

## **ГЛАВА 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ГЕОМЕТРИИ ДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В ФАЗОВО- НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Глава посвящена решению проблем, связанных с лабораторными и промышленными испытаниями предложенных и реализованных в диссертации методов лазерной многопараметрической триангуляции геометрии динамических и статичных объектов в фазово-неоднородных средах.

Представлены результаты промышленных испытаний оптоэлектронной измерительной системы на основе многопараметрической триангуляции с применением метода структурированного освещения. В качестве объекта измерения использована лопасть рабочего колеса лопастно-поворотной турбины. Испытания проводились в условиях металлообрабатывающего цеха на предприятии тяжелого машиностроения. Поверхность измеряемой лопасти характеризуется сложной светорассеивающей структурой. Измерение выполнялись без предварительного нанесения дополнительных покрытий на измеряемые поверхности.

В главе представлены результаты проведенных промышленных испытаний измерителя толщины горячего проката, работа которого основана на методе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции. Показывается, что созданный измерительный комплекс, реализующий методы синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции обеспечивает рекордно малый уровень погрешности при измерении толщины горячего проката в условиях нестационарной термоградиентной фазово-неоднородной среды действующего горячего цеха металлургического промышленного предприятия.

#### 4.1. Лабораторные испытания оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов

Экспериментально исследованы возможности основанной на пространственно-временной модуляции источника оптического излучения оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии в измерительном объеме 200x200x100 мм. Расположение функциональных узлов системы представлено на рис. 4.1. В качестве источника оптического излучения и пространственного модулятора интенсивности освещения использован цифровой проектор NEC VT570. В качестве приемника оптического излучения применена цифровая CCD камера KC-383С. Расстояние между камерой и проектором ~300 мм. Расстояние до измеряемой области ~500 мм. Измеряемая область ~200x300x100 мм. Разрешение проектора 1024x768. Разрешение камеры 320x240. Количество кадров в одном измерении 200.

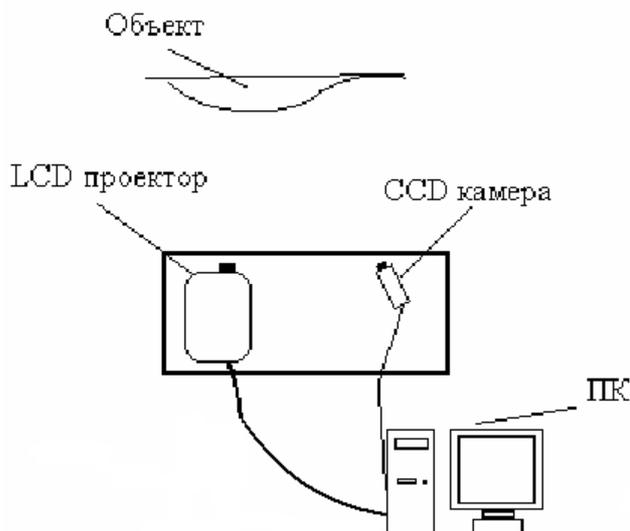


Рис. 4.1. Расположение функциональных узлов комплекса.

Измерен пластиковый пропеллер бытового вентилятора с характерными размерами 300x300x50 мм (рис. 4.2). Результат представлен на рис.4.3.

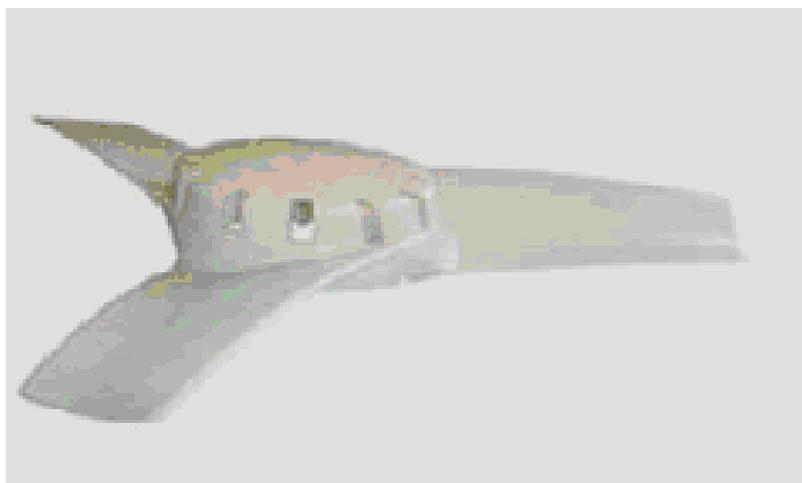


Рис.4.2. Пропеллер вентилятора с характерными размерами 300x300x50 мм.

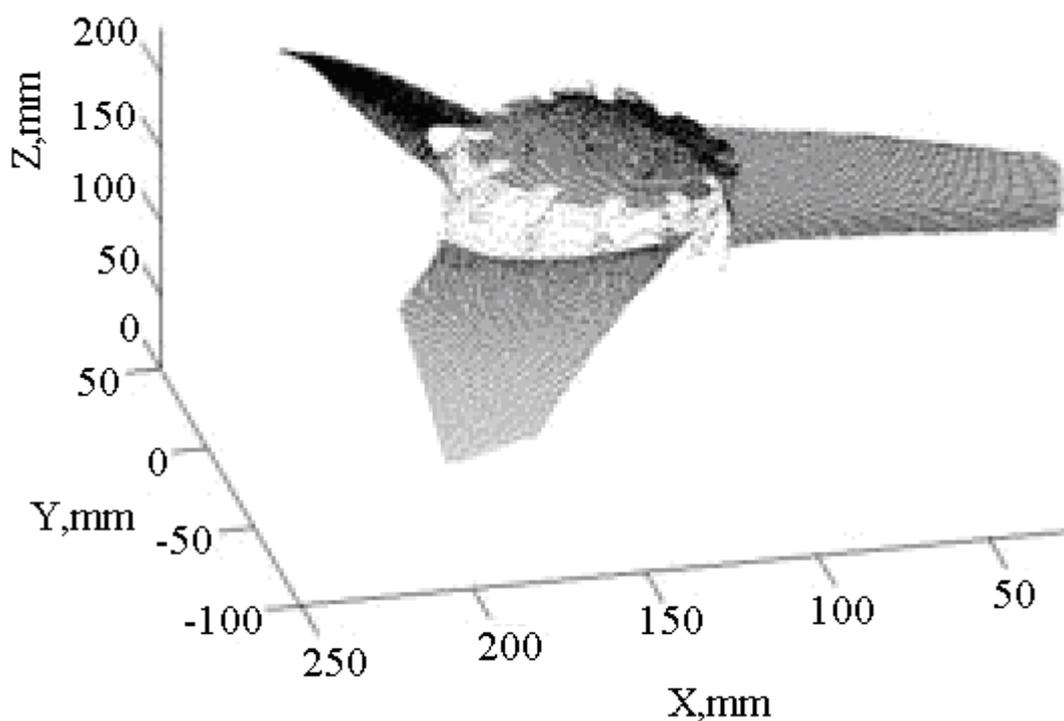


Рис. 4.3. Измеренный профиль поверхности пропеллера вентилятора с характерными размерами 300x300x50 мм.

Измерена поверхность модели лопатки гидротурбины с характерными размерами 150x120x80 мм (рис. 4.4). Поверхность лопатки имеет сложную

неравномерную отражательную структуру, что накладывает повышенные требования на устойчивость алгоритма обработки данных при восстановлении профиля поверхности. Результат представлен на рис. 4.5.



Рис. 4.4. Модель лопатки гидротурбины с характерными размерами 150x120x80 мм.

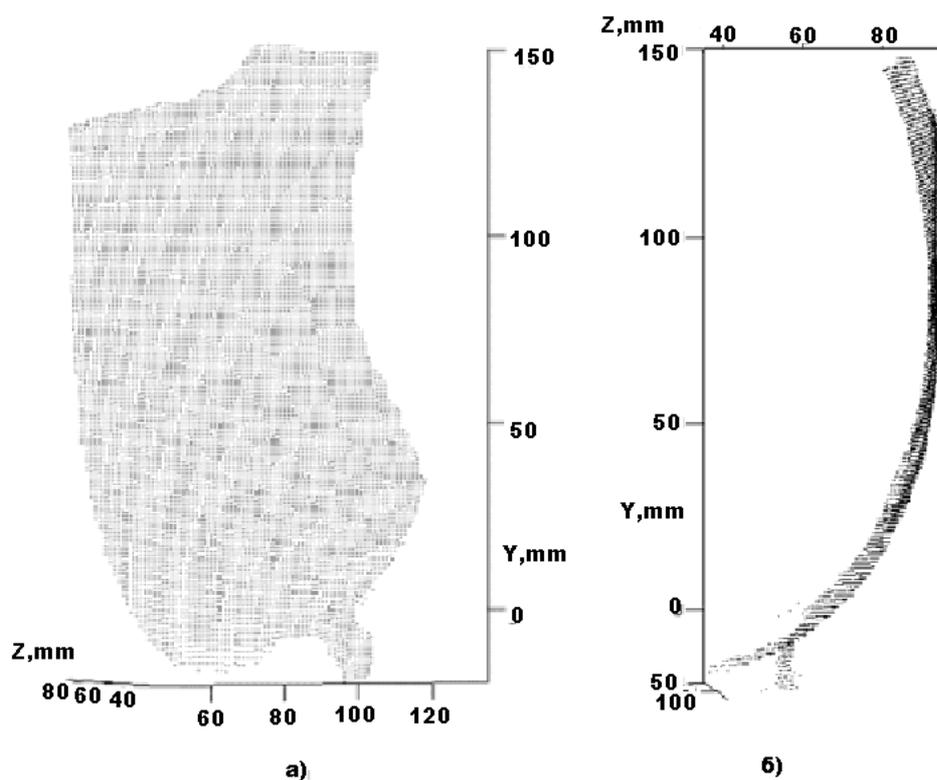


Рис. 4.5. Измеренный профиль поверхности модели лопатки гидротурбины с характерными размерами 150x120x80 мм.

В ходе проведенных экспериментов доказано, что созданный прототип оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии на основе

пространственно-временной модуляции оптического излучения позволяет проводить измерения 3D геометрии объектов сложной формы, имеющих сложные отражательные и светорассеивающие свойства поверхностей. Увеличение и масштабирование размеров измерительного объема достигается за счет изменения положения проектора и камеры в пространстве и не вносит принципиальных изменений в работу метода и алгоритмов обработки сигналов.

#### **4.2. Полевые испытания оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов**

Для проверки работоспособности оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения в полевых условиях, были проведены измерения в измерительном объеме 2x2x2 м.

Расположение функциональных узлов системы представлено на рис. 4.1. В качестве источника оптического излучения и пространственного модулятора интенсивности освещения использован цифровой проектор NEC VT570. В качестве приемника оптического излучения применена цифровая CCD камера КС-383С. Калибровка осуществлялась с использованием калибровочной мишени (рис. 4.6).

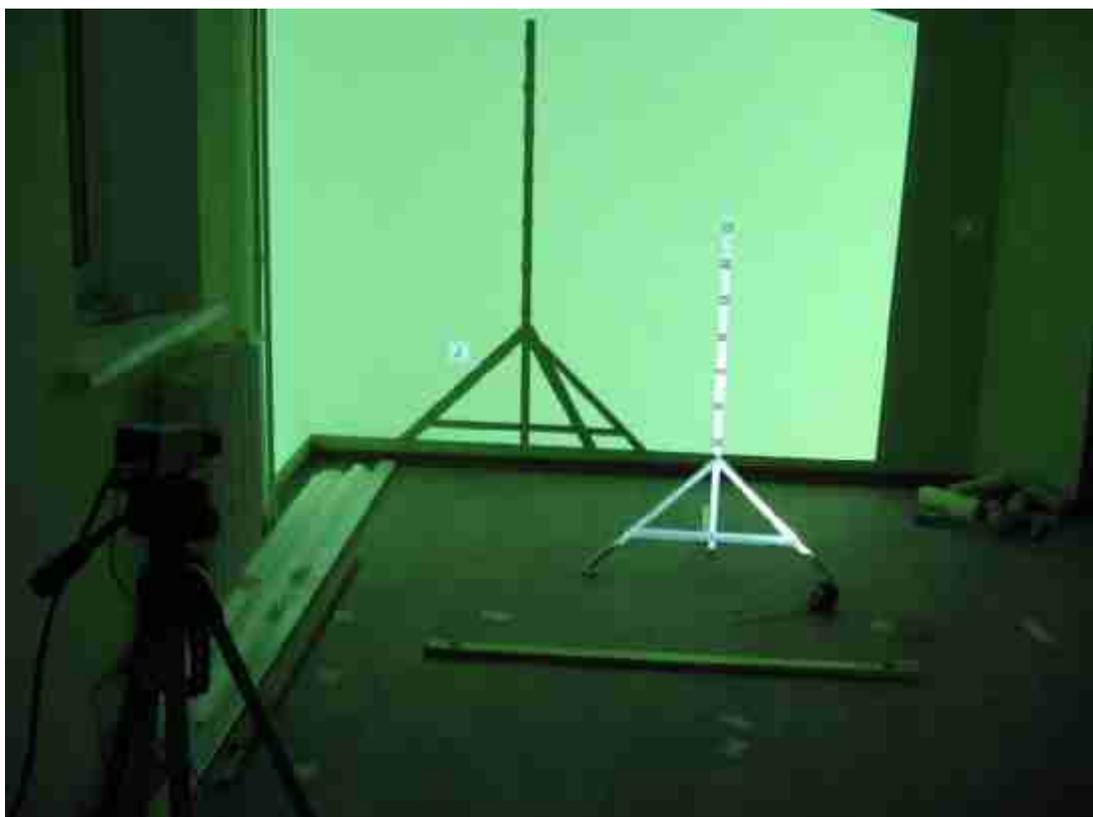


Рис. 4.6. Калибровка прототипа системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов с помощью калибровочной мишени.

Проведено измерение геометрии деформированного листа древесно-волоконной плиты (ДВП), имеющего линейные размеры 1200x1000x500 мм (рис. 4.7). Измерительный объем составил около 2000x2000x2000 мм.



Рис. 4.7. Деформированный лист ДВП  
с характерными размерами 1200x1000x500 мм.

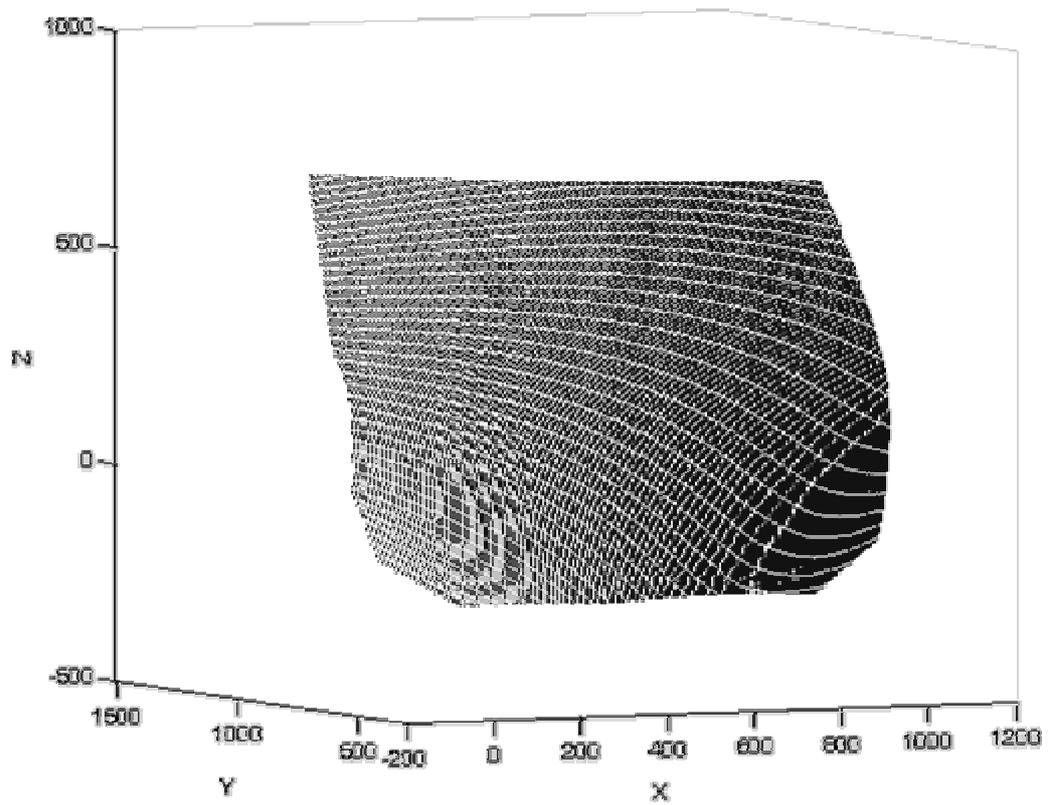


Рис. 4.8. Восстановленная 3D поверхность деформированного листа ДВП.

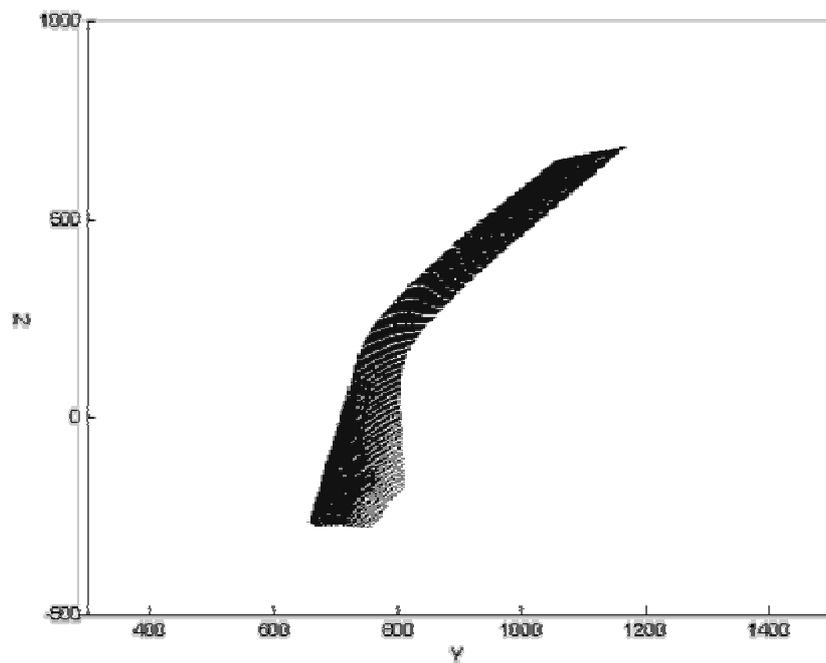


Рис. 4.9. Проекция ZY восстановленной 3D поверхности деформированного листа ДВП.

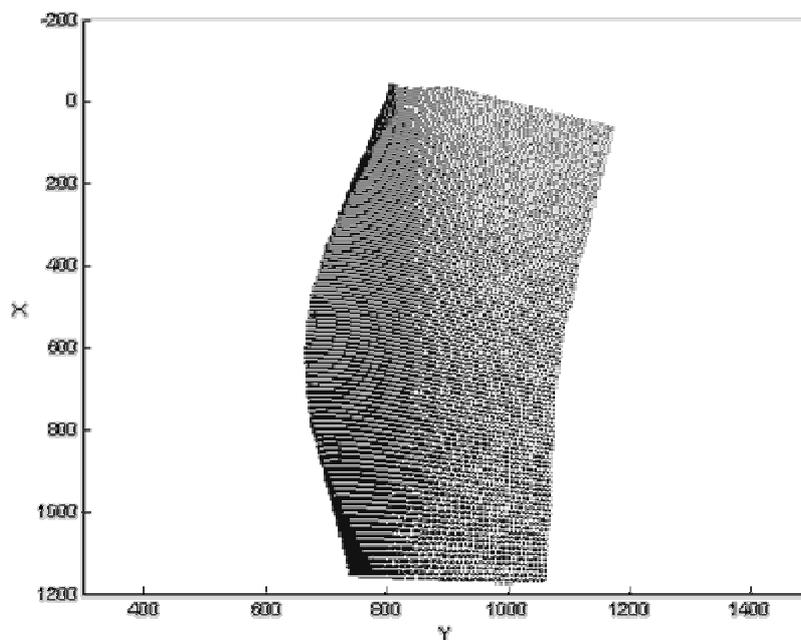


Рис. 4.10. Проекция XY восстановленной 3D поверхности деформированного листа ДВП.

