

На правах рукописи

ВЕНЕДИКТОВ Анатолий Захарович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
КОНТРОЛЯ И ДЕФЕКТАЦИИ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.11.16-

«Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена на кафедре радиоправления и связи ГОУВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель:	Кириллов Сергей Николаевич, заслуженный работник ВШ РФ, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Ермолкин Олег Викторович, доктор технических наук, профессор Антипов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Ведущая организация:	Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Защита состоится "10" ноября 2006 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан "___" _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Показатели качества изделий в машиностроении и машиноремонтировании тесно связаны с применяемыми методами и средствами размерного контроля. Используемые в настоящее время на большинстве предприятий ручные контактные средства измерения геометрических размеров деталей не обеспечивают требуемую точность и оперативность измерений, повышают удельный вес ручного труда. Как следствие, возникает необходимость перехода на более эффективные и точные бесконтактные средства измерений.

Перспективными и получающими все большее распространение бесконтактными средствами размерного контроля являются лазерные триангуляционные измерители, обеспечивающие на расстоянии 30 – 600 мм погрешность измерения 10 – 500 мкм. Монохроматичность, пространственная и временная когерентность, направленность лазерного излучения делают указанные устройства идеальным инструментом размерного контроля. Совокупный анализ замеров дает полную информацию о поверхности объектов сложной формы, в том числе протяженных, а также степени ее износа.

Достоинства лазерных триангуляционных измерителей - бесконтактность, высокая точность и быстродействие, возможность контроля любых сред и измерения параметров объектов в динамике, простота реализации, компактность, невысокая стоимость. Они применяются в автоматизированных системах размерного контроля во многих областях промышленности. Основной вклад в развитие триангуляционных измерителей внесли К.И. Крылов, С.В. Плотников, G. Haussler, E. Trucco, K. Harding, D. Svetkoff, M. Rioux и др.

Однако темпы развития и внедрения триангуляционных измерителей в производство сдерживаются рядом причин, главной из которых является отсутствие научно – методической базы, обеспечивающей создание высокоточных измерителей. В настоящее время практически отсутствует методология обоснования рабочих параметров триангуляционных систем и технологические рекомендации по их использованию применительно к измерениям различных типов деталей.

При создании бесконтактных триангуляционных измерительных систем важно обеспечить получение с требуемой точностью информации о поверхности, форме и размерах деталей, что представляет сложную научно – техническую задачу. В первую очередь, необходимо обосновать истинную картину диффузного отражения лазерного излучения от различных поверхностей деталей, разработать методологию приема отраженного излучения, обработки сигналов, считываемых с приемника, с обоснованием алгоритмов математического и программного обеспечения.

Научные исследования, целью которых является разработка методики проектирования и создание лазерных электронных триангуляционных измерительных систем с высокой точностью измерения, являются в настоящее время актуальными.

Цель работы заключается в разработке методики проектирования высокоточных триангуляционных измерительных систем для промышленного контроля размеров и топологии износа деталей на основе исследований взаимного влияния основных факторов, определяющих погрешность измерения.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач:

- определение взаимосвязи конструктивных параметров триангуляционных измерителей и их влияния на погрешность измерения;
- оценка влияния шероховатости поверхностей на параметры диффузного отражения и связанные с ними оптические помехи, искажающие сигнал на приемнике;
- определение параметров оптической системы переноса изображения зондирующего пятна в активную область фотоприемника;
- оценка влияния формы, размерных характеристик и микротопологии поверхностей измеряемых деталей;
- оценка влияния шумов от оптических помех при считывании сигналов и разработка комплексного метода с целью их устранения для снижения погрешности измерения.

Научная новизна. В рамках диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны теоретические и практические основы проектирования триангуляционных измерительных систем при рабочих расстояниях 30 – 600 мм, в том числе метод обеспечения заданной точности измерения параметров различных деталей.
2. Установлены взаимные связи основных параметров триангуляционных измерителей и определено их влияние на погрешность измерения.
3. Установлены закономерности влияния топологии и микротопологии типовых поверхностей различного класса чистоты механической обработки на свойства диффузного отражения.
4. Разработана методика выбора размеров зондирующего пятна и масштаба его переноса в активную область фотоприемника в зависимости от шероховатости поверхности.
5. Предложен комплексный метод обработки сигналов и алгоритм его реализации, включающий адаптивное ограничение помех, фильтрацию и определение центра пятна изображения.

На основе разработанных методических материалов созданы действующие лазерные триангуляционные системы, проведена их апробация и осуществлено внедрение в производство.

