой частоты, а второе слагаемое, согласно табличным данным, определяет методическую погрешность.

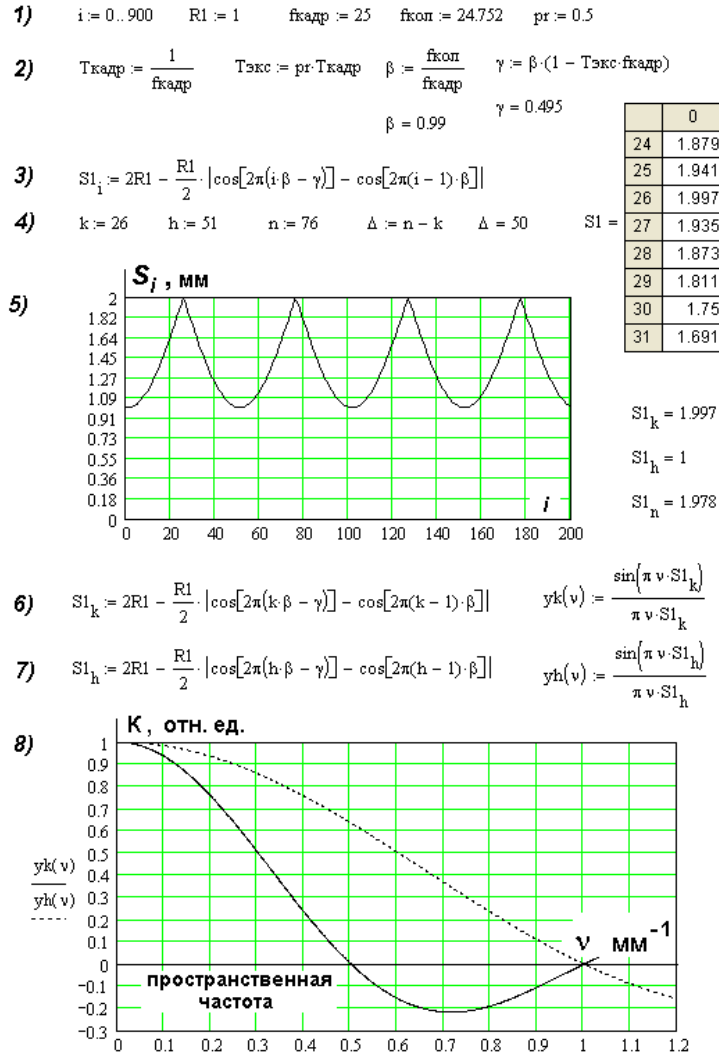


Рис.9. Компьютерная модель для расчета погрешностей контроля параметров вибрации

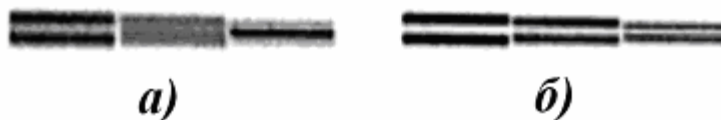


Рис.10. Изображение штрихов на экране монитора при контроле параметров вибрации

Этот вывод справедлив для всего диапазона частот от 25 Гц до 85 Гц. В таблице 4.6 выделены периоды изменения контраста T_s и поддиапазоны частот $f_{кол}$, в которых можно получить более высокую точность контроля.

При контроле размаха вибрации выполнить пункты 1-5, указанные выше, а далее перейти к следующему, шестому пункту.

6. Зафиксировать пару штрихов в изображении пирамидальной миры с нулевым контрастом. Размах вибрации R соответствует ширине штриха a : $R=a$.

Таблица 4.6

T_s , секунд	$f_{кол}$, Гц	Погрешность, Гц
20	25-39	$\Delta f \pm 0,001 \cdot f$
13	40-84	
6	85	

Для контроля целесообразно использовать три пары штрихов. Ширина штрихов средней пары соответствует номинальному размаху вибрации R . Размеры штрихов с низкой пространственной частотой соответствуют недопустимому размаху вибрации. Размеры штрихов с высокой пространственной частотой могут быть заданы по формуле: $a = 0,75R$.



Рис.11. Изображение штрихов на экране монитора: а) - допустимый размах вибрации; б) - размах вибрации превышает допустимый

При допустимом размахе вибрации контраст в изображении штрихов в течение периода T_s изменяется в соответствии с рис.11,а. В начальный момент периода T_s контраст по штрихам распределен в последовательности: $K>0$, $K=0$, $K<0$. В момент времени $T_s/2$ у всех штрихов возникает положительный контраст: $K>0$. В конце периода T_s контраст возвращается к первоначальному виду.

При недопустимом размахе вибрации нулевой контраст смещается в сторону низких пространственных частот. В начальный момент периода T_s контраст по штрихам распределен в последовательности: $K=0$, $K<0$, $K<0$. В момент времени $T_s/2$ у всех штрихов возникает положительный контраст: $K>0$. В конце периода T_s контраст возвращается к первоначальному виду.

Заключение

1. На основе синтеза стробоскопического эффекта и эффекта изменения контраста в парных штрихах с различной пространственной частотой предложен и научно обоснован новый метод оптического контроля параметров вибрации. Реализация метода современными средствами исключает во-первых, применение теоремы Котельникова и увеличивает, таким образом, диапазон контроля частот в 2 раза. Во-вторых, способен обеспечить одновременный контроль частоты и размаха гармонической вибрации на значительных расстояниях объекта контроля от видеокамеры. В-третьих, исключает влияние инерционности первичного измерительного преобразователя.