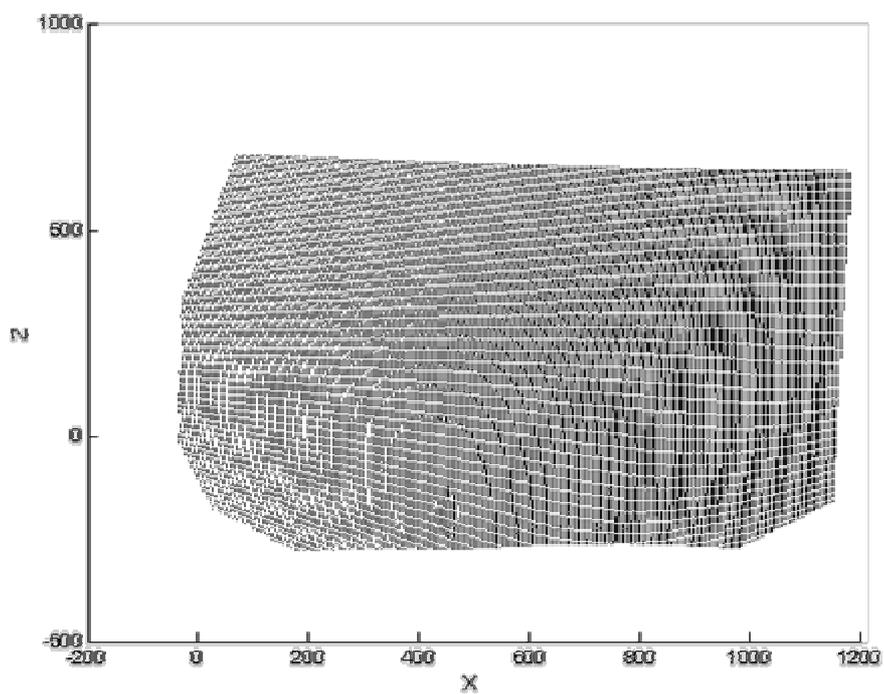


Рис. 4.11. Проекция XZ восстановленной 3D поверхности деформированного листа ДВП.

Результат представлен на рис. 4.8-4.11. Данный эксперимент доказывает возможность измерения крупногабаритных объектов сложной формы, имеющих сложную светорассеивающую структуру поверхности.

Полевые испытания оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов, реализующей предложенный в диссертации метод пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, подтвердили работоспособность предложенных концепций, высокие точностные и функциональные характеристики при работе в натуральных условиях. Получена 3D геометрия деформированных листов древесно-волоконистых плит, имеющих линейные размеры 1.2x1.0x0.5 м. Выполнена экспериментальная оценка погрешности измерения оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Установлено, что погрешность измерения составила менее 0,057%. Полученная экспериментальная оценка погрешности измерения оказалась существенно меньше теоретической оценки, представленной в разделе 2. Связано это с тем, что в проведенных полевых экспериментах оценивалась погрешность измерения Z-координаты, а не всех трех декартовых координат

#### **4.3. Промышленные испытания оптоэлектронной измерительной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов**

Промышленные испытания оптоэлектронной измерительной системы 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения показывают работоспособность предложенных научных идей, концепций и методов, реальную степень завершенности измерителя и готовность систем для внедрения на предприятия России.

Размещение созданной на основе предложенных в диссертации методов и технических решений измерительной системы было выполнено по

временной схеме на разметочном участке цеха №19 ОАО “Силовые машины” филиал ЛМЗ в г. Санкт-Петербург. Проведены измерения геометрии лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781), имеющего линейные размеры 2,5х2х1м.

В измерительной системе в качестве источника оптического излучения и пространственного модулятора интенсивности освещения использован цифровой проектор NEC VT570, позволяющий управлять пространственной модуляцией интенсивности излучения с разрешением 1024х768 точек. В качестве фоторегистратора применена цифровая CCD камера КС-383С, позволяющая получать изображение размером 320х240 пикселей. В качестве цифрового электронного блока и блока регистрации результатов использован современный персональный компьютер.

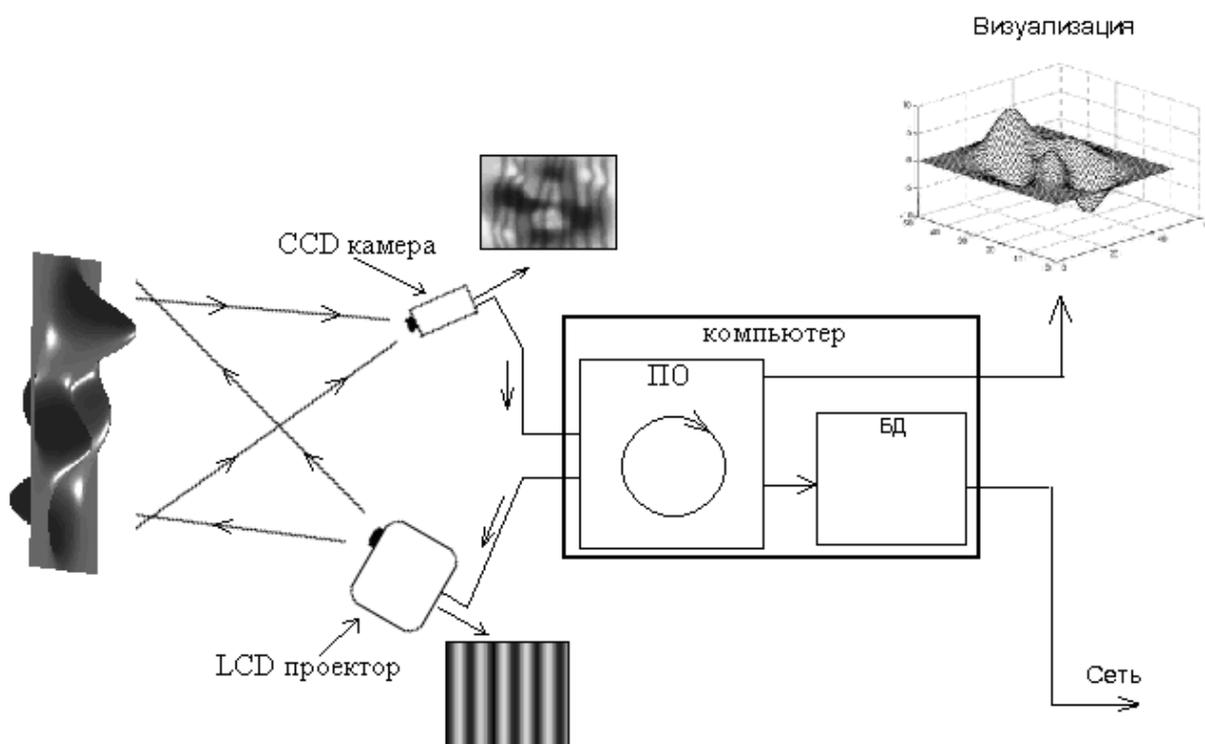


Рис. 4.12. Функциональная схема измерительного комплекса.

Расположение функциональных узлов измерительной системы представлено на рис. 4.12. Расстояние между камерой и проектором

составляло ~3 м. Расстояние до измеряемого объекта (лопасти) ~6 м. Измеряемая область ~3х3х2 м. Разрешение проектора 1024х768. Разрешение камеры 320х240. Количество кадров в одном измерении 1000.

Выполнена калибровка путем последовательного измерения калибровочных мишеней, локализованных в пространстве перед измеряемой лопастью. На рис. 4.13 - 4.15 приведены фотографии измеренной лопасти гидротурбины. На рис. 4.16 показаны примеры восстановленной трехмерной поверхности лопасти. На рис. 4.17-4.18 показаны примеры профиля поверхности лопасти в различных сечениях.

Время измерения поверхности лопасти рабочего колеса (сбор и обработка информации о поверхности измеряемого объекта, представление результатов) не превышает 15 минут.



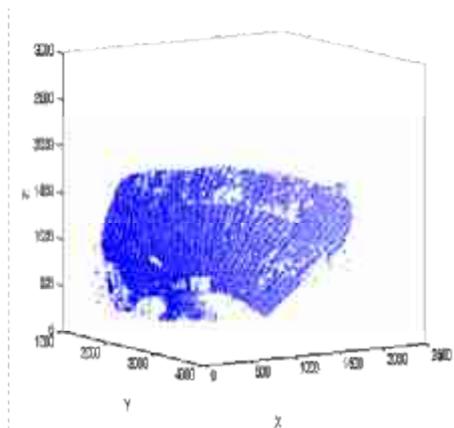
Рис. 4.13. Лопасть рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781) (вид с позиции источника излучения).



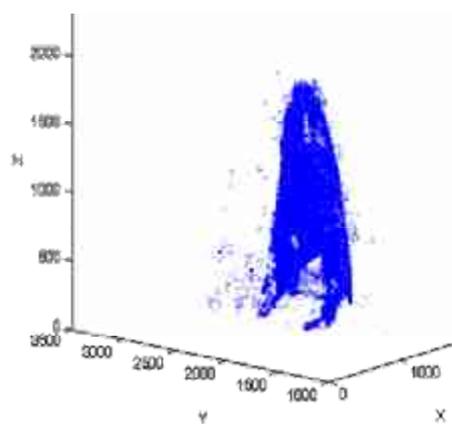
Рис. 4.14. Лопать рабочего колеса лопатно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781) (вид сбоку).



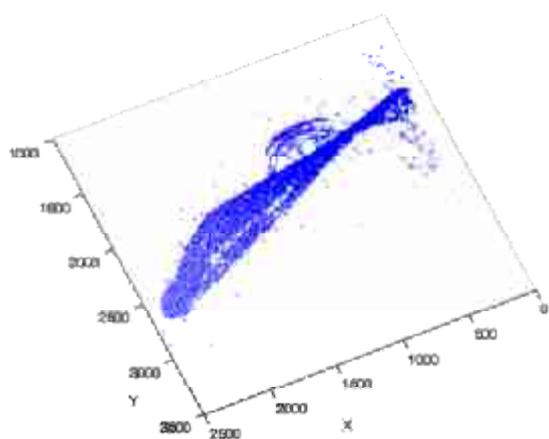
Рис. 4.15. Лопать рабочего колеса лопатно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781) (вид с позиции приемника излучения).



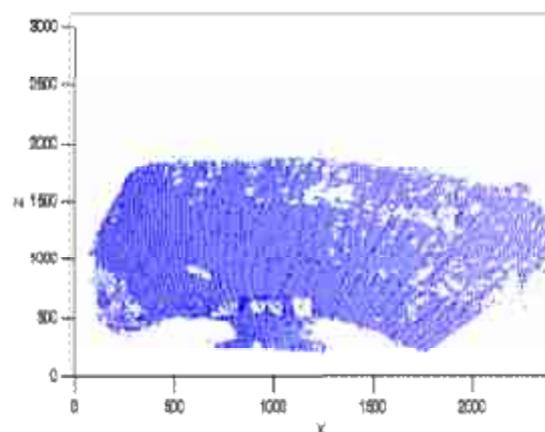
а)



б)

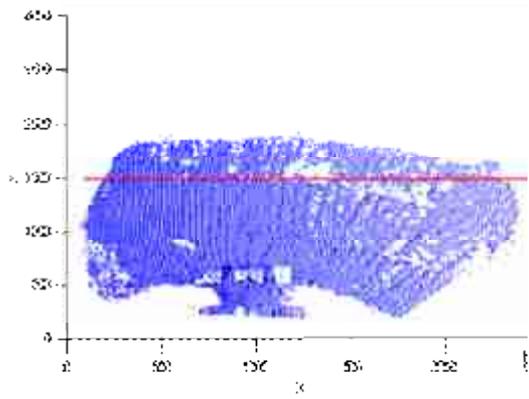


в)

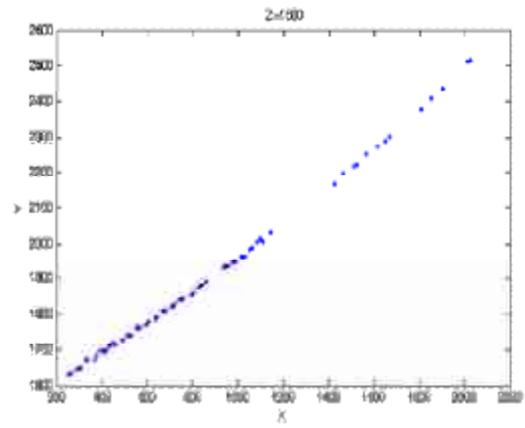


г)

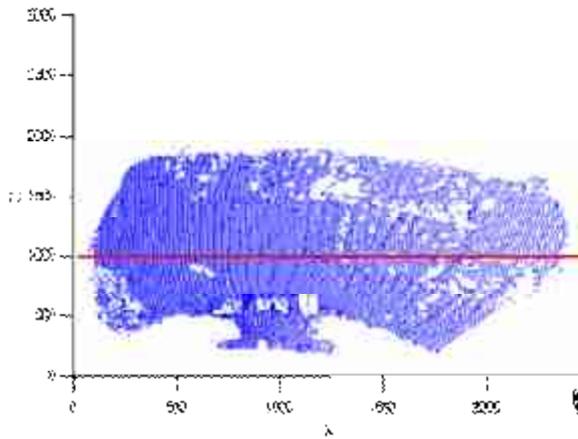
Рис. 4.16. Измеренная 3D поверхность лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781). Вид с направления фотоприемника (а), проекция ZY (б), проекция XY (в), проекция XZ (г).



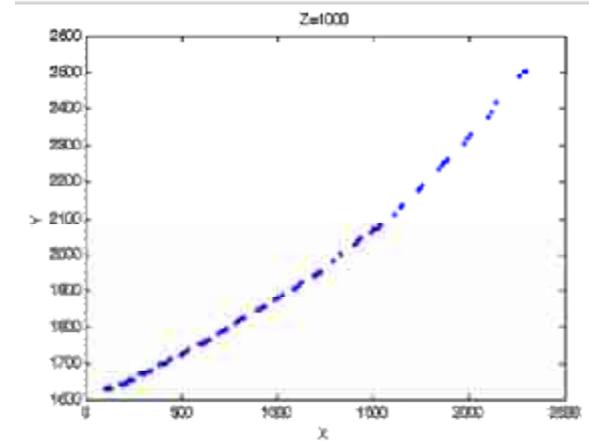
а)



б)

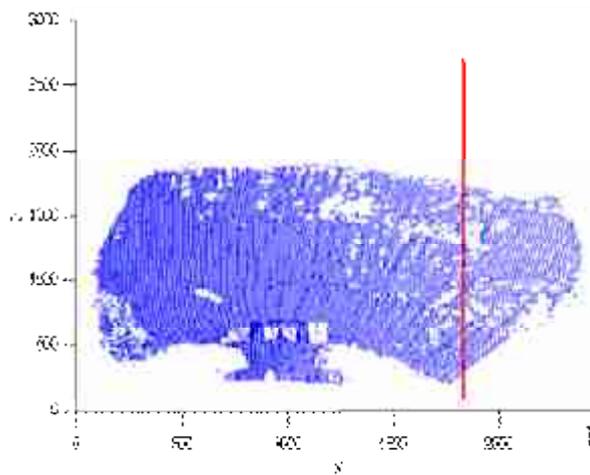


в)

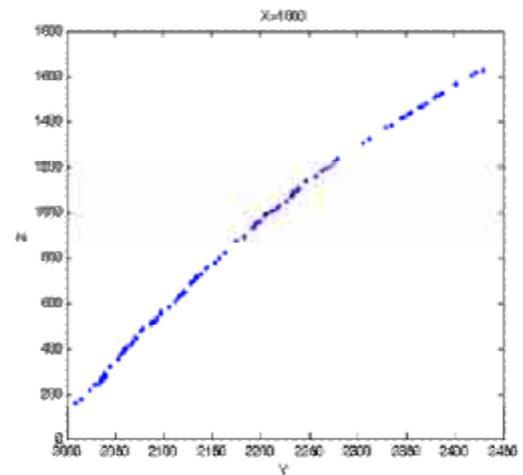


г)

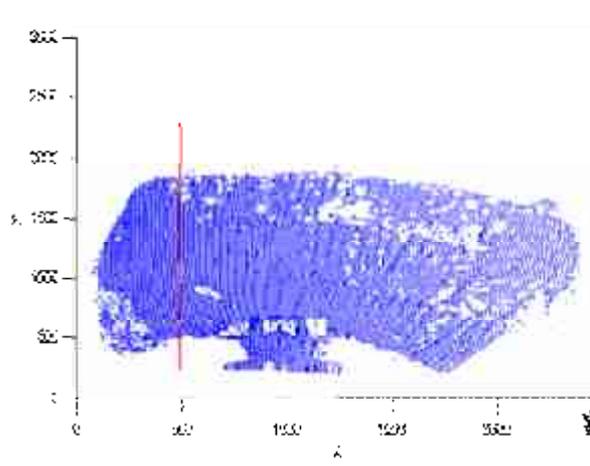
Рис. 4.17. Профиль поверхности лопасти гидротурбины в срезах  $Z=1500$  мм. (а, б),  $Z=1000$  мм (в, г).



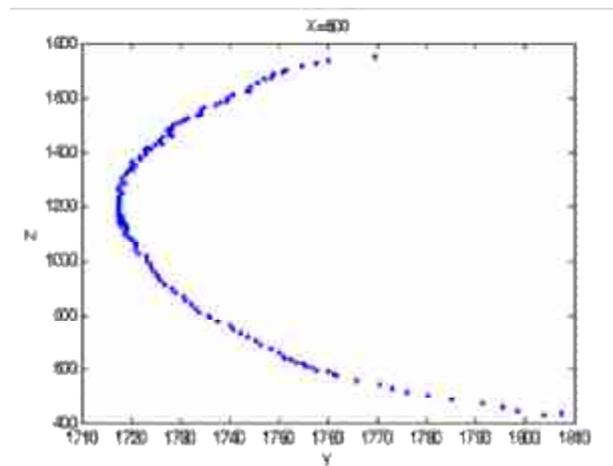
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.18. Рис. 4.20. Профиль поверхности лопасти гидротурбины в срезах  $X=1800$  мм. (а, б),  $X=500$  мм (в, г).

Из полученных данных видно, что измеренный профиль 3D геометрии лопасти гидротурбины имеет довольно много выпавших точек. Это вызвано недостаточной мощностью используемого для проверки работоспособности предложенных концепций бытового проектора. Примененный LCD проектор NEC VT570 обеспечивает световой поток 1300 люмен. Существующие более совершенные бытовые LCD проекторы обеспечивают световой поток 5000

люмен и более (Viewsonic PJ1173) и позволяют решить эту проблему с помощью применения более современного оборудования.

Погрешность измерения не превышала 9 мм. Оценка погрешности измерения осуществлялась визуальным анализом величины отклонения измеренной 3D поверхности лопасти гидротурбины от гладкой поверхности (поверхность лопасти была отшлифована и имела шероховатость менее 0.5 мм). Относительно высокая погрешность измерения обусловлена использованием в качестве приемника оптического излучения камеры с ограниченным пространственным разрешением. Относительная погрешность измерения составляет 0,3 %.

Полученная экспериментальная оценка погрешности измерения вполне согласуется с теоретической оценкой погрешности измерения, выполненной в предыдущих разделах работы. Выражение (2.9) при подстановке параметров экспериментальной установки дает оценку погрешности измерения декартовых координат 0,6%. Полученные экспериментальные результаты убедительно подтверждают работоспособность созданных оптоэлектронных методов измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Погрешность измерения обусловлена применением самых распространенных бытовых источника и приемника оптического излучения, обладающих низким пространственным разрешением, малой глубиной кодирования цвета и слабым световым потоком.

При использовании LCD проектора, обеспечивающего световой поток 5000 люмен, цифровой камеры, обеспечивающей разрешение изображения 3000x2000 пикселей, относительная погрешность измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов, будет составлять менее 0,08% (раздел 2.2), или 2 мм для задачи измерения 3D геометрии лопасти гидротурбины в процессе производства, имеющей линейные размеры 2,5x2,0x1,0 м.

Оценим минимальную погрешность измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов, которую можно получить, используя

предложенные методы и доступное оборудование. Для оценки погрешности в качестве приемника оптического излучения возьмем фотокамеру Hasselblad H3DII-50, которая позволяет получать изображения разрешением 50 мегапикселей (8100x6075). В качестве источника пространственно модулированного оптического излучения возьмем широкоформатный кино проектор SANYO PLC-HD10, обеспечивающий разрешение 1920x1080, яркость 6000 люмен и глубину кодирования цвета 30 бит (глубина кодирования оттенков серого 10 бит).

Пусть относительная погрешность измерения яркости излучения тракта источник – приемник оптического излучения не превышает 0.00098 (такая погрешность обусловлена использованием проектора с глубиной кодирования оттенков серого 10 бит). Пусть в нашей реализации оптоэлектронной измерительной системы количество излучаемых засветок, имеющих различный сдвиг начальной фазы,  $N = 1900$  (количество излучаемых засветок должно быть меньше разрешения используемого источника пространственно модулированного излучения). Пусть относительная погрешность измерения декартовых координат точки в процессе калибровки  $d=0.1\%$ . Количество точек калибровочного объекта, участвующих в калибровке  $M=200$ . Пусть горизонтальное разрешение изображений, получаемых приемником оптического излучения равно 8100 точек. Тогда общая относительная погрешность измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения из выражения (2.9):  $\Omega = 0,000025 + 0,00007 + 0,00012 = 0,000215 = 0,021\%$ , или 0,5 мм для задачи измерения 3D геометрии лопасти гидротурбины в процессе производства, имеющей линейные размеры 2,5x2x1 м. При этом работа с предложенной системой проще, а стоимость ее реализации будет на два порядка меньшей, чем стоимость существующих зарубежных коммерческих измерителей. Дополнительным преимуществом предложенных в диссертации технических решений является легкость пространственного масштабирования созданных

систем, позволяющая осуществлять натурные измерения 3D геометрии самых крупногабаритных технических объектов, таких, как здания или самолеты.