Новизна технических решений по созданию триангуляционных измерительных систем подтверждается патентами №№ 2262660, 2270979, 18850, 18851, 30970, 32874, 33814, 35435, 36508, 37550, 37555, 43357, 43360, 45520, 50650, 50651.

Практическая ценность работы. В результате исследований определены типовые схемы триангуляционных измерителей для различных групп деталей, объединенных по общим конструктивным признакам, и разработана методика проектирования триангуляционных измерительных систем. В настоящее время внедрено в производство восемь типов лазерных триангуляционных измерительных систем для измерения параметров деталей различной формы, составляющих ходовую тележку грузовых вагонов, что подтверждается соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика проектирования триангуляционных измерительных систем, обеспечивающая с точностью 50-500 мкм измерение параметров деталей сложной формы и движущихся объектов.

2. Математическая модель триангуляционного измерителя, позволяющая определить его конструктивные параметры, соответствующие минимальной погрешности измерения.

3. Комплексный метод обработки сигнала и алгоритм его реализации, включающий адаптивное ограничение помех, фильтрацию и определение центра пятна изображения, позволяющий повысить точность измерений на (25-40)%.

Методы проведения исследований. В работе использовались методы теоретико – множественного и эвристического подходов, математической статистики, спектрального и функционального анализа. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе физического эксперимента и имитационного моделирования.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, среди которых: МНТК «Неразрушающий контроль и компьютерное моделирование в науке и технике» (Санкт-Петербург, 1999 г.), отраслевая МНТК «Лазеры, измерения, информация» Санкт-Петербург, 2001 г., 2002 г., 2003 г., 2004 г.), МНТК «Лазеры для медицины, биологии и экологии» (Санкт – Петербург, 2001 г., 2002 г.), Первый и второй международный Радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харьков, 2002 г., 2005 г.), семинар «Неразрушающий контроль и безопасность на железнодорожном транспорте» (Санкт-Петербург, 2004 г.), ВНТК «Перспективы развития лазерных технологий» (Владимир, 2005

г.), 14-я МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2005 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты работы в виде 118 единиц контрольно-измерительного и испытательного оборудования внедрены в филиалах ОАО «Российские железные дороги» (РЖД).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 67 работ, из них 33 статьи, 15 тезисов докладов на конференциях, 16 патентов, 3 свидетельства о регистрации программ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 147 наименований и 11 приложений. Диссертация содержит 172 стр., в том числе основного текста 137 стр., 8 таблиц и 69 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, задачи исследования и защищаемые положения.

Первая глава посвящена анализу основных факторов, влияющих на погрешность измерения триангуляционных измерителей. К ним относятся рабочие параметры и характеристики триангуляционных измерителей (угол триангуляции α , рабочее расстояние h и диапазон измерения, плоскость и базис триангуляции B , параметры приемной оптической системы, шумы фотоприемника, размер и структура зондирующего лазерного пятна), форма, геометрия и микротопология поверхностей измеряемых деталей, взаимно связанные друг с другом. Предельно достижимая точность измерения лазерных триангуляционных систем ограничена спеклами.

Определены методы и средства для снижения влияния факторов, влияющих на погрешность измерения. К ним относятся: конструктивные требования по точности; оптимизация параметров; защита от помех; оптимальное зондирование поверхности; методы обработки; компенсация ошибок.

На основе анализа указанных факторов сформулированы основные задачи диссертационной работы. Определена общая методология и основные направления поиска путей по повышению точности измерения триангуляционных измерителей.

Во второй главе на основе теоретических и экспериментальных данных сделана оценка влияния параметров и характеристик триангуляторов на погрешность их измерения.

Определены коэффициенты диффузного отражения ρ , попадающего на приемник, от типовых поверхностей различной шероховатости. Показано, что величина коэффициента ρ в большинстве случаев уменьша-

ется с повышением класса чистоты обработки в 2-2,5 раза за счет снижения интенсивности диффузного рассеяния.

Установлено, что составляющая зеркального отражения от шероховатых поверхностей 4-14 класса чистоты обработки растет с увеличением угла между излучателем и приемником.

Получено соотношение

$$\operatorname{tg} U \geq \frac{D_p}{2a}, \quad (1)$$

где U – телесный угол отраженного луча, D_p – диаметр зрачка, a – расстояние между объектом и объективом, между параметрами приемной оптической системы триангуляционного измерителя, позволяющее добиться минимального динамического диапазона диффузно – отраженного сигнала от лазерного пятна с поверхности объекта, попадающего на фотоприемник. Как следствие, получен наиболее равномерный сигнал от объекта со всей зоны сканирования при условии, что образующая телесного угла входной апертуры не пересекает границу критического угла зеркального отражения.