2. Разработана математическая модель контроля параметров вибрации, которая при условии стробоскопического эффекта позволяет анализировать оптическое изображение штрихов в зависимости от частоты и размаха вибрации с учетом времени экспозиции ПЗС-фотоприемника.

3. Теоретически и экспериментально установлено, что при несовпадении времени экспозиции с периодом кадра ПЗС-фотоприемника возникает эффект «плавающей» ЧКХ, которая полностью объясняет изменение контраста в штрихах с течением времени.

4. При вычислении контраста в изображении штрихов по известному соотношению яркостей предложено вместо разностей максимального и минимального значений определять разность между яркостью в промежутке штрихов и яркостью на штрихах. Строгая фиксация яркостей позволяет получить положительный, отрицательный и нулевой контрасты и, таким образом, согласовать результат вычисления контраста в пространственной области с результатом изменения контраста по ЧКХ в частотной области.

5. В качестве первичного измерительного преобразователя как средства контроля предложен тест-объект в виде трех парных штрихов. Ширина штрихов в средней паре соответствует номинальному размаху вибрации: $a_2=R$. Ширина штрихов с низкой пространственной частотой превышает действительный размах вибрации и составляет $a_1 = (1,1 - 1,3)R$. Ширина штрихов с высокой пространственной частотой меньше действительного размаха вибрации: $a_3 = 0,75 R$.

6. При допустимом размахе вибрации в средней паре штрихов возникает нулевой контраст, в штрихах с низкой пространственной частотой – положительный контраст, а в штрихах с высокой пространственной частотой – отрицательный контраст.

7. При недопустимом размахе вибрации нулевой контраст возникает в штрихах с низкой пространственной частотой. При этом в других парах штрихов появляется отрицательный контраст.

8. При контроле параметров вибрации в диапазоне $f = 25-85$ Гц целесообразно использовать коэффициент отношения времени экспозиции к периоду кадра

ПЗС-фотоприемника равным 0,5. Это соотношение обеспечивает широкий диапазон изменения ЧКХ стробоскопического эффекта, которая увеличивает динамический диапазон изменения контраста в штрихах, что позволяет повысить точность контроля.

9. Чтобы методическая погрешность контроля частоты вибрации не превышала 0,5 %, период изменения контраста на экране монитора должен составлять не менее 4 секунд.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Юденков А.В. Интеллектуальное оптическое средство контроля частоты вибрации объекта // Ползуновский альманах. – 2008. - № 2. – С. 91-92.

2. Зрюмов Е.А., Зрюмов П.А., Юденков А.В., Пронин С.П. Исследования согласования частоты колебания тест-объекта и частоты опроса ПЗС-фотоприемника видеокамеры // Ползуновский альманах. – 2008. - № 2. – С. 50-53.

3. Зрюмов Е.А., Пронин С.П., Юденков А.В., Математическая модель колебания тест-объекта, фиксируемого на фотоприемнике видеокамеры // 8-я Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль и информатизация»: Тез. докл. Барнаул, 3-4 июня 2007 г. – С. 36-38;

4. Пронин С.П., Седалищев В.Н., Замятин В.И., Кривобоков Д.Е., Зрюмов Е.А., Воронов А.С., Кононова Е.С., Юденков А.В., Потапов А.П. Контрольно-измерительные приборы и интеллектуальные системы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий // Ползуновский альманах. – 2008. - № 2. – С. 5-9.

5. Пронин С.П., Юденков А.В., Зрюмов П.А., Кононов С.В., Фадеев А.А., Карташова И.Н., Силаева О.Е. Теоретические и визуальные экспериментальные исследования изменения контраста в изображении колеблющихся парных штрихов // Ползуновский альманах. – 2009. - № 2. – С. 108-112.

6. Юденков А.В., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Введение функции передачи сигнала для анализа информационно-измерительной оптико-электронной системы в динамическом режиме // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве»: - Тез. докл. г. Новокузнецк, 17-19 мая 2007 г. – С. 422-424.

7. Юденков А.В., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Исследование оптического метода контроля амплитуды вибрации с применением двойных марок // 9-я Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль и информатизация»: Тез. докл. Барнаул, 3-4 июня 2008 г. – С. 37-39.

8. Пронин С.П., Наталенко Д.Ю., Юденков А.В. Исследование пространственных гармонических колебаний объекта контроля с помощью пирамидальной миры // 9-я Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль и информатизация»: Тез. докл. Барнаул, 3-4 июня 2008 г. – С. 51-54.

9. Юденков А.В., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Контроль амплитуды вибраций с помощью пирамидальной миры // Ползуновский альманах. – 2007. - № 3. – С. 94-95.

10. Юденков А.В., Зрюмов Е.А., Пронин С.П. Контроль собственных колебаний строительных конструкций // VI Межрегиональная научно-техническая конференция «Строительство: материалы, конструкции, технологии»: Тез. докл. – Братск, 19-21 марта 2008 г. – С. 36-37.

11. Пронин С.П., Юденков А.В., Зрюмов Е.А. Контроль параметров вибрации объекта по оптическому изображению тест-объекта на экране монитора персонального компьютера // Естественные и технические науки. – 2009. - № 5 (43). – С 268-274 (Издание, входящее в перечень ВАК).