В ходе обсуждения полученных результатов на ОАО “Силовые Машины” филиал ЛМЗ в г. Санкт – Петербурге, заводские специалисты рассказали, как представители немецкой фирмы LEICA проводили промышленные испытания лазерного сканера для измерения 3D геометрии лопастей гидротурбин на их предприятии. Перед проведением измерений они в обязательном порядке покрывали лопасть гидротурбины белой матовой краской, чтобы уменьшить влияние неравномерной отражательной и светорассеивающей структуры поверхности лопасти на результаты измерений. Подтвержденная точность измерения 3D геометрии лопасти гидротурбины лазерным сканером фирмы LEICA составила около 2 мм. Эти результаты убедительно подтверждают устойчивость предложенных в диссертации алгоритмов обработки данных на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения при измерении 3D геометрии лопасти гидротурбины - объекта со сложной неравномерно отражательной и светорассеивающей структурой поверхности.

В результате проведенных промышленных испытаний оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения было показано, что разработанные методы измерения 3D геометрии работоспособны в условиях отечественной промышленности. Применение устойчивого метода расшифровки фазовых изображений обеспечило инвариантность измерителя к светорассеивающим свойствам поверхности измеряемых объектов. Разработанные методы калибровки позволили выполнять калибровку оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов, обеспечивающую компенсацию всех оптических искажений оптических элементов системы, в натуральных условиях. Существующий уровень развития техники позволяет создать

оптоэлектронную систему для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, обеспечивающего относительную погрешность измерения менее 0,021 % от диапазона измерения или 0,5 мм для задачи измерения 3D геометрии лопасти гидротурбины в процессе производства, имеющей линейные размеры 2,5x2x1 м.

Таким образом, проведены промышленные испытания прототипа оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Проведены измерения геометрии лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781) с линейными размерами 2,5x2,0x1,0 м. Проведенные испытания продемонстрировали работоспособность предложенных и использованных методов измерения 3D геометрии на основе многопараметрической триангуляции с использованием пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Показано, что даже при использовании для реализации предложенных в диссертации методов и технических решений простейшей элементной базы, уровень погрешности измерений не превышал величину 1%. Показано, что при использовании более качественного оборудования можно создать оптоэлектронную систему для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе методов многопараметрической триангуляции, обеспечивающего погрешность измерений менее 0,021% от диапазона измерения.

#### **4.4. Промышленные испытания измерителя толщины горячего проката**

Промышленные испытания лазерного толщиномера горячего листового проката проведены на действующем металлургическом предприятии в цехе горячего проката ОАО «Новосибирский металлургический завод

им.Кузьмина» (НМЗ), рис. 4.19. Измерительный комплекс был размещен непосредственно за секцией чистовой прокатки прокатного стана (рис. 4.20).



Рис. 4.19. Размещение измерительного комплекса для измерения толщины горячего проката в цехе горячего проката на прокатном стане ОАО «НМЗ им. Кузьмина».



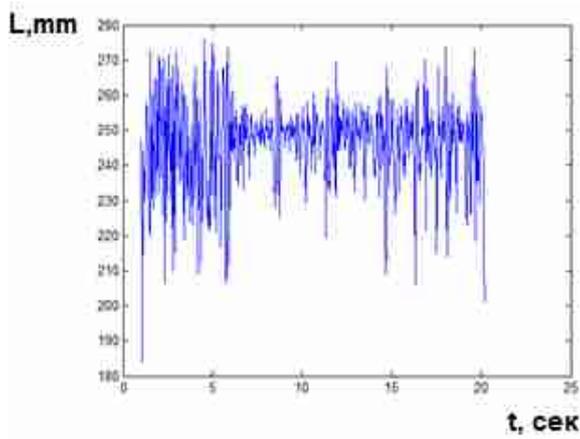
Рис. 4.20. Схема расположения измерителя на прокатном стане.



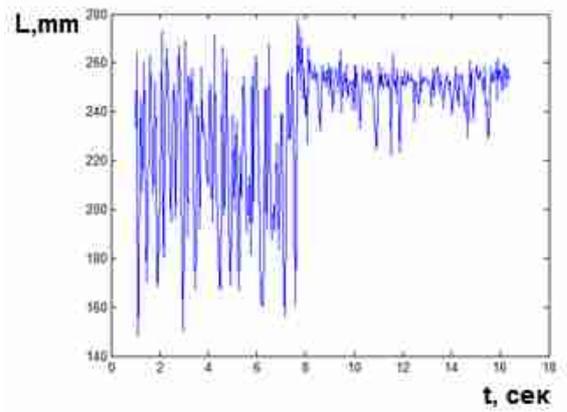
Рис. 4.21. Экспериментальный образец лазерного толщиномера горячего проката на прокатном стане ОАО «НМЗ им. Кузмина» во время проведения промышленных испытаний.

В зависимости от марки стали, требуемой толщины и ширины проката, изменяются параметры технологических процессов горячей катки. Анализ данных, записанных толщиномером, показывает наличие нескольких характерных типов поведений измеряемого листа в зоне измерения.

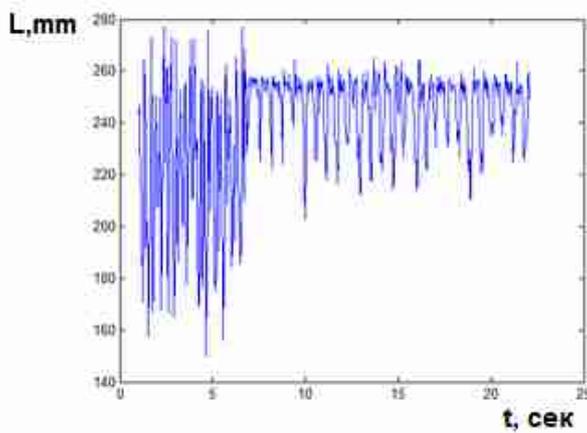
На рис. 4.22 – 4.23 представлены результаты измерения расстояния от верхнего триангулятора до поверхности проката при различных типах прокатываемой стали (различные марки стали, различная толщины и ширина проката). Данные были записаны в период 13.11.12 – 30.11.12.



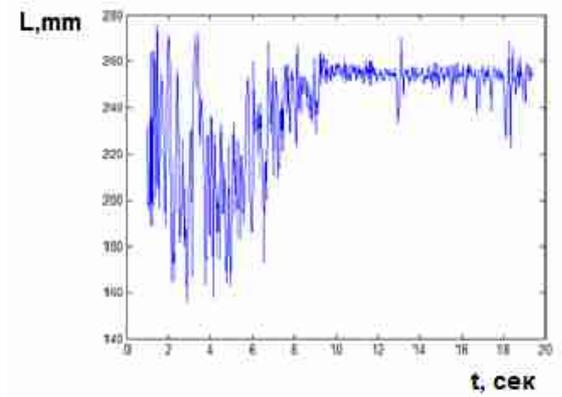
Реализация 1.



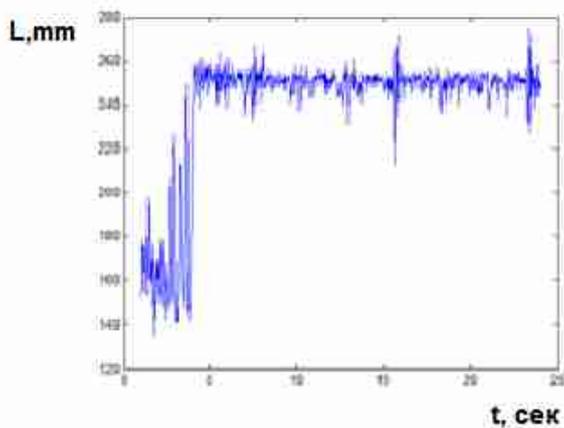
Реализация 2.



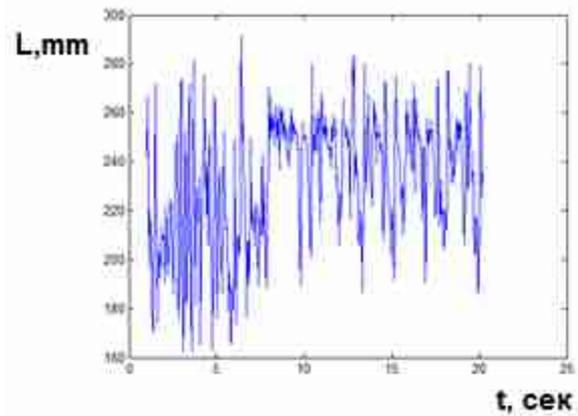
Реализация 3.



Реализация 4.

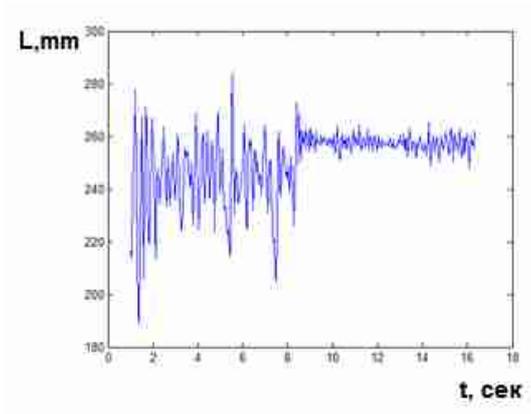


Реализация 5.

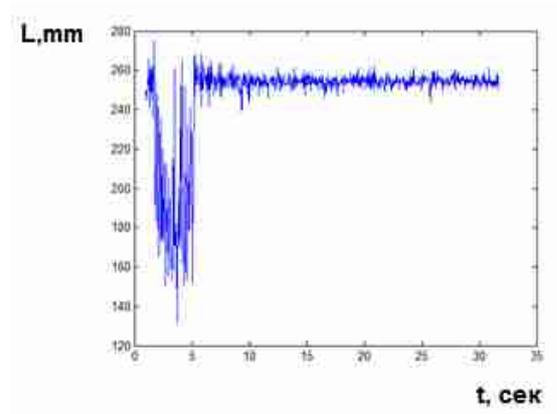


Реализация 6.

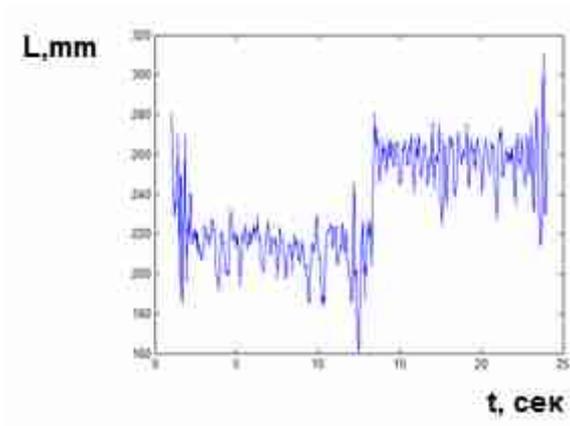
Рис. 4.22. Измеренное расстояние до поверхности горячего проката верхнего триангуляционного модуля для различных листов. Реализации 1 - 6.



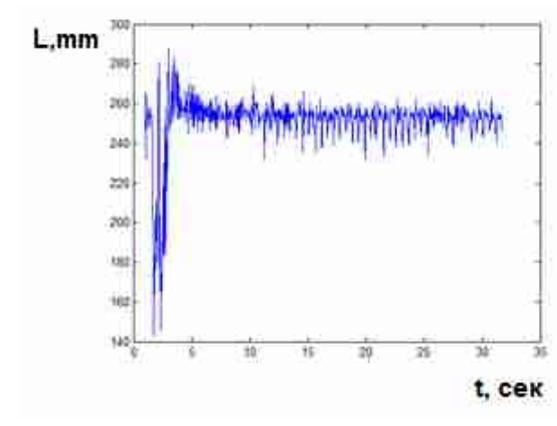
Реализация 7.



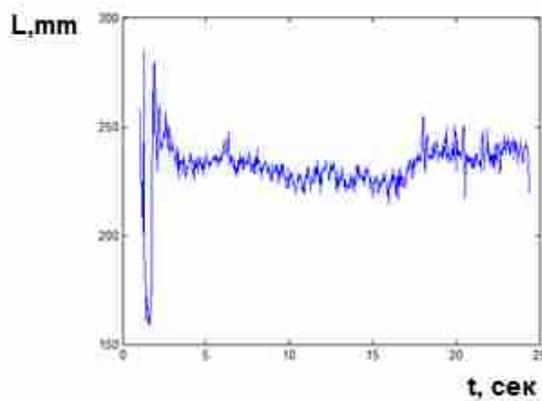
Реализация 8.



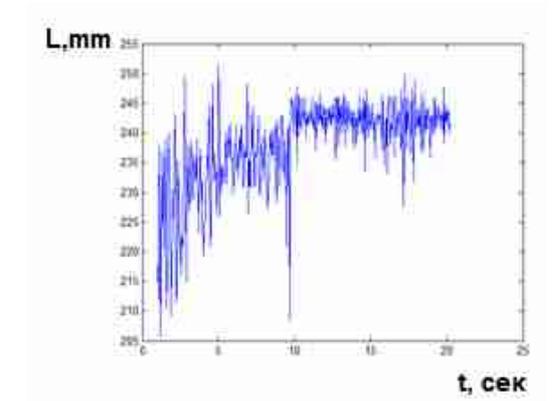
Реализация 9.



Реализация 10.

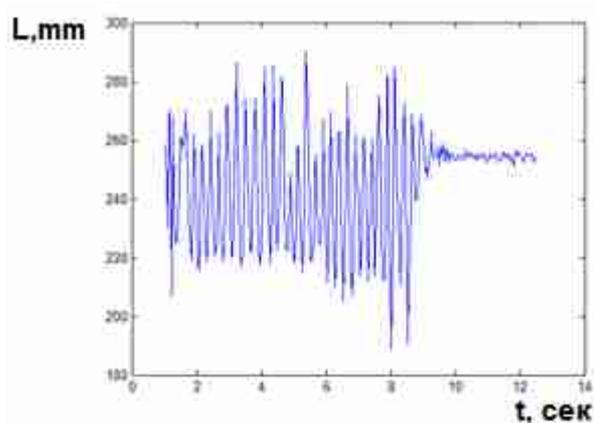


Реализация 11.

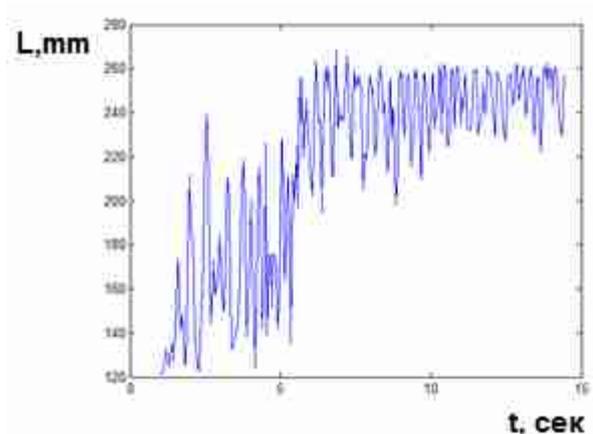


Реализация 12.

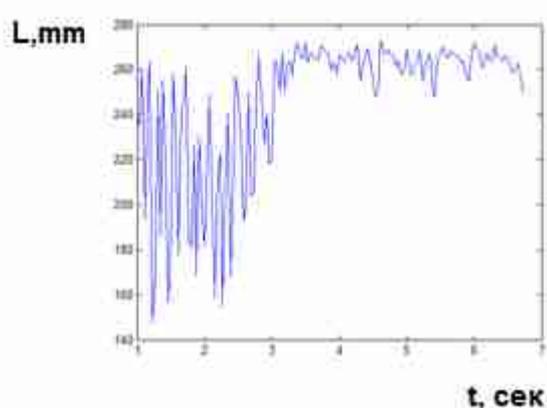
Рис. 4.23. Измеренное расстояние до поверхности горячего проката верхнего триангуляционного модуля для различных листов. Реализации 7 - 12.



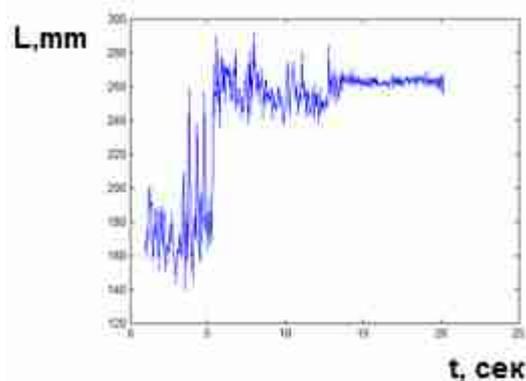
Реализация 13.



Реализация 14.



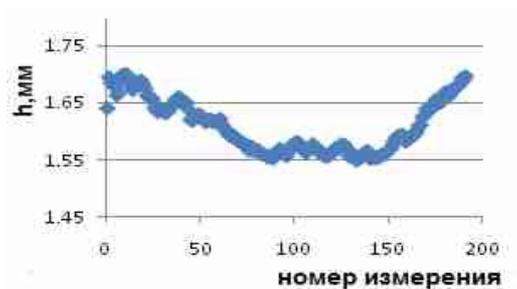
Реализация 15.



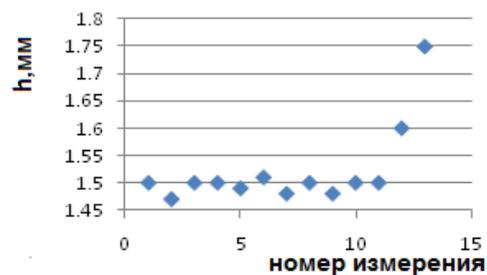
Реализация 16.

Рис. 4.24. Измеренное расстояние до поверхности горячего проката верхнего триангуляционного модуля для различных листов. Реализации 13 - 16.

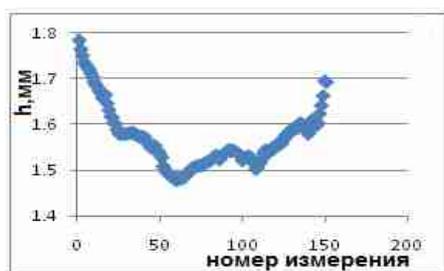
Анализ представленных данных показывает, что характер и структура движения горячего проката очень сильно меняется от технологических условий процесса катки. Полученные экспериментальные результаты убедительно подтвердили необходимость учета пространственного положения и наклона измеряемого листа при измерении его толщины. Это дает существенное преимущество методу синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции перед методами на основе измерения коэффициента ослабления проникающего рентгеновского излучения, не учитывающими пространственный наклон измеряемого объекта.



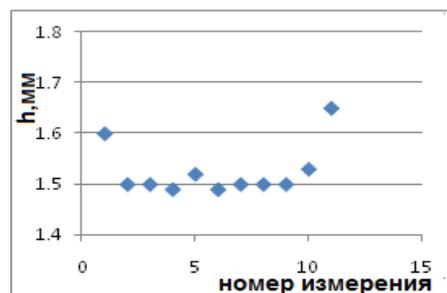
а)



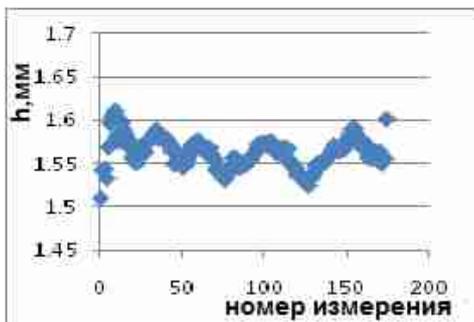
б)



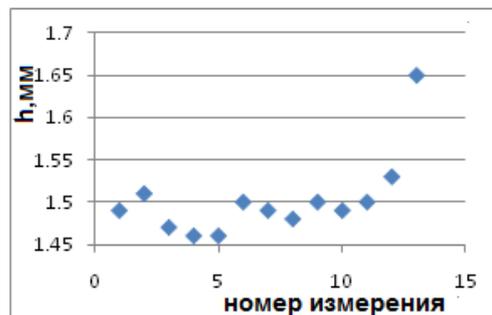
а)



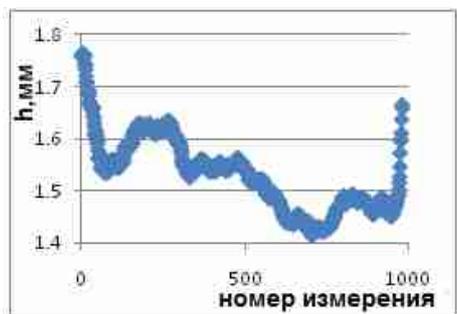
б)



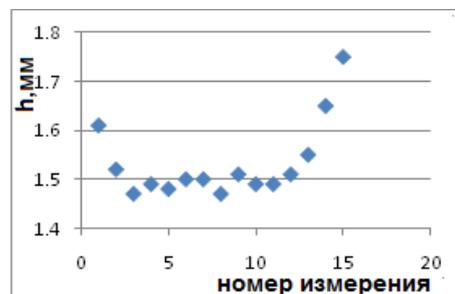
а)



б)



а)



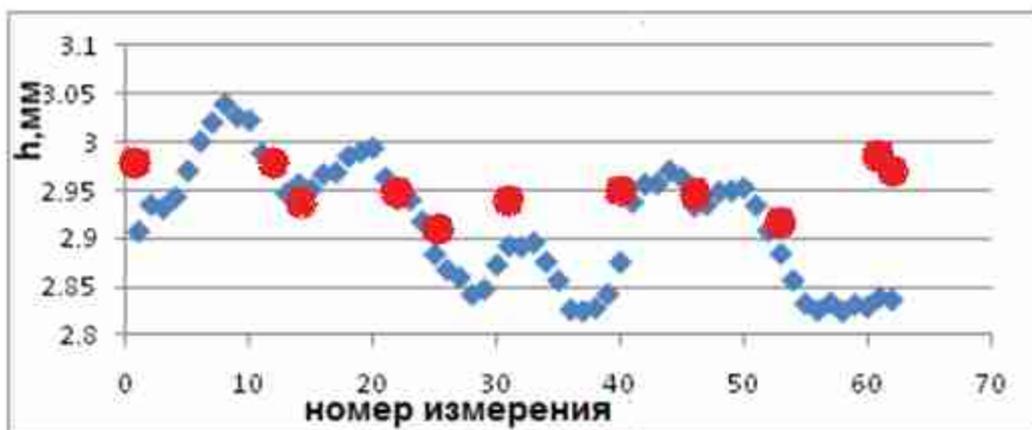
б)

Рис. 4.25. Результаты измерения толщины стальных листов измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (левый столбец) и контактным микрометром (правый столбец).