Даны рекомендации по выбору размеров зондирующего пятна в зависимости от шероховатости измеряемой поверхности, рабочего расстояния h и диапазона измерения.

Получено выражение для геометрического смещения энергетического центра пятна изображении Δp (рис.1), обусловленного триангуляционным методом измерения

$$\Delta p = a_0 \left(\frac{r^2}{a^2} \right) \cos \alpha \sin \alpha \left(1 / \left[1 - \left(\frac{r^2}{a^2} \right) \sin^2 \alpha \right] \right). \quad (2)$$

Показано, что смещение Δp носит детерминированный характер, растет с увеличением диаметра зондирующего пятна и достигает максимального значения при угле триангуляции, близком к 45° .

Исследовано влияние на погрешность измерений величины порога обработки сигнала и времени экспозиции. Установлено, что влияние времени экспозиции на изменение среднего значения координаты центра пятна изображения при различной величине порога растет с уменьшением времени экспозиции, а величина порога для получения минимального среднеквадратичного отклонения должна быть больше максимального значения уровня шумов на 10 %.

Установлено, что для выбора порога при работе в условиях высокого отношения сигнал – шум наилучшим является алгоритм определения

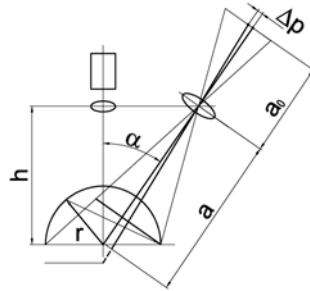


Рис. 1. Смещение энергетического центра пятна изображения

порога по точке минимума огибающей гистограммы между максимумами интенсивности в изображении пятна и фона.

Показано, что на шероховатых поверхностях среднее смещение центроиды пятна изображения растет с увеличением порога.

При работе на открытых поверхностях необработанных деталей, характеризующихся нерегулярной шероховатой поверхностью с микронеровностями больших размеров, среднее смещение центроиды пятна изображения характеризуется меньшей величиной и меньшим разбросом по сравнению с измерениями на деталях с различной степенью механической обработки. Наименьшее отклонение центроиды пятна при рабочих расстояниях 95 – 330 мм и диапазонах измерения 80-150 мм наблюдается при диаметре зондирующего пятна 2 мм.

Разработан метод апертурных диафрагм, позволяющий значительно снизить уровень оптических помех, обусловленных спеклами.

Показано, что для обеспечения точного соответствия структур изображения и объекта следует увеличивать разрешающую способность объектива с учетом одновременного роста пространственной частоты, и, соответственно, сферической аберрации.

Предложена математическая модель триангуляционного измерителя, позволяющая определить его конструктивные параметры, соответствующие минимальной погрешности измерения. Согласно этой модели погрешность измерения $\Delta h'_{\min}$ может быть представлена в виде

$$\Delta h'_{\min} \approx \frac{D_p \arctg(d_n/a_o)}{140''} \frac{hMa_0 \lg(70''/f_0 \sin U'')}{Ma_0 \lg(70''/f_0 \sin U'') \cos^2 \alpha + B \cos \alpha} + Ma_0 \left[\frac{d_m^2}{4a^2} \right] \sin^2 \alpha \left[\frac{4a^2}{4a^2 - d_m^2 \sin^2 \alpha} \right], \quad (3)$$

где M – масштаб, a_o – расстояние от объектива до приемника, f_o – задний фокус объектива, U'' – апертурный угол со стороны изображения, d_n – размер пиксела, d_{zn} – диаметр зондирующего пятна. Первое слагаемое в (3) – погрешность измерения, связанная с параметрами приемника и оптической системы, второе слагаемое – погрешность измерения, обусловленная геометрическим смещением энергетического центра пятна Δr .

На основе (3) получены кривые зависимости погрешности триангуляционного измерителя $\Delta h'$ от рабочего расстояния h (рис. 2) и угла триангуляции α (рис.3), а также диаметра пятна изображения d_{nn} и погрешности $\Delta h'$ от масштаба M (рис. 4). Установлено, что:

- погрешность $\Delta h'$ растет с увеличением h и M ;
- для достижения минимальной погрешности $\Delta h'$ следует работать в диапазоне углов $\alpha = 30^\circ - 45^\circ$;
- при уменьшении размера пиксела ПЗС приемника $\Delta h'$ уменьшается.