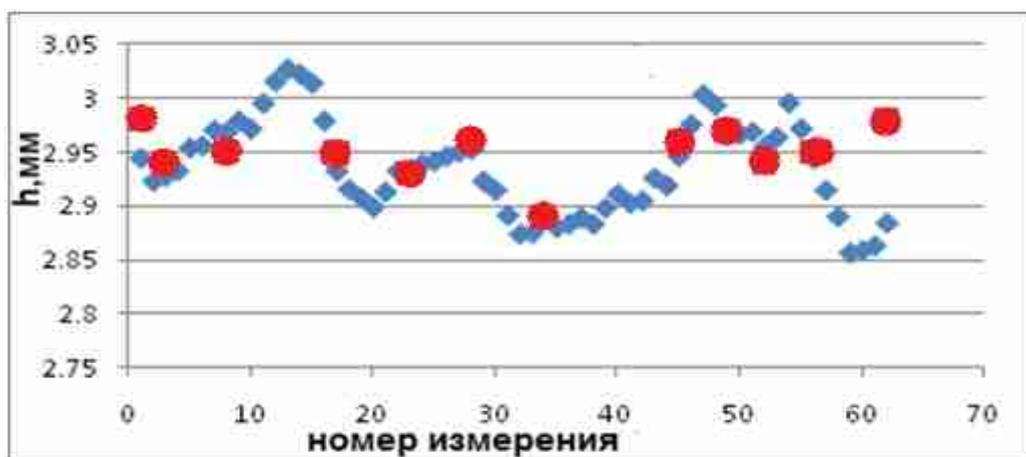
Промышленные испытания измерительного комплекса проводились в течение 6 месяцев опытной эксплуатации. В этот период был проведен полный цикл прямых замеров показаний измерительного комплекса и прямых ручных замеров остывшего листа на последующих этапах металлообработки. Ручные замеры выполнялись поверенным измерительным прибором – микрометром, имеющим погрешность измерения 0,01 мм. При проведении ручных замеров положение точки измерения выбиралось примерно соответствующее области равномерного распределения измеряемых точек по длине листа. Ручные измерения вынужденно выполнялись по краю листа, в то время как толщиномер выполнял измерения в центре листа. В связи с неравномерностью толщины листа в поперечном направлении это давало некоторые дополнительные искажения при сравнении результатов измерений.

На рис. 4.25 представлены результаты измерения толщины стальных листов измерительным комплексом на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции и контактного микрометра. Измерения выполнены в период 01 – 05 июля 2012 года. Марка стали ст3пс, толщина листа 1.5 мм.

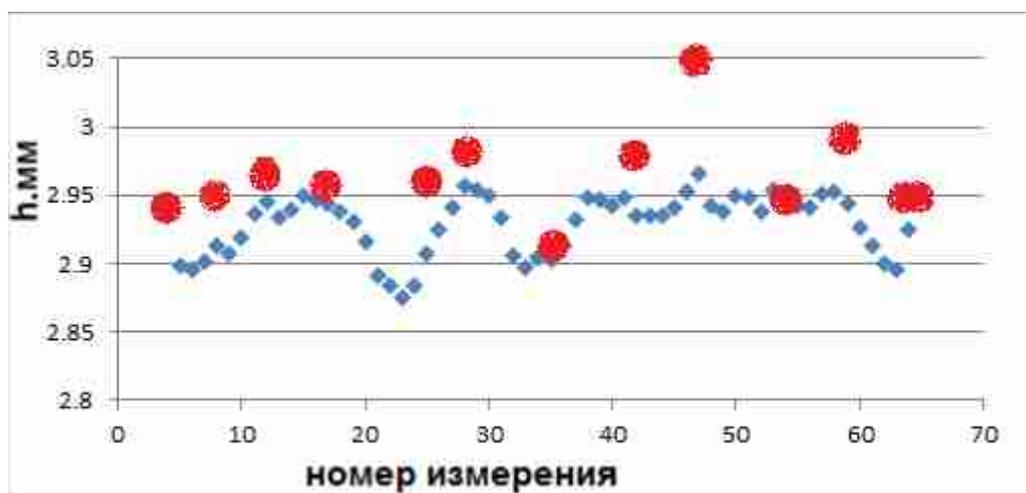
На рис. 4.26 представлены результаты следующих контрольных замеров, которые выполнены в период 18-22 ноября 2012 года. Выполнялись измерения стального листа марки ст3пс, прокатный размер 2.85x579 мм.



а)



б)



в)

Рис. 4.26. Результаты измерения толщины стальных листов измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (квадратные маркеры) и результаты контрольных измерений микрометром (круглые маркеры).

Результаты следующих контрольных замеров представлены на рис. 4.27 – 4.30. Данные испытания отличались измерениями стальных листов различных марок стали и различной толщины. Измерения листов толщиномером на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции выполнены 09 июля 2012 г., контрольные замеры выполнены 11 июля и 08 августа 2012 г. Всего было измерено 13 стальных листов. Контрольные измерения были выполнены на обоих краях листа для оценки неравномерности толщины в поперечном направлении.

На рис. 4.27. – 4.28 представлены результаты контрольных замеров стальных листов № 1 – 4 марки ст3пс, размер 3.3x687 мм. На рис. 4.28. – 4.29 представлены результаты контрольных замеров стальных листов № 5 – 8 марки 30хгса, размером 4x600 мм. На рис. 4.29. – 4.30 представлены результаты контрольных замеров стальных листов № 9 – 13 марки 07х3ГНМЮА, размер 3,5x600 мм.

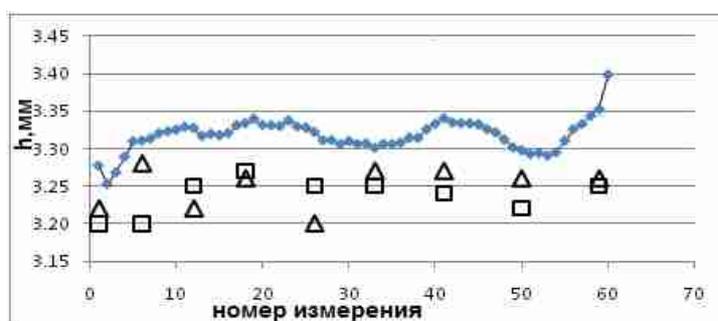
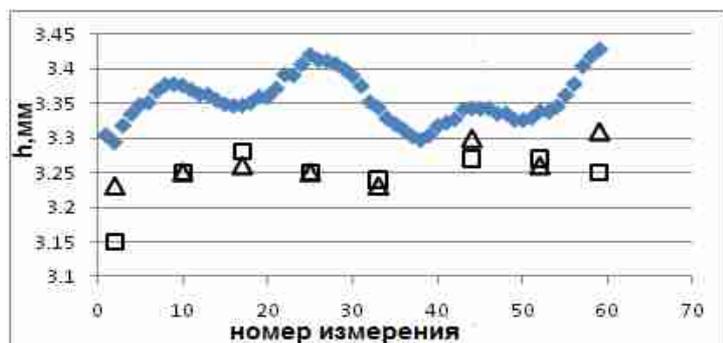
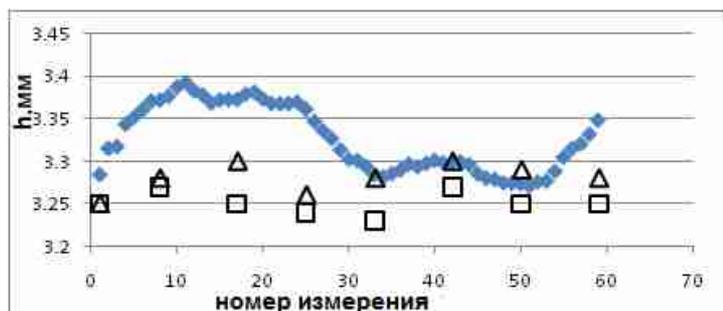


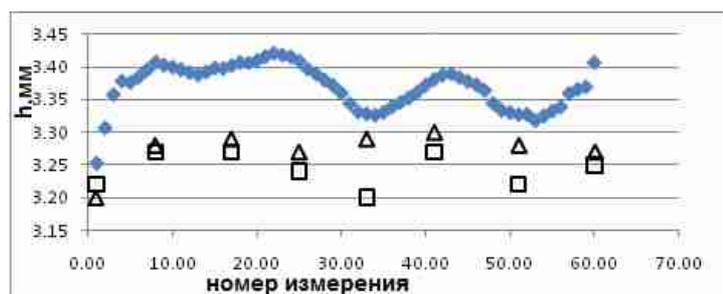
Рис. 4.27. Результаты измерения толщины стального листа №1 измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (синие точки) и результаты контрольных измерений микрометром с левого края (квадратные маркеры) и с правого края (треугольные маркеры).



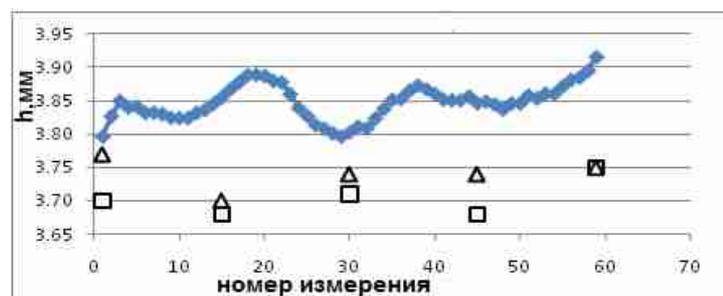
а) Лист №2



б) Лист №3

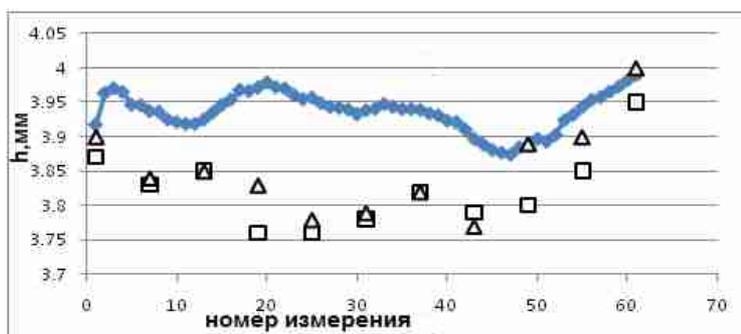


в) Лист №4

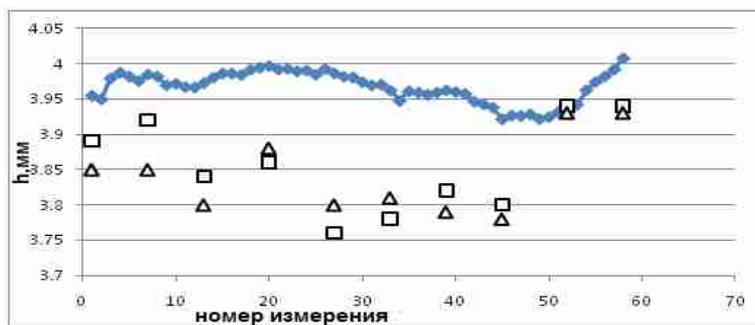


г) Лист №5

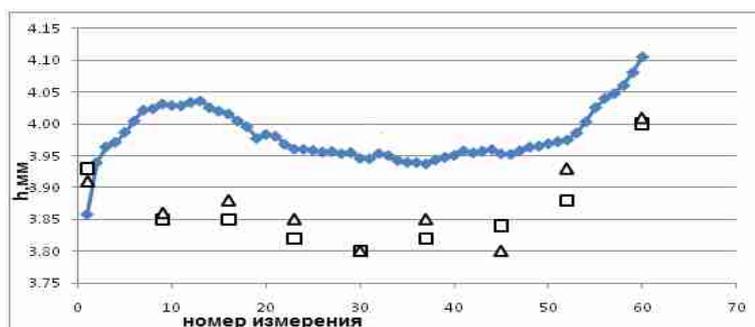
Рис. 4.28. Результаты измерения толщины стальных листов №2 - 5 измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (синие точки) и результаты контрольных измерений микрометром с левого края (квадратные маркеры) и с правого края (треугольные маркеры).



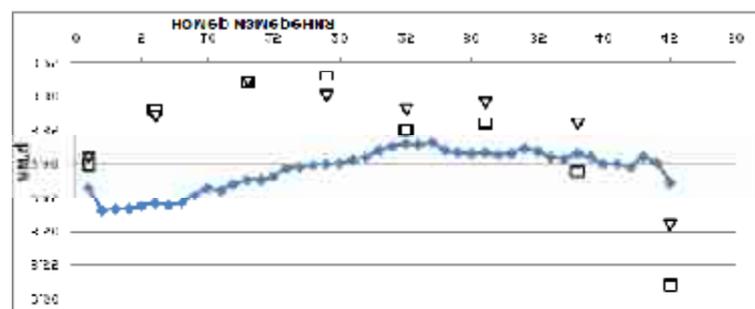
а) Лист №6



б) Лист №7

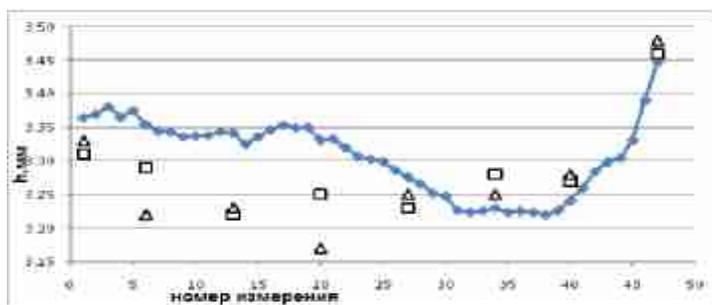


г) Лист №8

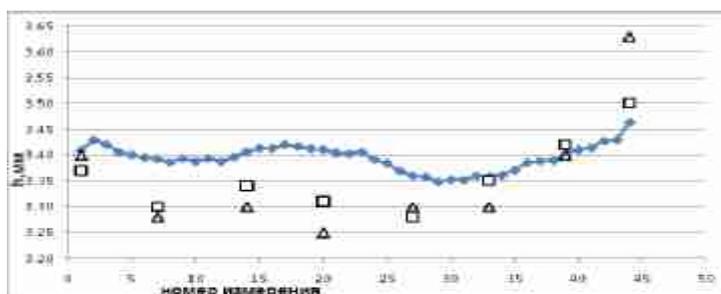


г) Лист №9

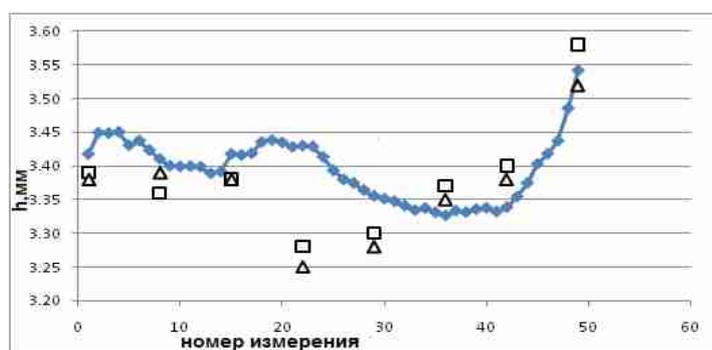
Рис. 4.29. Результаты измерения толщины стальных листов №6 - 9 измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (синие точки) и результаты контрольных измерений микрометром с левого края (квадратные маркеры) и с правого края (треугольные маркеры).



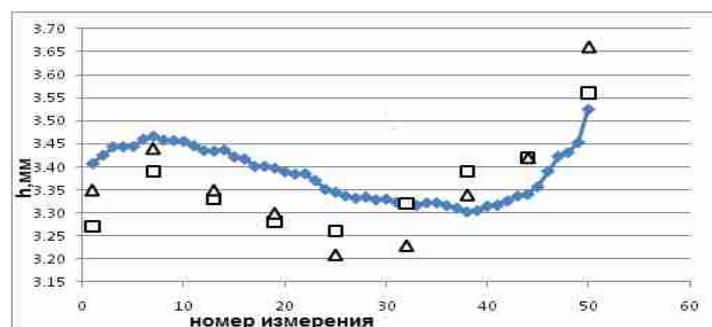
а) Лист №10



б) Лист №11



г) Лист №12



г) Лист №13

Рис. 4.30. Результаты измерения толщины стальных листов №10 - 13 измерителем толщины на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции (синие точки) и результаты контрольных измерений микрометром с левого края (квадратные маркеры) и с правого края (треугольные маркеры).

Анализ результатов проведенного полного цикла испытаний показал, что измерительный комплекс для измерения толщины горячего проката на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции выполняет измерения с медленно изменяющейся систематической погрешностью. Это связано с частыми перемещениями измерительного комплекса, наличия сильных вибраций, неизбежных грубых механических воздействий, связанных с технологическим процессом горячего проката. В результате геометрия измерительного комплекса может быть подвержена малым деформациям, приводящим к систематической погрешности измерителя. Для компенсации малых геометрических деформаций измерителя в состав измерительного комплекса была интегрирована операторская панель, позволяющая оператору стана производить подкалибровку системы, вводя малую линейную поправку показаний измерителя. Эту поправку оператор вводит и может корректировать в течение смены, опираясь на результаты поверочных замеров хвостовой части прокатываемого стального листа непосредственно на участке смотки перед его транспортировкой на склад цеха горячего проката. В результате интеграции операторской панели была практически исключен малый остаточный дрейф систематической погрешности на результаты измерения.

Результаты финальных испытаний измерительного комплекса, по результатам которых он был принят в промышленную эксплуатацию представлены на рис. 4.35 – 4.68. Измерения под протокол выполнялись 09 апреля 2013 года. Толщина проката, на которую был настроен прокатный стан, составляла 2.85 мм, марка стали 2кп.

На рис. 4.31 представлены графики Z1 и Z2, показывающие расстояние до поверхности проката, измеренные верхним и нижним лазерными облачными триангуляторами. Время измерения составляло около 20 секунд. Видно, что первые 7 секунд прокат существенно колеблется в измерительной области с большой амплитудой. Связано это с тем, что прокат при выходе из чистовой группы клетей прокатного стана зажат только валами чистовой

группы. Далее прокат поступает на участок смотки, где фиксируется направляющими валами, которые зажимают прокат и не дают ему сильно колебаться.

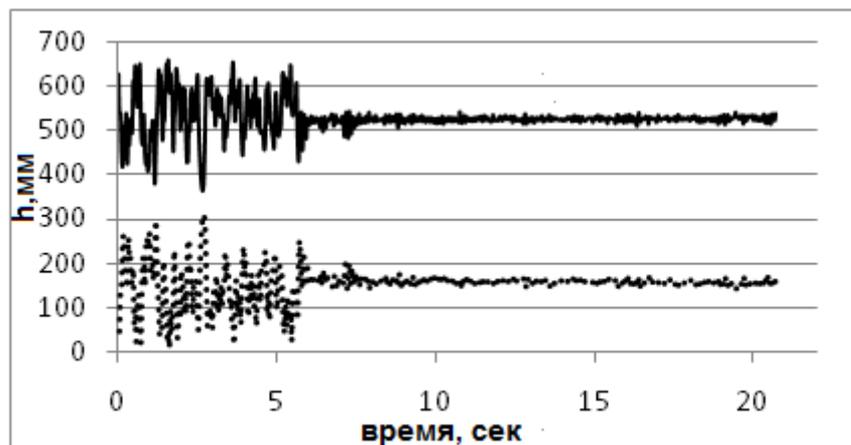


Рис. 4.31. Показания лазерных облачных триангуляторов при измерении толщины горячего проката (сплошная линия – верхний триангулятор, пунктирная линия – нижний).

На рис. 4.32 показан измеренный профиль толщины и результаты контрольных замеров, выполненных на последующих этапах обработки листа. График демонстрирует, что отклонения толщины проката не превышают 0.15 мм от эталонной толщины и практически по всему листу проката толщина лежит в отрицательном допуске. Такой режим проката наиболее предпочтителен для металлургической промышленности, поскольку позволяет экономить металл и делает производство экономически выгодным.

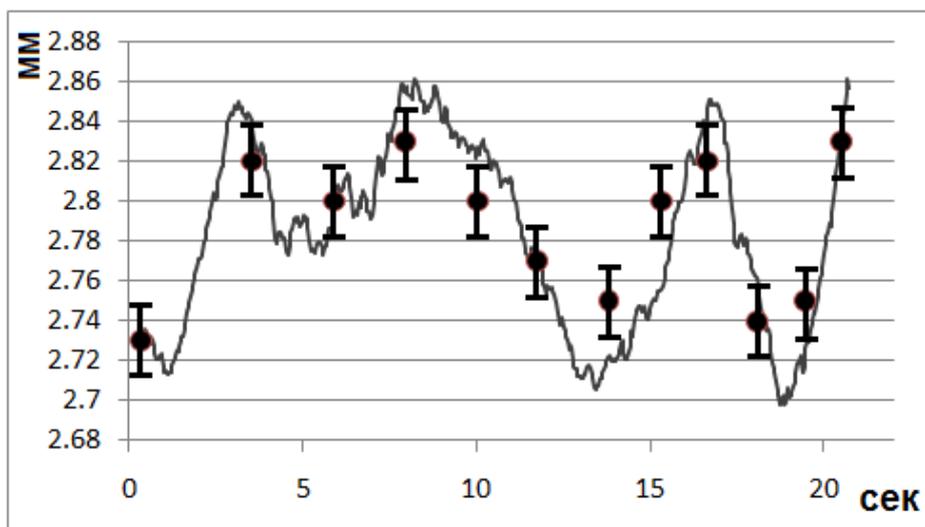


Рис. 4.32. Измеренная толщина проката (сплошная линия) и контрольные замеры толщины в различных точках (круглые маркеры).

На рис. 4.33 представлен график траектории движения горячего проката в зоне измерения толщины и его измеренная толщина. Зеленый цвет графика сигнализирует, что измеренная толщина совпадает с эталонной; синий цвет показывает, что измеренная толщина меньше эталонной; красный – измеренная толщина больше эталонной.

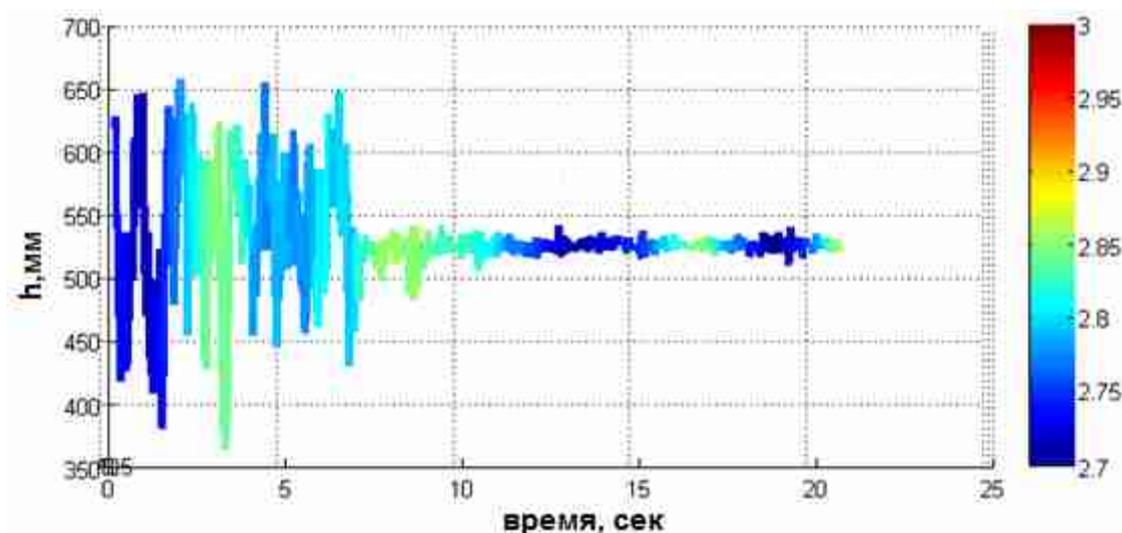


Рис.4.33. Траектория движения горячего проката в зоне измерения толщины и его измеренная толщина (указана цветом).

Проведенные промышленные испытания лазерного толщиномера позволили экспериментально оценить погрешность измерения толщины проката методом дифференциальной облачной триангуляции в реальных рабочих условиях. Установлено, что погрешность измеренной толщины не превышает 20 мкм, что соответствует относительной погрешности  $10^{-5}$  относительно измерительной базы комплекса (расстояние между верхним и нижним триангулятором).

В процессе проведенных промышленных испытаний измерительный комплекс длительное время (полгода) работал в цехе горячего проката в непрерывном режиме и сохранял результаты измерения в специализированную базу данных. На рис.4.34 показано программное обеспечение для работы в архивом результатов измерений. На рис. 4.35 показана динамика измеренной толщины за ночную смену 10-11.03.2013. График демонстрирует, что было выполнена прокатка стальных листов различной толщины в диапазоне 1,5 – 5 мм. Измерительный комплекс успешно выполнил измерения всех размеров прокатываемых горячих стальных листов.

На рис.4.36 показана динамика измеренной толщины от времени в период 01 – 28 февраля 2013 года. На рис. 4.37. представлены гистограмма распределения толщины прокатываемой стали в период 01 – 28 февраля 2013 года. Гистограмма демонстрирует наиболее востребованный диапазон толщин, которые прокатывают в цехе ОАО «новосибирский металлургический завод им. Кузьмина». Общий диапазон толщин прокатываемой стали составил 1,5 – 6 мм.

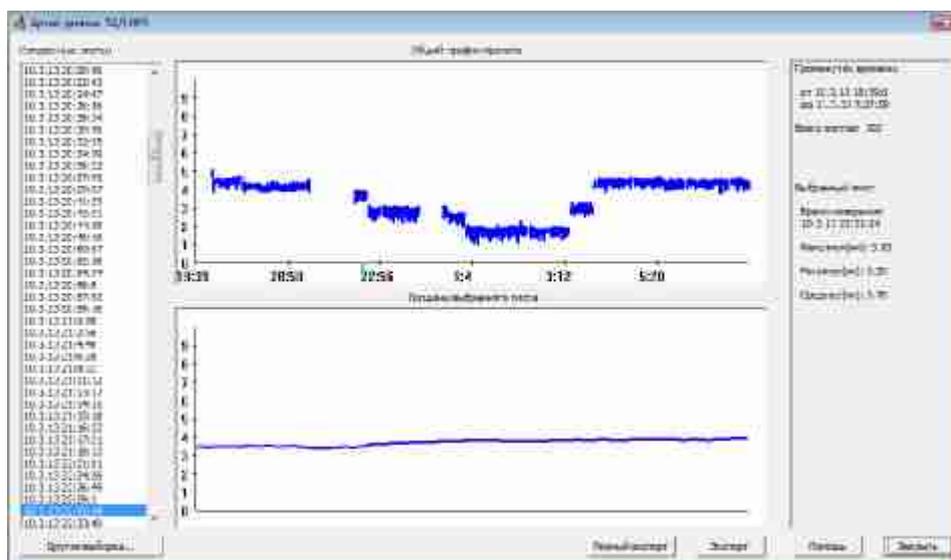


Рис. 4.34. Архив результатов измерений измерителя толщины горячего проката на основе синхронной лазерной дифференциальной облачной триангуляции.

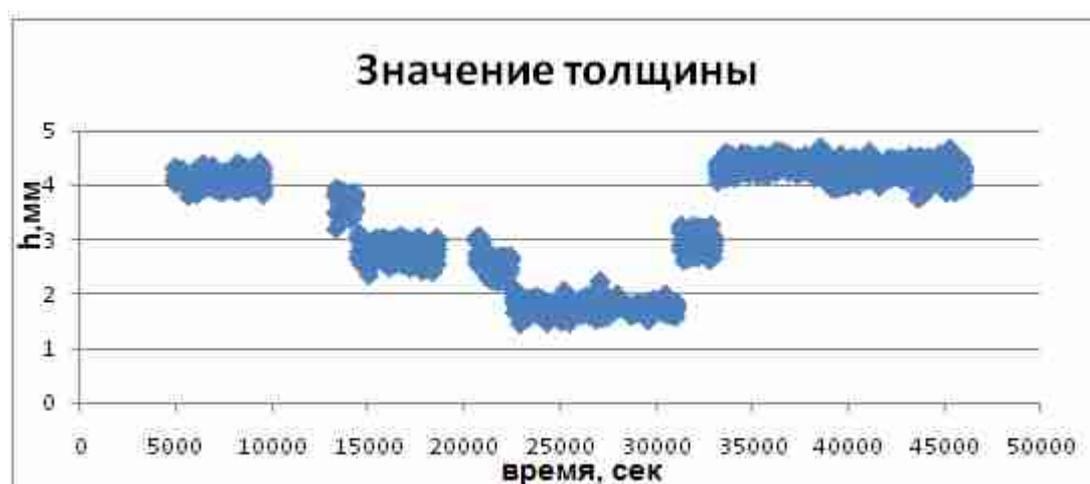


Рис. 4.35. Результат измерения толщины измерительным комплексом на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции за ночную смену 10-11.03.2013.

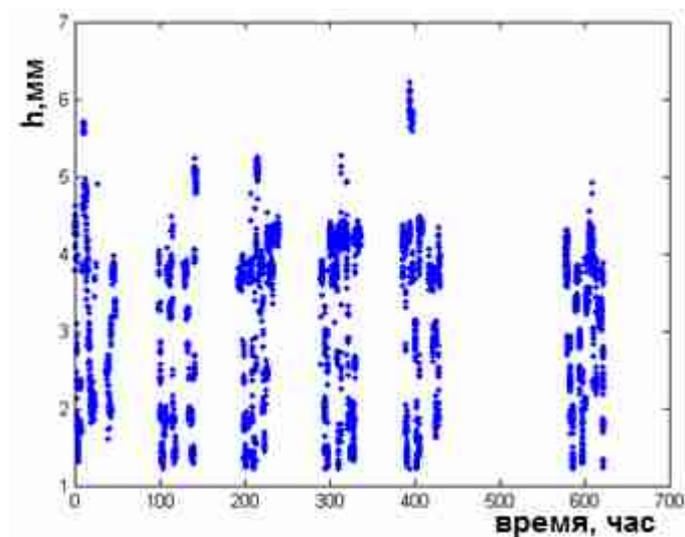


Рис. 4.36. Измеренная толщина измерительным комплексом на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции за период 01.02.2013-28.02.2013.

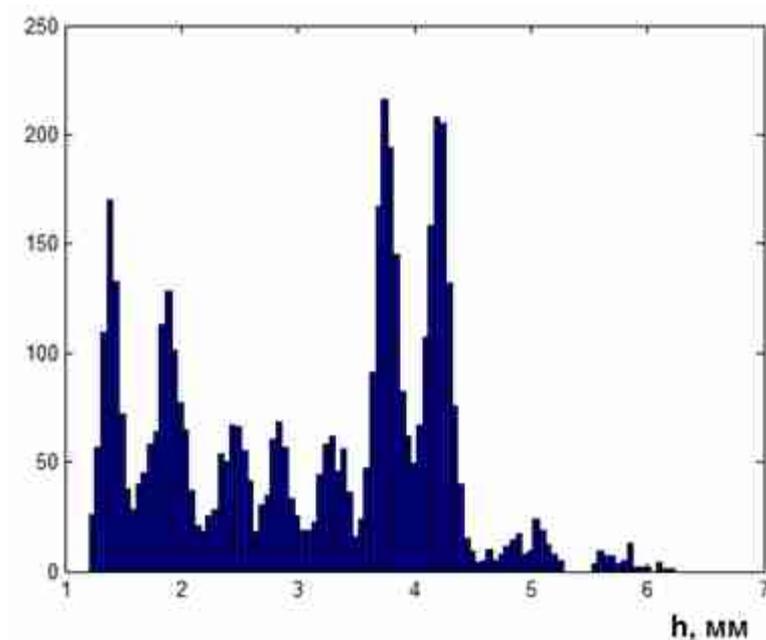


Рис. 4.37. Распределение измеренной толщины измерительным комплексом на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции за период 01.02.2013-28.02.2013.

По итогам конкурса на лучшую отечественную разработку в области лазерной аппаратуры и лазерно-оптических технологий Лазерной ассоциации РФ (ЛАС) работа "Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс для измерения геометрических параметров горячего и холодного

проката ЛАД-ОР 3" была удостоена звания "Лауреат конкурса ЛАС 2013 года" в номинации "Лазерное оборудование и технологии для технических измерений, диагностики и контроля процессов".

Проведенные промышленные испытания измерительного комплекса для измерения толщины горячего проката на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции убедительно подтвердили работоспособность и эффективность предложенных научных идей, методов и их практических реализаций. Полученными в результате длительной работы в непрерывном режиме в горячем металлургическом цехе научными и практическими результатами доказаны стабильность и достоверность измерений, а также перспективность дальнейшего развития методов многопараметрической триангуляции для высокоточных измерений геометрических параметров в условиях фазово-неоднородной среды.

#### **Выводы по главе 4**

- Впервые проведены промышленные испытания систем измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов на основе структурированного освещения в условиях действующего предприятия тяжелого машиностроения.
- Выполнены измерения лопасти гидротурбины со сложной светорассеивающей структурой предложенными оптическими триангуляционными методами на основе структурированного освещения в условиях фазово-неоднородных сред.
- Впервые проведены промышленные испытания системы измерения толщины динамических объектов на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции в условиях действующего горячего металлургического производства.
- Впервые создан измеритель толщины горячего проката, отличающийся абсолютной радиационной безопасностью, инвариантностью результатов измерения к химическому составу измеряемой стали и компенсацией пространственного наклона объекта при измерении толщины.
- Измерительный комплекс по результатам полугодичных промышленных испытаний принят в промышленную эксплуатацию и работает в непрерывном режиме в цехе горячего проката ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина» более 3 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Предложены и реализованы новые комплексные методы многопараметрической триангуляции на основе модуляции оптического источника и многомерного регрессионного анализа пространственного и временного ансамблей экспериментальных данных, обеспечившие измерение геометрических параметров статичных и динамичных объектов в фазово-неоднородных средах с рекордно малой погрешностью.
- Разработаны и реализованы комплексные методы калибровки сверхточных оптико-электронных триангуляционных измерителей геометрических параметров, основанные на многопараметрическом регрессионном анализе калибровочных данных, устойчивые к искажениям фазово-неоднородной среды, работоспособные как в лабораториях, так и в реальных производственных условиях.
- Разработаны программно-аппаратные интерфейсы и программное обеспечение оптико-лазерных промышленных диагностических систем, реализующие методы многопараметрической триангуляции, обеспечивающие формирование баз данных с технологической и учетной информацией о контролируемых геометрических параметрах.
- На основе проведенных исследований впервые создан ряд аппаратно-программных информационных диагностических систем и комплексов, реализующих методы многопараметрической триангуляции, адаптированных к характеристикам фазово-неоднородных сред, оптимально приспособленных к реальным условиям отечественного производства, успешно прошедших промышленные испытания и внедренных на металлургических и машиностроительных предприятиях России.

В диссертации поставлена, обоснована и решена крупная научно-техническая проблема разработки и реализации триангуляционных методов измерений геометрических параметров статичных и динамичных объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах, а также создания программно-аппаратных комплексных измерительных систем, ориентированных на применение в научных экспериментах и в промышленных технологиях, обладающих расширенными функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками. Внедрение новых научно обоснованных технических решений, изложенных в диссертации, способно внести значительный вклад в развитие отечественного приборостроения, машиностроения,

гидротурбостроения и металлургии, существенно повысив эффективность и безопасность технологических процессов.

Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на следующих научных мероприятиях: International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (Beijing, 2015), Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Ульяновск, 2015), Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные проблемы науки» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки» (Стерлитамак, 2015), Международная научно-практической конференция «Современное состояние и перспективы развития технических наук» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция “Фундаментальные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности” (Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2014), Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития науки» ( Уфа, 2014), Международная научно-практическая конференция «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (Новотроицк, 2014), Всероссийская научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2013), Международная научная конференция «Информационные технологии XXI века» (Хабаровск, 2013), Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2013), International topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application (Italy, 2011), Международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках” (Новосибирск, 2011), Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва (2003, 2007), Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии» (Новосибирск, 2007), Всероссийская конференция молодых ученых «Физика - космосу» (Байконур, 2014), Всероссийская школа-конференция с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014), Международная молодежная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2012), Международная молодёжная конференция «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения»

(Томск, 2012), Всероссийская молодежная научная конференция «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2012), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.» (Новосибирск, 2008), Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2004, 2006, 2007), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Новосибирск, 2006), Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений» (Новосибирск, 2006).

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность своим товарищам и коллегам по развитию и внедрению методов лазерной многопараметрической триангуляции динамических объектов в фазово-неоднородных средах: научному консультанту, главному научному сотруднику ИТ СО РАН, д.т.н. Меледину В.Г., за поддержку и внимание при выполнении настоящей работы; д.т.н. Наумову И.В., к.т.н. Бакакину Г.В., к.т.н. Рахманову В.В., Главному В.В., оказавшим существенную помощь в оформлении материала; к.т.н. Аникину Ю.А., к.т.н. Кабардину И.К., к.т.н. Кротову С.В., Куликову Д.В., Павлову В.А., Романову Н.А. за полезные обсуждения в начале работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Meledin V. Informatics of Optoelectronic Measurements: Science and Innovative Industrial Technologies // Journal of Engineering Thermophysics, 2009, Vol.18(2). – P.99-128.
2. Этингоф М. И. Оптоэлектронные приборы для линейных измерений // Метрология, 2013, № 6. - С. 3–8.
3. Kabardin I., Meledin V., Dvoynishnikov S. The investigation of hydraulic jump disruption in liquid film flow on a surface of a rotating disk // 6-th international topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application, books of abstracts. Italy, 2011.- P. 98.
4. Кабардин И.К., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Елисеев И.А., Двойнишников С.В. Оптический метод измерения мгновенного поля толщины пленки жидкости на основе полного внутреннего отражения // Теплофизика и аэромеханика, 2012, том 19. - С. 89-95.
5. Naumov I.V., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Tsoy M.A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections // Physics of Fluids, 2015, Vol.27(12). - P.124103.
6. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В. Исследование структуры вихревого течения в топочной камере нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Известия Томского политехнического университета, 2013, Т. 322, № 4. – С. 31-35.
7. Меледин В.Г., Кротов С.В., Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Наумов И.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования, 2013, № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8812](http://www.science-education.ru/108-8812)
8. Двойнишников С.В. Разработка методов оптического контроля 3D геометрии паровых турбин для повышения качества энергоэффективного теплоэнергетического оборудования //

- Теплофизические основы энергетических технологий: сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции / под ред. Г.В. Кузнецова, А.С. Заборина, К.В. Бувакова; Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. - С. 335-339.
9. Куликов Д.В., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Павлов В.А., Чубов А.С., Прибатурин Н.А. Метод лазерной диагностики динамической формы вращающихся объектов // Современные проблемы науки и образования, 2013, № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8793](http://www.science-education.ru/108-8793)
  10. Кабардин И.К., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Наумов И.В., Елисеев И.А., Рахманов В.В. Оптический способ измерения мгновенного поля толщины прозрачной пленки // Патент РФ на изобретение № 2506537, приоритет 30.01.2012, опубликовано 10.02.2014.
  11. Dvoynishnikov S. Development methods of steam turbines 3D geometry optical control for effective heat power equipment quality improvement // Thermophysical Basis of Energy Technologies, European Physics Journal, Vol.76, 2014. – P.1003-4.
  12. Рахманов В.В., Кабардин И.К., Двойнишников С.В. Синхронная визуализация волнового пленочного течения на вращающемся диске // Международный научно-исследовательский журнал №11 (42), Часть 2, Декабрь. – С.89-91.
  13. Чубов А.С., Меледин В.Г., Кунин И.С., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Павлов В.А., Рахманов В.В. Неинвазивный способ лазерной нанодиагностики онкологических заболеваний // Патент РФ на изобретение № 2542427, приоритет 12.03.2013, опубликовано 20.02.2015.
  14. Поташников А.К., Голубев И.В., Куликов Р.В., Сысоев Е.В., Чугуй Ю.В. Оптоэлектронный микрометрический датчик с

- микропроцессором // Оптический журнал, 2007, Т. 74, № 12. – С. 50-54.
15. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Куликов Р.В.. Оптический метод обнаружения механических дефектов на поверхностях высокого класса чистоты // Автометрия, 2007, Т.43, № 5. – С. 111-116.
  16. Оптико-электронная система для измерения поверхностных дефектов "ПРОФИЛЬ" // URL: [www.tdisie.nsc.ru/Rus/profil\\_rus.html](http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/profil_rus.html)
  17. Интерференционный микроскоп-нанопрофилометр МНП [Электронный ресурс] // [http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/nano\\_rus.html](http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/nano_rus.html)
  18. Куликов Д.В., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г., Наумов И.В., Кротов С.В., Главный В.Г., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Павлов В.А., Шпольвинд К.В., Кабардин И.К., Чубов А.С. Лазерное устройство для измерения воздушного зазора электрической машины // Патент РФ №2469264, приоритет 08.07.2011, опубликовано 10.12.2012.
  19. Gagnon E., Rivest J.-F. Laser range imaging using the self-mixing effect in a laser diode / // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, V.48. – P. 693–699.
  20. Ставров А.А., Поздняков М. Г. Рефракционные параметры атмосферы и их влияние на точностные характеристики лазерных дальномеров // Минск: БГУ, 2003. – 56 с.
  21. Двойнишников С.В. Влияние фазовых неоднородностей среды на погрешность лазерных триангуляционных методов // Фундаментальные и прикладные проблемы физики / под общ. ред. В. К. Свешникова; Мордов. гос. пед. ин-т, Саранск, 2013.– С. 37-41.
  22. Байбаков А.Н., Гуренко В.М., Плотников С.В., Сотников В.В. Применение триангуляционного метода измерения для промышленного контроля геометрических параметров динамических объектов // Датчики и системы, 2004, № 6, - С. 38 – 41.