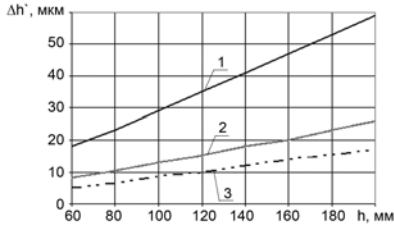


Рис. 2. Зависимость погрешности $\Delta h'$ от рабочего расстояния h при различных параметрах приемной оптической системы: 1) $a_0=8,35$ мм, $f_0=8$ мм, $D_p=6$ мм; 2) $a_0=12,8$ мм, $f_0=12$ мм, $D_p=6$ мм; 3) $a_0=28$ мм, $f_0=25$ мм, $D_p=17,9$ мм.

Полученные зависимости $\Delta h'$ и $d_{\text{пл}}$ (при различных $d_{\text{зп}}$) от M при фиксированном угле α позволяют определять оптимальные значения диаметра $d_{\text{зп}}$, обеспечивающее требуемое значение погрешности измерения $\Delta h'$ (рис. 4).

Математическая модель триангуляционного измерителя, определяющая его основные рабочие параметры, позволяет достичь минимальной погрешности измерения при заданных конструктивных и эксплуатационных требованиях к указанным параметрам.

В третьей главе изложены принципы проектирования бесконтактных триангуляционных систем. Представлена в общем виде организационная структура проектируемой триангуляционной измерительной системы.

Предложены четыре типовые схемы триангуляционных измерителей: для деталей типа валов; для деталей с плоскопараллельными поверхностями; для корпусных деталей сложной формы; для полых цилиндрических деталей.

Сформулированы требования к точности задания основных конструктивных параметров триангуляционных измерительных систем.

Установлена необходимость двойного наклона плоскости фотоприемника при сканировании поверхности со сложным пространствен-

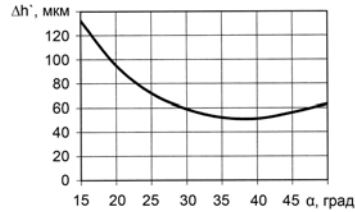


Рис. 3. Зависимость погрешности $\Delta h'$ от угла триангуляции α

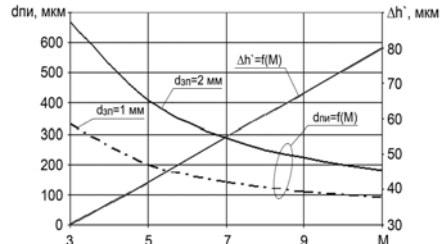


Рис. 4. Зависимость диаметра пятна изображения $d_{\text{пл}}$ от масштаба при различных значениях диаметра зондирующего пятна и зависимости погрешности $\Delta h'$ ($\alpha = 45^\circ$) от масштаба

ным профилем плоским зондирующим лучом – на угол Шеймпфлуга α_1 и на угол θ_t относительно исходного положения фотоприемника, который определяется по формуле

$$\theta_t = \arctg [\operatorname{tg} \beta_t / M \sin \alpha], \quad (4)$$

где β_t – угол между плоскостью зондирующего луча и плоскостью, перпендикулярной к плоскости триангуляции.

Предложена обобщенная структурная схема триангуляционного измерителя с подсистемой считывания изображения и микропроцессорной обработкой, состоящая из модуля фотоприемника, формирователя управления фотоприемником и синхронизацией, модуля внешнего интерфейса, устройства вычисления энергетического центра пятна, модуля ввода-вывода данных, модуля ограничения помех и фильтрации сигнала, буфера результатов вычисления энергетического центра пятна.

Разработан комплексный метод обработки сигнала, включающий следующие этапы: адаптивное ограничение помех, преобразование Фурье, анализ яркости сигнала и определение параметра фильтра, фильтрация, обратное преобразование Фурье, вычисление центра пятна.

Установлено, что использование адаптивного ограничения помех повышает точность измерений на 15 %.

Применена предварительная цифровая фильтрация сигнала с фотоприемника для снижения асимметрии импульса и подавления шумов аналого-цифрового тракта.

На основе анализа различных спектров исходных сигналов установлено, что наиболее целесообразным является использование фильтра с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) вида:

$$L_j = \left| \cos \left(\frac{\pi \cdot j}{N} \right)^n \right|, \quad (5)$$

где N = количество пикселей, используемых для обработки, n - параметр фильтра.

Определено значение параметра n АЧХ фильтра для различных классов чистоты поверхностей, обеспечивающее повышение точности измерений без искажения исходных данных.

На рис. 5 показана форма сигнала в сечении изображения пятна до и после фильтрации.

Выявлены группы поверхностей, для которых существуют параметры n фильтра, обеспечивающие четко выраженный минимум СКО центра пятна (рис.6).