23. Сотников В.В. Обработка сигналов в лазерных триангуляционных измерителях геометрических параметров движущихся объектов // Автометрия, 2009, т. 45, № 6, - С. 52 – 60.
24. Байбаков А.Н., Гуренко В.М., Патерикин В.И., Юношев С.П., Плотников С.В., Сотников В.В., Чугуй Ю.В. Автоматический контроль колесных пар на ходу поезда // Автометрия, 2004, т. 40, № 5, С. 94 – 103.
25. Байбаков А.Н., Кучинский К.И., Патерикин В.И., Плотников С.В., Сотников В.В. Опыт разработки и эксплуатации лазерных автоматизированных диагностических комплексов для бесконтактного контроля параметров колес грузовых вагонов // Измерительная техника, 2010, №4, - С. 61 – 64.
26. Демкин В.Н., Степанов В.А. Измерение профиля шероховатости материалов триангуляционным способом // Метрология, 2008, № 6. – С. 60–65.
27. Демкин В.Н., Степанов В.А. Возможности триангуляционного лазерного метода измерения поверхности сложного рельефа // Метрология, 2007, № 8.– С. 32–35.
28. Кеткович А.А., Чичигин Б.А. Лазерный профилометр объектов сложной формы // Фотоника, 2009, № 3. – С. 30 – 33.
29. Гришанов А.В., Гришанов В.Н., Многокомпонентный лазерный измеритель виброперемещений // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 19-й международ. конф. СПб.: СПбГПУ, 2009. – С. 400 -410.
30. Гришанов, А. В., Гришанов В.Н. Крестообразная структура сечения лазерного пучка для измерения дальности и ориентации изделий // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 20-й международ. конф., Т.1, СПб.: СПбГПУ, 2010. – С. 120 - 131.
31. Вертопрахов, В. В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений // Автометрия, 1995, № 6. - С. 64 - 68.

32. Минаев В.Л., Лошилов К.Е. Влияние эффекта изменения фазы отражённой волны на измерения формы поверхности в оптической профилометрии // Измерительная техника, 2010, № 7. – С. 36 – 38.
33. Лозин К.Р., Пахомов А.А. Обработка короткой серии изображений, искаженных турбулентной атмосферой Земли // Радиотехника и электроника, 1994, V.39, № 11. - С. 1751- 1755.
34. Пахомов А.А. Быстрая обработка короткой серии искаженных атмосферой изображений // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, № 10. - С. 56 – 59.
35. Дудоров В.В., Колосов В.В. Исследование распространения оптического излучения в сильно поглощающих неоднородных средах методом дифракционных лучей // Оптика атмосферы и океана, 1997, т.10, № 12. - С.1561-1567.
36. Дудоров В.В., Колосов В.В. Метод расчета характеристик частично когерентного излучения в турбулентной среде с регулярной рефракцией // Квантовая электроника, 2003, Т.33, № 11. - С. 1029-1034.
37. Потатуркин О.И., Чубаков А.И., Яковлев А.В. Применение совмещенных фотоприемников для дистанционной диагностики высокотемпературных процессов // Автометрия, 2000, № 6. - С. 88-93.
38. Михляев С.В. Способ измерения уровня расплава и диаметра кристалла в ростовой установке // Патент РФ №22633165, приоритет 22.03.2004, опубликовано 27.10.2005.
39. Пахомов А.А. Цифровая обработка малоконтрастных изображений, искаженных турбулентным слоем // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, 2009
40. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004.- С. 6-30.
41. Schmitt J.M., Knütel A. Model of optical coherence tomography of heterogeneous tissue // J. Opt. Soc. Am. A., 1997, V.14. - P. 1231-1242.

42. Haberland U.H., Blazek P.V., Schmitt H.J. Chirp optical coherence tomography of layered scattering media // *J. Biomed. Opt.*, 1998, V.3. - P. 259-266.
43. Arecchi T., Bellini M., Corsi C., Fontana R., Materazzi M., Pezzati L., Tortora A. Optical coherence tomography for painting diagnostics: a novel application // *Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision. St. Petersburg, Russia, 18- 21 October 2004.* - P. 225-230.
44. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику // М.: Наука, Гл. ред. физ-мат оитературы,1981. – 640 с.
45. Гудмен Дж. Статистическая оптика // М.: Мир, 1988. – 528 с.
46. Бакут П.А., Мандросов В.И., Матвеев И.Н., Устинов Н.Д. Теория когерентных изображений // М.: Радио и связь, 1987. – 267 с.
47. Jarry G., Steimer E., Damaschini V., Jurczak M., Kaiser R. Coherent components of forward light propagation through scattering media // *J. Opt.*, 1997, V.28. - P. 83-89.
48. Cheng C.C., Raymer M.G. Propagation of transverse optical coherence in random multiple-scattering media // *Phys. Rev. A.*, 2000, V.62. - P. 1-12.
49. Гуров И.П. Формирование и анализ стохастических интерференционных полей // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГИТМО, 2000.* - С. 67-87.
50. Лопатин В.Н., Приезжев А.В., Апонасенко А.Д. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред // М.: Физматлит, 2004. – 384 с.
51. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая электродинамика // М.: Наука, 1989. – 723 с.
52. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Том 2 // М.: Мир, 1981. – 322 с.

53. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям // М.: Мир, 1968. – 382 с.
54. Dashen R. Path integrals for waves in random media // J. Math. Phys., 1979, V.20, №3. - P. 894-920.
55. Wu T., Blazek V., Schmitt H.J. Modeling and visualization of photon migration in tissue by Monte Carlo simulation // Photon migration, diffusion spectroscopy, and optical coherence tomography: imaging and functional assessment / S. Andersson-Engels, J.G. Fujimoto, eds. / Proc. SPIE, 2000, V.4160. - P. 177-184.
56. Михляев С.В. Триангуляционное зондирование нестационарной поверхности // Автометрия, 2001, №1. - С. 67-74.
57. Clifford S.F., Strohbehn J.W. Polarization and angle-of-arrival fluctuations for a plane wave propagated through a turbulent medium // IEEE Transact. Antennas Propagation, 1967, v. 15. - p.416-421.
58. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. // М.:Мир, 1970.- 364 с.
59. Dvoynishnikov S., Rakhmanov V. Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations // European Physics Journal, № 82, 2015. - P. 01035-3.
60. Malacara, D., Servin M., Malacara Z. Interferogram Analysis for Optical Testing // Taylor & Francis Group, 2005. - 546 p.
61. Коронкевич, В.П. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы // Компьютерная оптика, 2010, Т. 34, №1. — С. 4-23.
62. Павлов А.А., Голубев М.П., Павлов А.А.Регистрация интерферограмм с формированием опорного пучка от независимого источника света // Вестник Новосибирского Государственного Университета, 2011, Т.6, №3. – С.83-96.
63. Hariharan, P. Basics of interferometry // Elsevier Inc., 2007. - 249 p.
64. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР, 2003, Т.1, №2. - С. 59-65.

65. Бойченко В.Д., Кравченко Н.И. Лазерный фазовый дальномер // Патент SU 1462104, приоритет 26.01.1987, опубликовано 28.02.1989.
66. Берников Б.О., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Федоров С.В. Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальномерх // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение, 2012, №8. – С.131-141.
67. Gagnon E., Rivest J.-F. Laser range imaging using the self-mixing effect in a laser diode / // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, V. 48. – P. 693–699.
68. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой // Электрические станции, 2010, №7. - С. 39-43.
69. Nosler J.C. Electro-optical distance-measuring system // US Patent № 4248532, priority 26.12.1978, published 03.02.1981.
70. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В., Менделеев В.Я. Экспериментальный анализ погрешности измерения триангуляционного метода в задачах технологического контроля профиля поверхности сложной формы // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 9; URL:[engjournal.ru/catalog/pribor/optica/912.html](http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/912.html)
71. Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А. Наземное лазерное сканирование // Монография, Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
72. Dark J., Tmcco E. Polarization-based peak detection in laser triangulation range sensors // Proceedings of SPIE, 1996, Vol.2599. - P.81-92.
73. Svetkoff D.J., Doss B.L. Method and system for high-speed, high-resolution, 3-D imaging of an object at a vision station // US Patent №5024529, priority 29.01.1988, published 18.06.1991.
74. K.G. Harding Filter for laser gaging system // US Patent №5815272, priority 23.10.1996, published 29.09.1998.

75. Венедиктов А.З. Лазерный триангуляционный измеритель // Патент РФ №45520, приоритет 27.12.2004, опубликовано 10.05.2005.
76. Кучин А.А., Обрадович К.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности // М.: Машиностроение, 1981. – 198 с.
77. Веретенников Е.В., Манаков А.Л., Услугин Н.Ф., Шишарин А.В. Применение оптического профилометра для задач сравнения похожих объектов / Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского: Серия Радиофизика, 2004, Вып. 2. - С. 167-171.
78. Кеткович А.А. , Чичигин Б.А. Лазерный профилометр изделий сложной формы // Литье и металлургия, 2005, т. 2(34). – С. 141-142.
79. Кеткович А.А., Яковлева Н.И., Чичигин Б.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 // Контроль Диагностикам. М: Машиностроение, 2007, т.3. – С. 32-34.
80. Кеткович А.А., Маклашевский В.Я. Лазерный профилометр. // Патент РФ № 2285234, приоритет 28.10.2004, опубликовано 10.10.2006.
81. Lijiang Z., Hirokazu M., Keiji K. Two-directional scanning method for reducing the shadow effects in laser triangulation // Meas. Sci. and Technol., 1997, V.8, № 3. – P. 262–266.
82. Пью А. Техническое зрение роботов // М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
83. Tang S., Hung Y.Y. Fast profilometry for the automatic measurement of 3-D object shape // Appl. Opt., 1990, V.29. – P. 3012–8.
84. Chen F., Brown G.M., Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods // Opt. Eng., 2000 , V.39. – P. 10–22.
85. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Наумов А.А.: Измерение поверхности трехмерных объектов методом проекции интерференционных полос // Оптика и спектроскопия, 1998, Т. 85, №6. - С. 1015-1019.
86. Chen L.C., Huang C.C. Miniaturized 3D surface profilometer using digital fringe projection // Meas. Sci. Technol., 2005, V.16. – P. 1061–8.

87. Chen L.C., Liang C.W., Nguyen X.L., Shu Y.S., Hsiao-Wen Wu. High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction // *Meas. Sci. Technol.*, 2010, V.21. - P. 105309-10.
88. Сухоруков К.А. Точность восстановления трехмерных поверхностей методом Фурье-синтеза // *Измерительная техника*, 2005, №5. - С. 34-36.
89. Lu T., Zhang J. Color structured light 3d-imaging system // Patent WO2000070303 A1, priority 14.05.1999, published 23.11.2000.
90. Bruning J.H., Herriott D.R., Gallagher J.E., Rosenfeld D.P., White A.D., Brangaccio D.J. Digital wave-front measuring for testing optical surfaces and lenses // *Appl. Opt.*, 1974, V.13. - P. 2693-2703.
91. Shelyekhova V., Abadjev V., Bernstein V., Atanassenkov A., Migdal A., Petrov M., Lebedev A. Structured-light, triangulation-based three-dimensional digitizer // Patent WO1999058930 A1, priority 14.05.1998, published 18.11.1999.
92. Климов А.В., Суховой С.В., Юхин А.Л. Способ бесконтактного контроля линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ № 2185598, приоритет 13.03.2001, опубликовано 20.07.2002 г.
93. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Применение устойчивого метода расшифровки интерферограмм для бесконтактного измерения 3d геометрии крупногабаритных объектов // *Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование*. Т. 13: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 28-30.04.2008, Санкт-Петербург, Россия. / Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.- С. 176-177.
94. Huang P.S., Zhang C.P., Chiang F.P. High speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection // *Opt. Eng.*, 2003, V.42. P.163–8.

95. Pennington T.L., Xiao H., May R., Wang A. Miniaturized 3-D surface profilometer using a fiber optic coupler // *Opt. Laser Technol.*, 2001, V.33. – P. 313–20.
96. Indebetouw G. Profile measurement using projection of running fringes // *Appl. Opt.*, 1978 , V.17. – P. 2930–33.
97. Deng F., Sze W. , Deng J., Fung K.S.M., Leung W.H., Lam E.Y. Regularized multiframe phase-shifting algorithm for three-dimensional profilometry // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, No. 1. — P. 33-42.
98. Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F. Fast 3D profilometer based upon the projection of a single fringe pattern and absolute calibration. // *Meas. Sci. Technol.*, 2006, V.17. – P. 1757-1766.
99. Halioua M., Liu H., Srinivasan V. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects // *Appl. Opt.*, 1984, V.23. - P. 3105 – 3108.
100. Acquisto L.D., Frantini L., Siddiolo A.M. A modified moire technique for three-dimensional surface topography // *Meas. Sci. Technol.*, 2002, V. 13, - P. 613–22.
101. Carlsson T.E., Wei A. Three-dimensional measurement using light-in-flight speckle interferometry // *Proc. 3rd Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*, W. Jueptner and W. Osten, eds. Akademie Verlag, Berlin, 1997. - P. 164-170.
102. Notni G., 360-deg shape measurement with fringe projection: calibration and application // *FRINGE'01, 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*, W. Osten and W. Jueptner, eds. ELSEVIER, 2001. - P. 311-323.
103. Takeda M. Spatial-carrier fringe-spatial analysis and its application to precision interferometry and profilometry: an overview // *Ind. Metrol*, 1990, V.1. – P. 79-99.
104. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *J. Opt. Soc. Am*, 1982, V.72. - P. 56-160.

105. Gruber M., Hausler G. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation // *Optik*, 1992, № 3. - С. 118 – 122.
106. Asundi A., Wensen Z. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill // *Appl. Opt.*, 1998, V.37. – P. 5416–23.
107. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 252 с.
108. Ильиных С.П., Гужов В.И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Автометрия*, 2002, Т. 38, №3. - С. 123-126.
109. Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. Универсальный алгоритм расшифровки // *Науч. вестн. НГТУ*, 2010, т.41, №4. - С. 51-58.
110. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов // М.: Наука, 1986. – 232 с.
111. Zhang, H., Ji L., Liu S., Li S., Han S., Zhang X. Three-dimensional shape measurement of a highly reflected, specular surface with structured light method // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, No. 31. — P. 7724-7732.
112. Xiao Y., Su X., Chen W., Liu Y. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirrors with fringe reflection photogrammetry // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, Issue 4. - P. 457-464.
113. Guo H., Feng P., Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique // *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, V.48, Issue 2. - P.166–171.
114. Deng, J., Wang H., Zhang D., Zhong L., Fan J., Lu X. Phase shift extraction algorithm based on Euclidean matrix norm // *Optics Letters*, 2013, Vol. 38, No. 9. — P. 1506-1508.
115. Goldberg, K.A., Bokor J. Fourier-transform method of phase-shift determination // *Applied Optics*, 2001, Vol. 40, No. 17. — P. 2886-2894.

116. Zander, T.E., Madyastha V., Patil A., Rastogi P., Reindl L.M. Phase-step estimation in interferometry via an unscented Kalman filter // *Optics Letters*, 2009, Vol. 34, No. 9. — P. 1396-1398.
117. Xu, J., Xu Q., Chai L., Li Y., Wang H. Direct phase extraction from interferograms with random phase shifts // *Optics Express*, 2010, Vol. 18, No. 20. — P. 20620-20627.
118. Guzhov, V.I., Ilinykh S.P., Kuznetsov R.A., Haydukov D.S. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry // *Optical Engineering*, 2013, Vol. 52 (3). — P. 030501-1 – 030501-2.
119. Estrada, J.C., Vargas J., Flores-Moreno J.M., Quiroga J. A. Windowed phase unwrapping using a first-order dynamic system following iso-phase contours // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, No. 31. — P. 7549-7553.
120. Двойнишников С.В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Компьютерная оптика*, 2007, Т. 31, №2. - С.21-25.
121. Двойнишников С.В., Кротов С.В., Павлов В.А. Оценка точности метода фазовой триангуляции при измерениях 3D геометрии крупногабаритных объектов // *Высокие технологии, образование, промышленность. Т.3: сборник статей Одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности»*. 27-29 апреля 2011 года, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А.П. Кудинова. СПб.: Изд-во Политехн. Университета, 2011. - С. 72-73.
122. Двойнишников С.В., Шпольвинд К.В. Метод оптической фазовой триангуляции с расширенным динамическим диапазоном измерения / «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» тезисы докладов X Международной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2012. – С. 39.

123. Двойнишников С. В., Меледин В. Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ №2433372, приоритет 10.09.2009, опубликовано 10.11.2011.
124. Оппенгейм А., Шафер З. Цифровая обработка сигналов // Москва: Техносфера, 2006. – 856 с.
125. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
126. Двойнишников С.В. Метод компенсации оптического тракта источник-приемник при фазовой триангуляции геометрии 3D объектов // Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 1 : сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. 22-23.04.2010, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А.П. Кудинова. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 138-139.
127. Двойнишников С.В. Методы расшифровки фазовых изображений в условиях нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения // Фундаментальные проблемы науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (20 апреля 2015 г., г.Уфа). в 2 ч. Ч.2/-Уфа: АЭТЕРНА,2015. - С. 38-39.
128. Двойнишников С.В. Математическое моделирование алгоритмов расшифровки фазовых изображений в условиях нелинейных искажений // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики. Материалы 6-й научно-практической internet-конференции.14-15 мая 2015 г. / отв. ред. Ю.С. Нагорнов.– Ульяновск: SIMJET, 2015. - С.188-192.
129. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р., Харин В.Б. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной локации // Радиотехника и электроника, 1998, т. 43, № 1. - С. 63-66.

130. Иванов И.Ф., Трофимов В.С. О едином методе измерения нелинейности импульсных устройств // Радиотехника, 1963, Т. 18, № 2. - С. 52-60.
131. Хазен Э.М. Определение плотности распределения вероятностей для случайных процессов в системах с нелинейностями кусочно-линейного типа // Известия АН СССР. Отд. техн. наук. Энергетика и автоматика, 1961, № 3. - С. 58-72.
132. Деч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов // М.: Советское радио, 1965. - 208 с.
133. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Шпольвинд К.В. Метод компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции // Измерительная техника, 2012, №2. - С. 12-16.
134. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике // М.: Советское радио, 1970. - 597 с.
135. Осипов М.Л. Сверхширокополосная радиолокация // Радиотехника, 1995, № 3. - С. 3-6.
136. Takeda M., Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes // Appl. Opt., 1983, V. 22. N 24. - P. 3977–3982.
137. Bruning J. H. e. a. Digital wave-front measuring for testing optical surfaces and lenses // Appl. Opt., 1974, V. 13. - P. 2693–2703.
138. Zuo C., Chen Q., Feng S., Feng F., Gu G., Sui X. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing // Applied Optics, 2012, Vol. 51, No. 19. — P. 4477-4490.
139. Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов // М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.
140. Двойнишников С. В., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности

- трехмерных объектов сложной формы // Метрология, 2010, № 4. - С. 15–27.
141. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ №2433372, приоритет 10.09.2009, опубликовано 10.11.11.
142. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения геометрии трехмерных объектов // Патент РФ № 2439489, приоритет 15.09.2010, опубликовано 10.01.2012.
143. Takeda M., Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces // Appl. Opt., 1994, Vol. 33, №34. – P. 7829 – 7837.
144. Гужов В.И. Практические аспекты измерения фазы в интерферометрии // Автометрия, 1995, №5. – С. 25-31.
145. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия, 1992. №6. – С. 24-30.
146. Двойнишников С.В., Шпольвинд К.В. Метод оптической фазовой триангуляции с расширенным динамическим диапазоном измерения // «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» тезисы докладов X Международной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2012. – С. 39.
147. Inokuchi S., Sato K., et al., Range-imaging system for 3-D object recognition // Proceeding of 7th International Conference Pattern Recognition, Montreal, Canada, 1984. - P. 806–808.
148. Stahs T., Wahl F. Fast and versatile range data acquisition // IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, Raleigh, NC, 1992. - P. 1169–1174.
149. Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов // М: Изд-во «Мир», 1980. - 552 с.

150. Куафэ Ф. Взаимодействие работа с внешней средой // М.: Мир, 1985. – 285 с.
151. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г. Лазерная облачная триангуляция для прецизионного измерения расстояний до плоской поверхности // Информационные технологии XXI века: материалы международной научной конференции, Хабаровск, 20-24 мая 2013 г., Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. ун-та, 2013. – С. 46-51.
152. Байбаков А.Н., Ладыгин В.И., Пастушенко А.И., Плотников С.В., Тукубаев Н.Т., Юношев С.П. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики // Автометрия, 2004, №2, Т.40. - С. 105-113.
153. Абакумов И.И., Булатов В.В., Кульчицкий А.А., Шабанов В.А. Автоматизированное детектирование пороков листового стекла на основе технологии технического зрения // Вестник Иркутского государственного технического университета, No2. – Иркутск: ИрГТУ, 2012 - С.21-26.
154. Михляев С.В. Применение методов оптической триангуляции для измерения уровня расплава при выращивании кристаллов // Автометрия, 2003, Т. 39, № 5. - С.30-41.
155. Венедиктов А.З. Лазерный триангуляционный измеритель // патент РФ №45520, приоритет 27.12.2004, опубликовано 10.05.2005 г.
156. K. G. Harding Filter for laser gaging system // US patent №5815272, priority 23.10.1996, published 29.09.1998.
157. J.C.Nosler Electro-optical distance-measuring system // US patent № 4248532, priority 26.12.1978, published 03.02.1981.
158. Walters P. An Introduction to Ergodic Theory // Berlin:Springer-Verlag, 1982. – 250 p.
159. Bretscher O. Linear Algebra With Applications (4th ed.) // Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009. – 478 p.

160. Dvoynishnikov S., Rakhmanov V. Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations // European Physics Journal, 2015, № 82. - P. 01035-3.
161. Артемьев Б.В., Рентгеновская толщинометрия металлов // М., Машиностроение, 2002. - 104 с.
162. Набойщиков В.Д., Григорьева Т.О., Соколов В.А. и др. Рентгеновские толщиномеры холодного и горячего проката непрерывных станов // М., 1986. - 44 с.
163. Артемьев Б.В., Егоров И.В., Запускалов В.Г., Маслов А.И., Ролик В.А. Рентгеновский толщиномер // Патент РФ №2172930, приоритет 10.04.2000, опубликовано 27.08.2001.
164. Соколов В. А., Егоров И. В., Шифрин А. М., Рыннов Н.И., Шершелюк В. П. Устройство для измерения толщины // А.с. СССР №718700, приоритет 20.06.1978, опубликовано 29.02.1980.
165. Русин Л. И., Кожухова Е.А., Емельянова Т. С. Способ фотоэлектрического определения толщины листового изделия и устройство для его осуществления // А.с. СССР №1458704, приоритет 08.07.1983, опубликовано 07.11.1985.
166. Галиулин Р. М., Галиулин Р.М.,Копьев С.М., Коханюк Н.И. Фотоэлектрическое устройство для измерения профиля и толщины изделий сложной формы // А. с. СССР №1647249, приоритет 25.05.1988, опубликовано 07.05.1991.
167. Комиссаров А.Г. Способ бесконтактного измерения толщины // А.с. СССР №1826698, приоритет 25.05.1990, опубликовано 10.06.1996.
168. Собашко В.Я., Масловский Р.С., Собашко А.В. Способ измерения толщины листовых изделий // А.с. СССР №1728647, приоритет 05.07.1988, опубликовано 23.04.1992.
169. Комиссаров А.Г. Способ бесконтактного измерения толщины объекта // А.с. СССР №1826697, приоритет 25.05.1990, опубликовано 10.06.1996.

170. Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий // Патент РФ на изобретение № 2537522, приоритет 01.07.2013, опубликовано 10.01.2015.
171. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В. Устройство для триангуляционного измерения толщины листовых изделий // Патент РФ № 139156, приоритет от 27.11.2013, опубликовано 12.03.2014.
172. Лазерные триангуляционные датчики // [URL:riftek.com/ru/products/~show/sensors/laser-triangulation-sensor](http://URL:riftek.com/ru/products/~show/sensors/laser-triangulation-sensor)
173. Хорн Б.К.П. Зрение роботов // М.: Мир, 1989. – 487 с.
174. Логинов А.И. Системы технического зрения // М.:МИРЭА, 1991. – 80 с.
175. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г., Павлов В.А. Автоматизированная метрология лазерных анемометров для металлургии // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 5: Сборник трудов Второй международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 07-09.01.2006, Санкт-Петербург, Россия, Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, В.Ф. Самохина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.- С. 326-327.
176. De Piero F. W., Trivedi M. M. 3-D computer vision using structured light: Design, calibration, and implementation issues // Advances in Computers, 1996, V.43. – P.243–278.
177. McIvor A.M., Valkenburg R.J. Calibrating a structured light system // Auckland: Industrial Research Limited Report 362, 1995. – 17 p.
178. Abdel–Aziz, Y., Direct linear transformation into object space coordinates in close–range photogrammetry // Proceedings of the Symposium on Close–Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, 1971. - P. 1–18.

179. Penna M.A. Camera Calibration: A quick and easy way to determine the scale factor // Proc. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, Vol. 13, No.12. – 1240-1245.
180. Heikkila J., Silven O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction // Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vision and Pattern Recogn., 1997. – P.1106-1112.
181. Armangue X., Salvi J., Batle J., A comparative Review of Camera Calibrating Methods with Accuracy Evaluation // Pattern Recognition, 2002, Vol. 35, Issue 7. – P.1617-1635.
182. Dias J., de Almeida A., Ara'ujo H.,Batista J. Camera recalibration with hand-eye robotic system // Kobe : IECON, 1991, V.3. – P.1923-1928.
183. Huang C.T., Mitchell O.R. Dynamic camera calibration // Proc. Int. Symp. on Computer Vision, 1995, pp 169–174.
184. Seo Y., Hong K. S. Theory and practice on the self-calibration of a rotating and zooming camera from two views // IEE Proc. Vis. Image Signal Process., 2001, V.148, Issue 3. – P. 166–172.
185. Curry S., Baumrind S., Anderson J.M. Calibration of array camera // Photoge om. Eng. Remote Sens., 1986, Vol. 52, Issue 5. – P. 627–636.
186. Bronstein A.M., Bronstein M. M., Gordon E., Kimmel R. High-resolution Structured Light Range Scanner with Automatic Calibration // Technical Report CIS-2003-06, Dept. of Computer Science, Technion, Israel, 2003. – 26 p.
187. Bronstein A.M., Bronstein M. M., Kimmel R. Three-dimensional Face Recognition // International Journal of Computer Vision (IJCV), 2005, Vol. 64 (1). - P. 5-30.
188. Chu C.W., Hwang S., Jung S.K. Calibration-free approach to 3d reconstruction using light stripe projections on a cube frame // IEEE 3rd Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (Quebec City, Canada), 2001. - P. 13–19.

189. Li Y.F., Chen S.Y. Automatic recalibration of a structured light vision system // *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 2003, Vol.19. – P. 259–268.
190. Chen S.Y., Li Y.F. Self-recalibration of a colour-encoded light system for automated threedimensional measurements // *Meas. Sci. Technol.*, 2003, Vol 14. - P. 33–40.
191. Zomet A., Wolf L., Shashua A. Omni-rig: linear self-recalibration of a rig with varying internal and external parameters // *Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, 2001, Vol 1. – P. 135–141.
192. Fofi D., Salvi J., Mouaddib E. Uncalibrated vision based on structured light // *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, 2001. - P.3548 – 3553.
193. Fofi D., Mouaddib E., Salvi J. How to self-calibrate a structured light sensor // *9th Int. Symp. on Intelligent Robotic System*, Toulouse, 2001. - 9 p.
194. Jokinen O. Self-calibration of a light striping system by matching multiple 3D profile maps // *Proc. 2nd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, Ottawa, 1999. – P. 180–90.
195. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bull. Math. Biophys.*, 1943, Vol.5. – P. 115-133.
196. Hebb D.O. *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory* // New York: Science Editions, 1949. – 335 p.
197. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики // М., Мир, 1965. - 480 с.
198. Kohonen T. *Self-Organization and Associative Memory* // 2nd edn, Berlin: Springer-Verlag, 1988. – 325 p.
199. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proc. of National Academy of Sciences, USA*, 1982, Vol.79. – P. 2554-8.
200. Hopfield J.J. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons // *Proc. of National Academy of Sciences, USA*, 1984, Vol.81. – P. 3088-92.

201. Hopfield J.J., Tank D.W. Computing with neural circuits // *Sciences*, 1986, Vol.233. - P. 625-33.
202. Rumelhart D., McClelland J. *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 1: Foundations* // Cambridge, MA: The MIT Press, 1999. – 564 p.
203. Двойнишников С.В., Кабардин И.К. Комплексный метод калибровки оптоэлектронных систем измерения 3D-геометрии на основе нейронных сетей // *Современные проблемы математики и механики: Материалы III Всероссийской молодежной научной конференции*, под ред. А.И.Филькова. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. - С. 412-417.
204. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, // *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1989, Vol.2. – P.303-14.
205. Киреев О.С. Нейрокалибровка бинокулярной системы с существенной дисторсией // *Математические машины и системы*, 2005, № 2. – С.33-44.
206. Киреев О.С. Нейрокалибровка стереопары // *Математические машины и системы*, 2005, № 1. – С.13-25.
207. Резник А.М., Куссуль М.Э., Сычев А.С., Садовая Е.Г., Калина Е.А. Система автоматизированного проектирования модульных нейронных сетей CAD MNN // *Математические машины и системы*, 2002, № 3. - С. 28–36.
208. Yongtae D. Application of Neural Networks for Stereo-Camera Calibration // *International Joint Conference on Neural Networks*, 1999. – P. 2719–2722.
209. Armangue X., Salvi J., Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy valuation // *Pattern Recognition*, 2002, Vol. 35 (7). – P. 1617–1635.
210. Новичихин А.В. Калибровка лазерного оптико-электронного измерителя наноперемещений // *Ползуновский Альманах*, 2009, №2. – С. 18-19.

211. Главный В.Г., Двойнишников С.В., Пененко А.В. О статистической оценке ошибки оператора СЛАУ в задаче калибровки лазерного толщиномера горячего проката // «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» тезисы докладов IV Международной молодежной научной школы-конференции, Новосибирск, 2012. – С. 46.
212. Двойнишников С.В., Главный В.Г., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Разработка методов калибровки лазерного измерителя толщины горячего проката // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы третьей Международной научно-практической конференции (25 апреля 2014 г.) , отв. Ред. А.А. Веселовский. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 13-14.
213. Главный В.Г., Пененко А.В., Двойнишников С.В. О статистической оценке ошибки оператора СЛАУ в задаче калибровки лазерного измерителя толщины горячего проката // Сибирские электронные математические известия, 2013, Часть I. - С.16-27.
214. Sansoni, G.; Redaelli, E. A 3D vision system based on one-shot projection and phase demodulation for fast profilometry // Meas. Sci. Technol., 2005, V.16. - P. 1109-1118.
215. Huang P. S., Zhang C. , Chiang F.-P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection // Opt. Eng.2003, V.42(1). - P. 163–168.
216. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++ // Москва: Изд. “Бином”, 1998. - 560 с.
217. Jackson M. Principles of Program Design // Orlando, FL: Academic Press, 1975. – 310 p.
218. Jackson M. System Development // Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983. – 418 p.
219. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А. Внутренняя архитектура программного модуля лазерного доплеровского измерителя скорости

- для измерения поля скоростей и давлений // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 13: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 28-30.04.2008, Санкт-Петербург, Россия. / Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.- С. 178-179.
220. Двойнишников С.В. Внутренняя архитектура программного модуля 3D лазерного доплеровского измерителя скорости // Материалы XLIV Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”: Физика, Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2006. - С.15-16.
221. Danforth, S., Tomlinson. C. Type Theories and Object-Oriented Programming // ACM Computing Surveys, 1988, Vol.20(1). - p.34.
222. Knuth D. The Art of Computer Programming // MA: Addison-Wesley. 1973, Vol.1-3. 3168 p.
223. Двойнишников С.В., Главный В.Г., Рахманов В.В., Метод асинхронной передачи данных в лазерном доплеровском измерителе скорости для гидродинамических исследований // IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Новосибирск, 2006. – С. 35-36.
224. Двойнишников С.В., Куликов Д.В. Диспетчер программного модуля лазерного доплеровского измерителя скорости // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 13: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 28-30.04.2008, Санкт-Петербург, Россия., под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - С. 177-178.

225. Двойнишников С.В., Главный В.Г., Садбаков О.Ю. Менеджер позиционирования программного модуля лазерного доплеровского измерителя скорости // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 13: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 28-30.04.2008, Санкт-Петербург, Россия., под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.- С. 179-180.
226. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Куликов Д.В., Шпольвинд К.В. Интерфейс пользователя системы лазерного сканирования пространственного потока в реальном времени // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. Тезисы докладов. Новосибирск, 2008. - С. 52-53.
227. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Чубов А.С., Шпольвинд К.В. Метод отложенной записи данных лазерного доплеровского измерителя скорости, обеспечивающий разрешение высокоскоростных пульсаций // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. Тезисы докладов. Новосибирск, 2008. - С. 54-55.
228. Stroustrup, B. The C++ Programming Language. Second Edition // MA: Addison-Wesley, 1991. – 366 p.
229. Rentsch, T. Object-Oriented Programming // SIGPLAN Notices, 1982, Vol.17(12). - P.51.
230. Stroustrup B.. What Is Object-oriented Programming // IEEE Software, 1988, Vol.5(3). - P.10.
231. GPU accelerated applications // URL: <http://www.nvidia.com/content/PDF/gpu-accelerated-applications.pdf>

232. Asano S., Maruyama T., Yamaguchi Y. Performance comparison of FPGA, GPU and CPU in image processing // IEEE Int. Conf. Field Programmable Logic Appl., 2009. - P. 126–131.
233. Kang H., Yamaguchi T., Yoshikawa H., Kim S., Kim E., Acceleration method of computing a compensated phase-added stereogram on a graphic processing unit // Appl. Opt., 2008, Vol. 47. - P. 5784-5789.
234. Karpinsky N., Hoke M., Chen V., Zhang S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement on graphics processing unit // Optical Engineering, February, 2014, Vol. 53(2). - P. 024105 – 8.
235. Espinosa-Romero A., Legarda-Saenz R. GPU based real-time quadrature transform method for 3-D surface measurement and visualization // [Opt. Express](#), 2011, Vol. 19(13). - P. 12125–12130.
236. Будаи Б.Т. Высокоточный оптический измеритель параметров проката // Сталь, 2014, №2. – С. 55-58.
237. Будаи Б.Т., Породнов Б.Т., Мякутина И.В., Товкач Е.Ф. Разработка высокоточного экологически чистого метода измерения толщины листового проката // Дефектоскопия, 2012, №8. – С.49-54.
238. ГАЛИУЛИН РАВИЛЬ МАСГУТОВИЧ,
239. Галиулин Р.М., Копьев С.М., Коханюк Н.И. Фотоэлектрическое устройство для измерения профиля и толщины изделий сложной формы // А.с. СССР №1647249, приоритет 25.05.1988, опубликовано 07.05.1991.
240. Будаи Б. Т., Касаткин Н. В. Измерение параметров листового горячего проката // Инженерно-физический журнал, 2014, Т.87, №1.- С. 225-228.
241. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога // М: Изд-во стандартов,1991. - 80 с.
242. Рабинович С.Г. Погрешности измерений // Л.: Энергия, 1978. – 262 с.
243. Двойнишников С.В. Подсистема визуализации лазерного измерителя толщины горячего проката // Приоритетные направления развития науки: сборник статей Международной научно-практической

- конференции. 3 апреля 2014 г.: в 2 ч. Ч.1, отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. - С. 26-28.
244. Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Кротов С.В., Меледин В.Г., Садбаков О.Ю., Чубов А.С. Модуль синхронизации лазерного измерителя толщины горячего проката // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» 22-23 мая 2014, Санкт-Петербург, Россия, научные редакторы А.П.Кудинов, М.А. Кудинов. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – С. 236-238.
245. Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Кротов С.В., Куликов Д.В., Соколов Р.Е., Горбач Н.Л. Телеметрическая система лазерного измерительного комплекса для измерения толщины горячего проката // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» 22-23 мая 2014, Санкт-Петербург, Россия, научные редакторы А.П.Кудинов, М.А. Кудинов. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – С. 238-240.
246. Бородюк В.П., Вошинин А.П., Иванов А.З. и др. Статистические методы в инженерных исследованиях // М.: Высшая школа, 1983.- 216 с.
247. Двойнишников С.В. Влияние фазовых неоднородностей среды на погрешность лазерных триангуляционных методов // Фундаментальные и прикладные проблемы физики, под общ. ред. В. К. Свешникова ; Мордов. гос. пед. ин-т. – Саранск, 2013.– С. 37-41.
248. Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К. Экспериментальная оценка

- применимости лазерных триангуляторов для измерений толщины горячего проката // Метрология №12, 2014. - С. 9 - 21.
249. Deans S.R. The Radon Transform and Some of Its Applications // New York: John Wiley & Sons, 1983. – 299 p.
250. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography // Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001. – 245 p.
251. Boyle W.S. CCD—An extension of man’s view // Rev. Mod. Phys., 2010, Vol. 82, fasc. 3. — P. 2305—2306.
252. Smith G.E. The invention and early history of the CCD // Rev. Mod. Phys., 2010, Vol. 82, fasc. 3. — P. 2307—2312.
253. Манцветов А.А., Цыцулин А.К. Телекамеры на КМОП фотоприемниках // Вопросы радиоэлектроники, Серия Техника телевидения, 2006, Вып. 2. - С. 70–89.
254. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. // Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2005. -404с.
255. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В. Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами // Гироскопия и Навигация, С.-Петербург, 2013, №1(80). - С.49 -63.
256. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Губанов А.Г., Ефремов М.В. Обеспечение термоинвариантности волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация, изд-во ГНЦ РФ ОАО ”Концерн ”ЦНИИ ”Электроприбор”, 2011, №4 (75). - С. 42-56.
257. Barbour N., Madden P., Socha M. Development of a micromechanical gyro package with GPS for small pointing Satellites // Gyroscopy and Navigation, 1996, № 2(13). - С.7-15.

258. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Применение метода элементарных балансов для анализа и синтеза системы терморегулирования на модулях Пельтье для БИНС на ВОГ // Гироскопия и навигация", изд-во ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2013, №2 (81). - С. 84-103.
259. Барулина М.А., Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели систем терморегулирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация", изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2002, №3. - С. 46-58.
260. Титце У., Шенк К., Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. // М.: Мир, 1982.- 512 с.
261. Двойнишников С.В., Куликов Д.В. Метод компенсации температурного искажения калибровочной характеристики триангуляционного измерителя // Актуальные проблемы современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (19 мая 2015 г., г. Стерлитамак). – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – С. 72-73.
262. Двойнишников С.В. Метод фильтрации первичных результатов измерения лазерного толщиномера горячего проката // Современное состояние и перспективы развития технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции (23 мая 2015 г., г. Уфа). – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – С. 34-35.
263. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Павлов В.А., Прибатурин Н.А. Прецизионная диагностика трехмерной геометрии лопастей турбин для гидроэнергетики // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. URL: [www.science-education.ru/108-8795](http://www.science-education.ru/108-8795)
264. Dvoynishnikov S., Meledin V., Bakakin G., Kulikov D. Laser Cloudy Triangulation Method for Geometrical Measurements Under the Optical Refraction Conditions // International Conference on Computer Science and Environmental Engineering, May 17-18, 2015, Beijing, China (CSEE2015). - P.532-538.