Показано, что при постоянстве таких параметров триангуляционного измерителя как угол падения зондирующего пучка и апертура объектива, по экспериментальным зависимостям яркости изображения пятна A и параметра n фильтра от класса чистоты поверхности η (рис.7) можно определить параметр фильтра n при измерениях поверхностей с неизвестным классом чистоты.

Установлено, что применение адаптивной фильтрации позволяет повысить точность измерений на (10-25) %.

Таким образом, использование комплексного метода обработки сигнала позволяет повысить точность измерений на (25-40) %.

Разработана методика программного и математического обеспечения работы триангуляционных измерительных систем.

Предложен метод обеспечения заданной точности измерения различных деталей, заключающийся в выявлении исходных параметров оценки точности при изготовлении или восстановлении деталей, подлежащих измерению, установлении предела погрешности измерения, определении проектной погрешности измерения, обосновании рабочих параметров триангуляционного измерителя по программе проектирования триангуляционного измерителя и комплексной обработке сигнала.

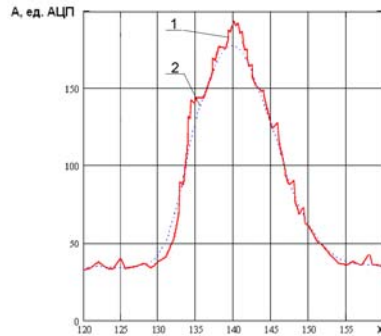


Рис. 5. Сигнал до и после фильтрации: 1 – нефильтрованный сигнал, 2 - фильтрованный сигнал

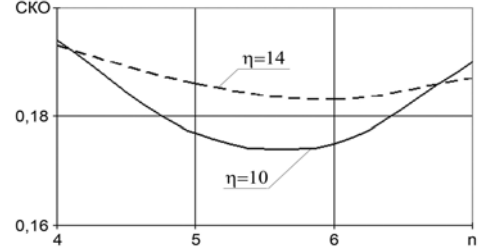


Рис. 6. Зависимость СКО центра пятна от параметра фильтра при 10-ом и 14-ом классе чистоты поверхности

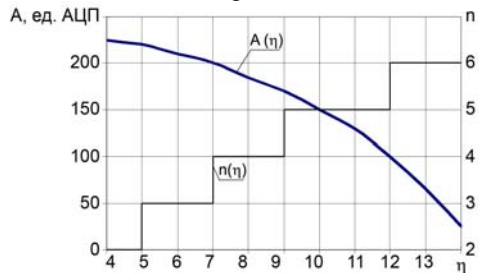


Рис. 7. Зависимость яркости изображения пятна A и параметра n фильтра от класса чистоты поверхности η

Разработана методика проектирования триангуляционных измерительных систем, обеспечивающая минимизацию погрешности измерения деталей сложной формы и движущихся объектов и включающая:

1. Исследование геометрических параметров детали, определение критерия точности K_i и проектной погрешности измерения $\Delta h'$;
2. Определение рабочих параметров триангуляционного измерителя (h , Δh , B , α), включая определение начальных значений параметров h и Δh , исходя из конструктивных особенностей измеряемой детали; определение граничных значений B и α ; определение оптимальных значений h , B , α и a по программе проектирования триангуляционного измерителя; определение значений масштаба изображения, числовой апертуры, диаметра зондирующего пятна, критического значения пятна изображения;
3. Расчет приемной оптической системы (определение фокусного расстояния, угла изображения, положения приемника);
4. Определение параметров фотоприемников;
5. Выбор коэффициента диффузного отражения ρ в соответствии с классами чистоты поверхностей измеряемой детали;
6. Определение минимальной мощности лазера при заданной расходимости излучения;
7. Разработка функциональной схемы триангуляционной измерительной системы;
8. Разработка программного обеспечения с учетом алгоритмов ограничения помех и фильтрации;
9. Разработка конструкции триангуляционного измерителя;
10. Определение способа и средств калибровки лазерной триангуляционной системы.

Четвертая глава посвящена практическому использованию результатов работы при разработке и создании лазерных измерительных триангуляционных систем. На основе принципов проектирования, изложенных во второй и третьей главах, создано и внедрено в производство восемь типов триангуляционных измерительных лазерных систем с точными показателями на уровне лучших мировых образцов:

- триангуляционная система измерения параметров колесных пар «Профиль», точность измерения – 0,05 мм;
- триангуляционная система измерения параметров колесных пар на ходу поезда «Экспресс-Колесо», точность измерения - 0,3 мм;
- триангуляционные системы измерения параметров пружин «Лазер-М» и «Стрела-М», точность измерения - 0,3 мм;
- триангуляционная система измерения геометрических параметров тележек грузовых вагонов «Спрут-М», точность измерения - 0,5 мм;
- триангуляционная система измерения параметров автосцепок «Кит», точность измерения - 0,1 мм;

- триангуляционная система измерения геометрических параметров тормозного башмака «Скан-1», точность измерения - 0,5 мм;
- триангуляционная система измерения геометрических параметров фрикционных клиньев «Клин-М», точность измерения - 0,2 мм.

Конструкции разработанных и внедренных триангуляционных измерительных систем при общем методическом подходе значительно отличаются друг от друга, что обусловлено существенными различиями измеряемых деталей и условиями эксплуатации.

Вопрос о структурировании лазерного излучения в ряде систем в виде пятна или линии решался в связи с используемой схемой измерения, исходя из конкретных технических требований. При измерении расстояния до поверхности детали лазерный луч структурировался в виде зондирующего пятна; при измерении расстояния до поверхности детали и топографии ее поверхности, лазерный луч структурировался в виде линии.

При проектировании триангуляционных измерительных систем, предназначенных для измерения деталей с открытыми свободными поверхностями («Скан-1», «Клин», «Стрела-М», «Лазер-М»), величина зондирующего пятна или линии выбиралась в пределах до 1 мм, а деталей с механической обработкой поверхностей («Профиль», «Спрут-М») – в пределах 1,5 – 2 мм.

Внедрение указанных систем в вагонных и локомотивных депо и на ремонтных заводах ОАО «РЖД» позволило существенно повысить качество выполняемых работ, исключить субъективный фактор при контрольных операциях в ходе ремонта, что способствует снижению аварийности, и обеспечило получение экономического эффекта за счет повышения производительности труда и предотвращения брака в технологии ремонта подвижного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем.

1. Исследованы диффузные отражательные свойства эталонных образцов шероховатости от 4-ого до 14-ого класса чистоты обработки при заданных параметрах триангуляционного измерителя.

2. Разработан способ апертурных диафрагм, позволяющий исключить влияние оптических помех в пятне изображения и повысить точность измерения.

3. Предложена математическая модель триангуляционного измерителя, позволяющая определить его конструктивные параметры, соответствующие минимальной погрешности измерения.

4. Определены типовые функции организационных структур триангуляционных измерительных систем и их системных составляющих.

5. Разработаны типовые схемы измерения групп деталей, объединенных общими конструктивными признаками.

6. Предложен новый метод выбора углов наклона фотоприемника при использовании плоского зондирующего лазерного луча, позволяющий повысить точность измерений поверхностей со сложным пространственным профилем.

7. Разработан комплексный метод обработки сигнала и алгоритм его реализации, позволяющий повысить точность измерений на (25-40)%.

8. Разработана методика проектирования триангуляционных измерительных систем, обеспечивающая минимизацию погрешности измерения деталей сложной формы и движущихся объектов.

9. Разработаны, изготовлены и внедрены в производство восемь наименований 118 единиц лазерных триангуляционных измерительных систем, обеспечивающих требуемую точность измерения, в филиалах ОАО «РЖД» Московской, Октябрьской, Приволжской, Куйбышевской, Западно – Сибирской, Горьковской, Красноярской железных дорог, на Владикавказском вагоноремонтном заводе им С.М. Кирова и Московском заводе по модернизации и строительству вагонов им. Войтовича, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. A. Z. Venediktov, W. N. Demkin, D. S. Dokov, V. N. Tereshkin. Laser Control Device of Spring Parameter. Third International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor// Proceedings of SPAS.-1999-Vol. 3- A15-16.

2. A. Z. Venediktov., V. N. Demkin, D. S. Dokov, V. N. Tereshkin. Optical Control of Geometrical Dimensions for Railway Cars Automatic Coupling//Third International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor//Proceedings of SPAS.-1999-Vol.3- A17-18.

3. A. Z. Venediktov, V. N. Demkin, D. S. Dokov, V. N. Tereshkin. Metering system with Laser Transmitter of “Спут” position//Third International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor//Proceedings of SPAS.-1999-Vol.3- A19.

4. А.З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков, А. В. Комаров. Применение лазерных бесконтактных методов для измерения узлов подвижного состава//Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, экс-

плуатация технических средств: Сборник научн. статей с международным участием ОГУ. – Омск, 2000 г., С. 202-204.

5. А. З. Венедиктов, В.Н.Демкин, Д.С. Доков, А. В. Комаров. Применение лазерных методов для контроля параметров автосцепки и пружин//Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Сборник научн. статей с международным участием ОГУ. – Омск, 2000 г., С. 232-234.

6. А. З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д. С. Доков, А. В. Комаров. Экспресс контроль состояния колесных пар при движении состава//Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Сборник научн. статей с международным участием ОГУ. – Омск, 2000 г., С. 238-240.

7. Патент № 18850 «Лазерный профилометр» МКИ G01B21/00/ А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков, Заявл. 14.08.00, Оpubл. 20.07.01., Бюл. 20.

8. Патент № 18851 «Лазерный дальномер» МКИ G01C 3/00/ А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков, Заявл. 14.08.00, Оpubл. 20.07.01., Бюл. 20.

9. А.З. Венедиктов, С.В. Матюшин, А.И. Брыков, Д.С. Доков, И.Е. Максаков, А.П. Никитин, Ю.Г. Фролов. Автоматизированная линия измерения и сортировки пружин рессорного комплекта грузовых вагонов (ЛАЗЕР-М). Свидетельство № 2003610867 об официальной регистрации программы для ЭВМ. 2003 г.

10. Патент № 30970 «Устройство для бесконтактного измерения параметров колес железнодорожного транспорта», МКИ G01B 11/24; А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков, Заявл. 31.03.03, Оpubл. 10.07.03., Бюл. 19.

11. А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении//Железные дороги мира, 2003 г., № 9, С. 33-36.

12. Патент № 32874 «Устройство для измерения параметров наддрессорных балок и боковых рам тележек грузовых вагонов», МКИ G01B 11/00; А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков; Заявл. 21.04.03, Оpubл. 27.09.03., Бюл. 27.

13. Патент № 33814 «Устройство для измерения параметров пружин», МКИ G01B 11/00; А. З. Венедиктов, А. Д. Горячев, В. Н. Демкин, Д. С. Доков; заявл. 22.07.2003г., Оpubл. 10.11.2003, Бюл. 31.

14. А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков. Лазерные методы и средства контроля геометрии деталей//В мире неразрушающего контроля. 2004, № 1.С.67-68.

15. Патент № 35435 «Стенд для испытания силовых параметров пружин», МКИ G01M 17/04; А. З. Венедиктов, А. Д. Горячев, А.В.Деревенский; заявл. 30.09.2003 г., Оpubл. 10.01.2004, Бюл. 1.

16. А.З. Венедиктов, Демкин В. Н., Доков Д. С. Измерение параметров и испытания пружин рессорного подвешивания вагонов //Железные дороги мира, 2004 г., № 2, С. 45-49.

17. Патент № 36508 «Устройство для измерения параметров колесных пар», МКИ G01B11/24, А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков и др. Заявл. 31.10.2003., Оpubл. 10.03.2004, Бюл. 7.

18. Патент № 37555 «Стенд для измерения, сортировки и подбора пружин тележек грузовых вагонов», МКИ G01M 17/04, А. З. Венедиктов, А.И.Фурцев. Заявл. 27.01.2004., Оpubл. 27.04.2004, Бюл. 12.

19. А.З. Венедиктов, О.В.Пальчик. Проблемы калибровки лазерных триангуляционных измерителей//В мире неразрушающего контроля. 2004, № 4.С. 62-63.

20. Патент № 37550 «Устройство для калибровки лазерных триангуляционных измерителей», МКИ G01B11/00, А.З.Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Доков. Заявл. 19.01.2004., Оpubл. 27.04.2004, Бюл. 12.

21. А.З.Венедиктов. Лазерный триангуляционный измеритель для установки обмера геометрических параметров протеза // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, № 7, 2004.С. 50-52.

22. А.З. Венедиктов. Исследование и разработка контрольно-измерительного и испытательного оборудования для ремонта грузовых вагонов на базе бесконтактных лазерных методов//Приборостроение и средства автоматизации. 2004, № 8.С.66-72.

23. A.Z. Venediktov, V. N. Demkin, D. S. Dokov, V. N. Tireskin. Measurement of wheel pairs parameters of a rolling stock during movement // Proceedings of SPIE.- Vol.5066, pp. 48-53.

24. А.З.Венедиктов, О.В.Пальчик, В.Н.Тирешкин. Многокритериальная процедура минимизации собственной засветки триангуляционных измерителей//Приборы. 2004, № 10.С. 39-41.

25. А.З. Венедиктов. Системы бесконтактного мониторинга параметров колесных пар за рубежом//Железные дороги мира. 2004, № 10. С. 61-65.

26. А.З. Венедиктов. Основные принципы построения оптико-электронных систем триангуляционных измерителей//Вестник РГРТА. Вып. 15, 2004.С.45-51.

27. А.З. Венедиктов. Лазерный триангуляционный измеритель для установки обмера геометрических параметров протеза//Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы-2004. Тезисы докладов конференции. Рязань, 2004.С.10-11.

28. A.Z. Venediktov, V.N.Demkin, D.S. Dokov. Choice of optimum modes of laser triangulation meter at control of surface form. Proceedings of SPIE, Vol. 5381, pp. 103 – 109.

29. Патент № 43357 «Устройство для измерения параметров фрикционного клина тележек грузовых вагонов», МКИ G01B 11/00, А.З. Венедиктов. Заявл. 07.06.2004. Оpubл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

30. А.З. Венедиктов, О.В.Пальчик. Измерение геометрических параметров сложных цилиндрических объектов//Датчики и системы. 2005, № 1.С.24-28.

31. Патент № 43360 «Устройство для измерения параметров тормозного башмака», МКИ G01B 11/00, А. З. Венедиктов. Заявл. 07.06.2004. Оpubл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

32. Патент № 45520 «Лазерный триангуляционный измеритель» МКИ G01B 11/00, А.З. Венедиктов. Заявл. 27.12.2004, Оpubл. 10.05.2005, Бюл. № 13.

33. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик. Параметрическая оптимизация алгоритма оценивания положения одиночного видеоимпульса// Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докладов VII Международной конференции. - Москва, 2005-Т.II.С.283-285.

34. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик, М.С. Горбылев. Анализ физических характеристик тел вращения//Мир измерения. 2005, № 7.С.15-18.

35. Патент № 2262660 «Способ и устройство бесконтактного оптического измерения размеров объектов». МКИ G01B 11/02. А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков. Заявл. 16.02. 2004, опубл. 20.10.2005, Бюл. № 29.

36. А.З. Венедиктов. Влияние параметров лазерного триангуляционного измерителя на погрешность измерения//Перспективы развития лазерных технологий. Труды научно-технической конференции с международным участием, Владимир, 22-25 ноября 2005 г., М.: Новые технологии, 2005 г., С.142-147.

37. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик. Лазерные системы диагностики колесных пар//Перспективы развития лазерных технологий. Труды научно-технической конференции с международным участием, Владимир, 22-25 ноября 2005 г., М.: Новые технологии, 2005 г., С. 139-141.

38. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик. Принцип обработки сигналов вибрации в оптических измерителях виброперемещения. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005, № 6.С. 54-56.

39. А.З. Венедиктов. Оценка смещения энергетического центра зондирующего пятна в фотоприемнике оптико – электронной триангуляционной измерительной системы//Информационно – измерительная и биомедицинская техника. Юбилейный сборник научных трудов, Рязань, 2005 г., С.100-108.

40. А.З. Венедиктов. Повышение точности измерения лазерным триангуляционным способом путем фильтрации сигналов с многоэлементного фотоприемника//Информационно–измерительная и биомедицинская техника. Юбилейный сборник научных трудов, Рязань, 2005 г., С. 109- 115.

41. А.З. Венедиктов. Фильтрация сигналов лазерного триангуляционного измерителя//Материалы 14-ой международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», 6-8 декабря 2005 г., Рязань, 2005 г., С. 47.

42. А.З. Венедиктов. Измерять поможет лазер//Вагоны и вагонное хозяйство. 2005, № 4.С.38-42.

43. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик, В.Н. Тирешкин, Д.С. Доков. Современное состояние и перспективы развития измерительно-диагностических систем на железнодорожном транспорте//Наука и техника транспорта, 2005 г., № 4, С. 18-25.

44. А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик, В.Н. Тирешкин, Д.С. Доков. Анализ и диагностика локомотивных колес: автоматический комплекс «Экспресс-Локомотив»//Локомотив, 2005 г., № 12, С.28-29.

45. Патент № 50651 «Устройство для бесконтактного измерения расстояния», МКИ G01B 11/24, А.З. Венедиктов; заявл. 22.08.2005 г., Оpubл. 20.01.2006 г., Бюл. № 2.

46. Патент № 50650 «Устройство для измерения параметров пружин», МКИ G01B 11/00, А.З. Венедиктов; заявл. 27.09.2005 г., Оpubл. 20.01.2006 г., Бюл. № 2.

47. Патент № 2270979 «Устройство для определения профиля внутренней поверхности объекта». МКИ G01B11/24. А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков. Заявл. 11.07.2003, Оpubл. 27.02.2006, Бюл. № 6.

В е н е д и к т о в Анатолий Захарович

Методика проектирования триангуляционных измерительных систем для
промышленного контроля и дефектации изношенных деталей

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.09. 2006. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр ГОУВПО «РГРТУ».