265. Пылаев Н.И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах // М., Машиностроение, 1974. – 256 с.
266. Румахеранг В.М., Топаж Г.И. Расчет кавитационного обтекания рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011, т. 13, №1(2). - С. 472-475.
267. Волков Ю.С., Мирошниченко В.Л. Построение математической модели универсальной характеристики радиально-осевой гидротурбины // Сибирский журнал индустриальной математики. 1998, т.1(1). С. 77-88.
268. Thum S. Optimization of Hydraulic Machinery Bladings by Multilevel CFD Techniques // International Journal of Rotating Machinery, 2005, Vol.2. – P. 161–167.
269. Поспелов А.Ю., Жарковский А.А. Расчет течения и прогнозирование гидравлических качеств гидротурбин // Научно-технические ведомости СПбГПУ (Наука и образование), 2011, №3. –С.227-231.
270. Ковалев А.А. Моделирование кавитационного воздействия на рабочую поверхность изделия, эксплуатируемого в гидродинамической среде // Наука и образование, 2013, №11. - С.25-36.
271. Денисов С.В. Развитие технологии производства рулонного и листового проката для трубной промышленности // Труды международной научно-технической конференции «Трубы– 2007», Челябинск, 2007. - С. 19-21.
272. Казаков А.А., Ковалев П.В., Зинченко С. Д., Немтинов А.В., Лягин А. Б., Дробинин А. А. Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали // Чёрные металлы, 2007, №10. - С. 8-15.
273. Колбасников Н. Г., Зотов О. Г., Мартяшов И. С., Сулягии Р. В. Влияние отдельных стадий технологии изготовления труб большого диаметра на формирование их конечных свойств с использованием метода физического моделирования // Сталь, 2012, №12. - С. 53-57.

274. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки // М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 399 с.
275. Чекмарёв А.П., Павлов В.Л., Мелешко В.И. Теория прокатки крупных слитков // М.: Металлургия, 1968. - 252 с.
276. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке // М.: Металлургиздат. 1956. - 257 с.
277. Липухин, Ю.В., Пименов А.Ф., Тишков В.Я., Алюшин Б.А., Трайно А.И. Производство горячекатаных полос с гарантируемым уровнем прочности // Сталь, 1985, №4. – С. 40-42.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Справки об использовании результатов работы и протокол промышленных испытаний.

#### СПРАВКА

об использовании результатов разработки  
«Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс  
для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ»  
на ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина», г. Новосибирск

Более 70 лет «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина» (НМЗ им. Кузьмина) специализируется на металлопродукции для жилищно-хозяйственного комплекса, машиностроения, мебельного производства, авиации и ракетостроения. Сегодня ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина» - единственный за Уралом производитель, имеющий самую широкую специализацию производства листового проката, труб различного диаметра, профилей и холоднокатаной ленты.

Первый технологический передел при производстве любой продукции на НМЗ им. Кузьмина начинается с цеха горячей прокатки (ЦГП) на полунепрерывном стане горячей прокатки 810, обеспечивающий все цеха предприятия горячекатаным прокатом толщиной от 1,5 до 6,35 мм.

Институтом оптико-электронных информационных технологий (ОАО «ИОИТ») совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук специально для НМЗ им. Кузьмина впервые разработан, изготовлен и внедрен в ноябре 2012 года новейший лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ. Работы успешно выполнены в рамках Договора № 1 от 14.02.2011 между ОАО «НМЗ им. Кузьмина» и ОАО «ИОИТ» на работу «Изготовление, поставка и пуск лазерного радиационно-безопасного измерительного комплекса для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ», руководитель работ проф., д.т.н. Меледин Владимир Генриевич.

Целью работы являлось оснащение НМЗ им. Кузьмина современной системой мониторинга толщины горячего и холодного проката, отличающейся высокой надежностью и стабильностью на уровне лучших мировых аналогов.

Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс ЛАД-ОРЗ осуществляет в реальном времени регистрацию толщины горячего проката и статистическую обработку результатов измерений с ведением архивов и обеспечивает работу в автономном режиме и в информационных сетях. Предназначен в качестве замены на прокатном производстве НМЗ морально и физически устаревших толщиномеров серий ИГТ-5688 и ИГТ-5630.

Измерительный комплекс реализован с использованием новейших полупроводниковых лазеров, детекторов и СБИС. Применены инновационные научные и технические решения, оригинальные алгоритмы собственной разработки.

Измерение толщины производится на основе специально созданного нового метода - синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции с многоуровневой спектральной и пространственной фильтрацией. Используется анаморфотная оптическая схема и пассивные аэродинамические ловушки – седиментаторы взвесей и аэрозоля.

В конструкции лазерного радиационно-безопасного измерительного комплекса ЛАД-ОРЗ отсутствуют рентгеновские трубки и другие радиационные излучающие элементы. Элементная база лазерного измерительного комплекса ЛАД-ОРЗ включает новейшие электронные и оптические компоненты, имеющие большой ресурс работы – более 50000 часов.

Ввод измерительного комплекса в опытную эксплуатацию по результатам заводских испытаний лазерного радиационно-безопасного измерительного комплекса для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ произведен 30 ноября 2012 года. Лазерный радиационно-безопасный комплекс для измерения ЛАД-ОРЗ признан соответствующим требованиям технического задания, и используется в действующем металлургическом производстве для контроля и мониторинга геометрических параметров горячего листового проката.

Справка дана ответственному исполнителю работ, к.т.н. Двойнишникову Сергею Владимировичу, результаты и изобретения которого использованы в лазерном радиационно-безопасном измерительном комплексе для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ, для представления в диссертационный совет.

Главный инженер – первый заместитель генерального директора  
ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина»



## СПРАВКА

об использовании результатов разработки «Изготовление и поставка лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков» на ОАО «Силловые машины» филиал «Ленинградский Металлический Завод», г. Санкт-Петербург.

С начала века «Ленинградский Металлический Завод» (ЛМЗ) специализируется на производстве энергетических турбин. ЛМЗ - самая крупная турбостроительная фирма России. На ЛМЗ за 90 с лишним лет разработки и создания изготовлено более 2300 турбин общей мощностью около 300 млн. кВт, более 670 гидротурбин суммарной мощностью более 62 млн. кВт, а также около 1000 регуляторов к гидротурбинам и 60 предтурбинных затворов. ЛМЗ во многом определяет прогресс отечественного и мирового гидротурбостроения. Турбины ЛМЗ работают на крупных ГЭС, таких как Волжские, Братская, Красноярская, Усть-Илимская, Саяно-Шушенская (Россия), Майка, Сайт 1, Дженгег (Канада), Собрадиньо (Бразилия), Уитес (Мексика), Хоабинь (Вьетнам) и многих других.

В лаборатории гидротурбин ЛМЗ ведётся разработка эффективных проточных частей, исследования новых материалов и надёжности конструкций. Работающие в 30 странах Европы, Азии, Африки и Америки гидравлические турбины подтверждают основательность опыта ЛМЗ в гидротурбостроении. В планах ЛМЗ поставка гидротурбин, регуляторов и затворов для электростанций Индии, Аргентины, Ирака, Казахстана, Ирана, Латвии и России.

Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской Академии Наук специально для ЛМЗ разработана, изготовлена и внедрена в декабре 2004 года новейшая 3D лазерная измерительная система ЛАД-056 ЛМЗ для стеновых испытаний и оптимизации различных моделей турбин и их последующей сертификации. При заключении контракта Заказчик рассматривал предложения ряда зарубежных фирм и по совокупности технико-экономических параметров предпочел разработку ИТ СО РАН. Работы успешно выполнены в рамках Договора № 855 от 28.07.2003 между ОАО ЛМЗ и ИТ СО РАН (г. Новосибирск) на работу «Изготовление и поставка лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков».

Целью работы являлось изготовление и оснащение ЛМЗ новейшей трехкомпонентной лазерной доплеровской измерительной системой (ЛДИС), предназначенной для определения кинематических параметров закрученных гидродинамических потоков и определения влияния 3D параметров крупномасштабных винтовых вихревых структур на процессы переноса в закрученных потоках за рабочим колесом турбины.

Лазерный измерительный комплекс ЛАД-056 ЛМЗ предназначен для диагностики газожидкостных многофазных мутных потоков в режиме обратного светорассеяния. В комплексе использована впервые разработанная 3D анаморфотная схема лазерного анемометра с ортогональной поляризацией, позволившая применить современные мощные полупроводниковые лазеры с низкой степенью пространственной и временной когерентности, существенно улучшившие характеристики анемометра. Впервые разработана синхронная встроенная система обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур «Field Programmable Gate Array», разработана новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Основные параметры анемометра соответствуют лучшим мировым аналогам (DANTEC, TSI) при существенно меньших габаритах и стоимости.

Техническая приемка по результатам заводских испытаний лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ произведена 10 декабря 2004 года на предприятии Заказчика. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ соответствует заявленным техническим характеристикам и признана годной для эксплуатации.

Справка дана Двойнишникову Сергею Владимировичу, результаты работы которого использованы в 3D лазерном измерительном комплексе «ЛАД-056 ЛМЗ», для представления в диссертационный совет.

Главный конструктор гидротурбин  
Начальник СКБ «Гидротурбомаш» ЛМЗ



В.А. Демьянов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ  
РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
РОССТАНДАРТ



Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Всероссийский  
научно-исследовательский институт  
метрологии им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»

03  
03  
03  
03

190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19  
Тел.: (812) 251-76-01. Факс: (812) 713-01-14  
e-mail: info@vniim.ru, http://www.vniim.ru  
ОКПО 02566450, ОГРН 1027810219007  
ИНН/КПП 7809022120/783901001

14 ЯНВ 2013 № Н-2550-161

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

ФГБУН Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения РАН  
(ИТ СО РАН)

630090, г. Новосибирск,  
пр. ак. Лаврентьева, 1

### СПРАВКА

**об использовании разработки лазерного доплеровского измерителя  
скорости (ЛАД-015) в составе эталона скорости воздушного потока**

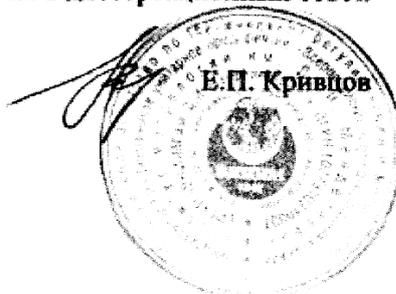
При разработке в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Государственного первичного специального эталона единицы скорости воздушного потока ГЭТ 150-2012 в качестве одного из эталонных средств измерений скорости воздушного потока использован лазерной доплеровской измеритель ЛАД-015 (зав. № 123-61-0901-14, фирма-изготовитель ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий», г. Новосибирск).

Лазерный доплеровский измеритель ЛАД-015 является уникальным средством измерений. Его применение позволило существенно расширить по сравнению с предыдущим эталоном ГЭТ 150-85 диапазон измерений в область малых значений скоростей воздушного потока и повысить точность измерений в 1,5 раза. ГЭТ 150-2012 утвержден Росстандартом в декабре 2012 г.

Справка дана ответственному исполнителю работ по созданию ЛАД-015 Сергею Владимировичу Двойнишникову для представления в диссертационный совет.

Заместитель директора

Исполнитель –  
Ю.А. Чистяков, тел (812) 251-57-72,  
E-mail: Yu.A.Chistyakov@vniim.ru



## СПРАВКА

об использовании результатов разработки «Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-06 ЛМЗ» на ОАО «Силловые машины» филиал «Ленинградский Металлический Завод», г. Санкт-Петербург

С начала века «Ленинградский Металлический Завод» (ЛМЗ) специализируется на производстве энергетических турбин. ЛМЗ - самая крупная турбостроительная фирма России. На ЛМЗ за 90 лет лишним лет разработки и создания изготовлено более 2300 турбин общей мощностью около 300 млн. кВт, более 670 гидротурбин суммарной мощностью более 62 млн. кВт, а также около 1000 регуляторов к гидротурбинам и 60 предтурбинных затворов. ЛМЗ во многом определяет прогресс отечественного и мирового гидротурбостроения. Турбины ЛМЗ работают на крупных ГЭС, таких как Волжские, Братская, Красноярская, Усть-Илимская, Саяно-Шушенская (Россия), Майка, Сайт 1, Дженпег (Канада), Собрадиньо (Бразилия), Уитес (Мексика), Хоабинь (Вьетнам) и многих других.

В лаборатории гидротурбин ЛМЗ ведётся разработка эффективных проточных частей, исследования новых материалов и надёжности конструкций. Работающие в 30 странах Европы, Азии, Африки и Америки гидравлические турбины подтверждают основательность опыта ЛМЗ в гидротурбостроении. В планах ЛМЗ поставка гидротурбин, регуляторов и затворов для электростанций Индии, Аргентины, Ирака, Казахстана, Ирана, Латвии и России.

Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской Академии Наук специально для ЛМЗ разработана, изготовлена и внедрена в декабре 2004 года новейшая лазерная измерительная система ЛАД-06 ЛМЗ для стендовых испытаний и оптимизации различных моделей турбин и их последующей сертификации. При заключении контракта Заказчик рассматривал предложения ряда зарубежных фирм и по совокупности технико-экономических параметров предпочел разработку ИТ СО РАН. Работы успешно выполнены в рамках Договора № 855 от 28.07.2003 между ОАО ЛМЗ и ИТ СО РАН (г.Новосибирск) на работу «Изготовление и поставка лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков», в рамках которой был создан измеритель ЛАД-06 ЛМЗ.

Целью работы являлось изготовление и оснащение большого кавитационного стенда новейшей лазерной доплеровской измерительной системой (ЛДИС), предназначенной для определения кинематических параметров закрученных гидродинамических потоков и определения влияния параметров крупномасштабных винтовых вихревых структур на процессы переноса в закрученных потоках за рабочим колесом турбины.

Лазерный измерительный комплекс ЛАД-06 ЛМЗ предназначен для диагностики газожидкостных многофазных мутных потоков в режиме обратного светорассеяния. Впервые разработана новая анаморфотная схема лазерного анемометра с ортогональной поляризацией, позволившая применить современные мощные полупроводниковые лазеры с низкой степенью пространственной и временной когерентности, существенно улучшившие характеристики анемометра. Впервые разработана встроенная система обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур «Field Programmable Gate Array», разработана новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Основные параметры анемометра соответствуют лучшим мировым аналогам (DANTEC, TSI) при существенно меньших габаритах и стоимости.

Техническая приемка по результатам заводских испытаний лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-06 ЛМЗ произведена 10 декабря 2004 года на предприятии Заказчика. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-06 ЛМЗ соответствует заявленным техническим характеристикам и признана годной для эксплуатации.

Справка дана Двойнишникову Сергею Владимировичу, результаты работы которого использованы в лазерном измерительном комплексе «ЛАД-06 ЛМЗ», для представления в диссертационный совет.

Главный конструктор гидротурбин  
Начальник СКБ «Гидротурбостроения» ЛМЗ



В.А. Демьянов

## СПРАВКА

об использовании разработки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и ЗАО «Научно-производственная компания ВТ» «Лазерный прецизионный бесконтактный измеритель скорости и линейных размеров движущихся объектов «ЛИ-8023М-К» на ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина», г. Новосибирск

Металлургический завод имени А.Н. Кузьмина выпускает листовой прокат из стали и сплавов с широким диапазоном заданных свойств. Трубные цеха выпускают трубы различного диаметра и назначения, в т.ч. и холоднодеформированные бесшовные трубы из привозной круглой заготовки. Стратегия развития металлургического завода имени А.Н. Кузьмина строится на использовании существующего потенциала и его наращивания за счет технического перевооружения, повышения квалификации персонала и использования современных технологий управления и производства.

Целью работы являлось оснащение редукционного стана новым лазерным измерителем скорости и длины горячего проката «ЛИ-8023М-К». Измеритель поставляется в качестве замены лазерного измерителя «Квazar-М», успешно отработавшего в непрерывном режиме с 1986 года. Основные параметры лазерного измерителя соответствуют лучшим мировым аналогам (MESACON, TSI) при существенно меньших габаритах и стоимости комплекса.

Лазерный прецизионный бесконтактный измеритель скорости и линейных размеров движущихся объектов «ЛИ-8023М-К» создан и поставлен в рамках Договора 15/04 между ЗАО «Научно-производственная компания ВТ» и ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина» при участии Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск.

В соответствии с актом приема-передачи от 02.02.2006 лазерный измеритель скорости и длины «ЛИ-8023М-К» соответствует техническим характеристикам, приведенным в техническом задании, обеспечен необходимой эксплуатационной документацией, находился в опытной эксплуатации с 20.11.2005 и введен в эксплуатацию 02.02.2006. Полученные результаты подтверждают успешность работ, проводимых специалистами по оснащению прокатного производства современными лазерными оптоэлектронными информационно-измерительными комплексами и созданию автоматизированного прокатного производства на основе высоких технологий.

Справка дана Двойнишникову Сергею Владимировичу, результаты работы которого использованы в лазерном измерительном комплексе «ЛИ-8023М-К», для представления в диссертационный совет.

Главный инженер ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина»



А.Н.Колганов



**УТВЕРЖДАЮ**

**Начальник СКБ «Гидротурбомаш»  
Главный конструктор  
В.А. Демьянов**

2009г.

## **ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ**

**оптоэлектронной координатно-измерительной системы для измерения и анализа профиля поверхности лопаток гидротурбин в процессе производства**

В период 2-5 марта 2009 г. специалистами ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий» при участии Института теплофизики СО РАН были проведены испытания **«оптоэлектронной координатно-измерительной системы для измерения и анализа профиля поверхности лопаток гидротурбин в процессе производства»**.

### **1. Актуальность**

В машиностроении можно выделить достаточно широкий представительный класс изделий, к числу которых относятся маложесткие, как правило, сложнопрофильные крупногабаритные изделия, такие как лопасти гидротурбин, лопатки паровых, газовых турбин и компрессоров, корпуса коробчатого и оболочечного типа, воздушные винты летательных аппаратов, гребные винты судов, крыльчатки, покрывные диски и др.

Специфика механической обработки таких изделий связана с их высокой податливостью, изменением ориентации режущего инструмента по отношению к заготовке, а также упруго-инерционных характеристик в процессе съема припуска. При этом к изделиям предъявляются повышенные требования к качеству изготовления.

Учитывая высокую стоимость заготовок, а так же повышенные требования по качеству изготовления изделий, актуальной становится задача обеспечения высокоточного контроля поверхности изделия в процессе механической обработки.

### **2. Принцип действия оптоэлектронной координатно-измерительной системы**

Оптоэлектронная координатно-измерительная система предназначена для бесконтактного измерения геометрии 3D объектов (лопасти гидротурбин в процессе производства).

Работа системы основана на использовании структурированного освещения и триангуляционного принципа детектирования изображения исследуемого объекта (рис.1). Исследуемый объект освещается структурированным светом и наблюдается с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемое 2D изображение содержит искажения, кодирующие информацию о третьей координате (дальности).

Увеличение размеров измерительного объема достигается за счет изменения положения проектора и камеры в пространстве и не вносит принципиальных изменений в алгоритм обработки, лишь усложняя процесс калибровки измерительной системы.

*Принцип действия измерительной системы защищен патентом РФ на изобретение №2334195, действующий с 29 мая 2006 г*

### 3. Размещение измерительной системы

Размещение измерительной системы выполнено по временной схеме на разметочном участке цеха №19 на территории ОАО «Силловые машины» филиал ЛМЗ в г. Санкт-Петербурге. Проведены измерения геометрии лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781). Лопасть имеет линейные размеры 2,5х2х1м.

В измерительной системе в качестве источника оптического излучения и пространственного модулятора интенсивности освещения использован цифровой проектор NEC VT570, позволяющий управлять пространственной модуляцией интенсивности излучения с разрешением 1024х768 точек. В качестве фоторегистратора применена цифровая CCD камера КС-383С, позволяющая получать изображение размером 320х240 пикселей. В качестве цифрового электронного блока и блока регистрации результатов использован современный персональный компьютер.

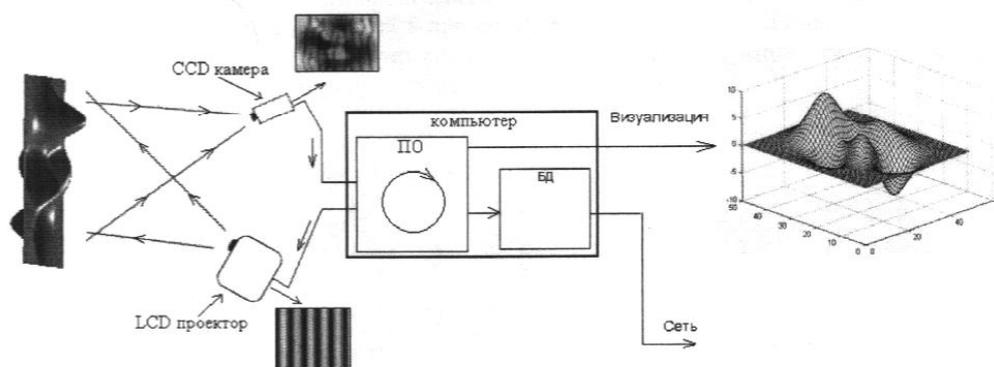


Рис.1. Работа прототипа координатно-измерительной системы

Расположение функциональных узлов измерительной системы представлено на рис.1. Расстояние между камерой и проектором составляло ~3 м. Расстояние до измеряемого объекта (лопасти) ~6 м. Измеряемая область ~3х3х2 м. Разрешение проектора 1024х768. Разрешение камеры 320х240. Количество кадров в одном измерении 1000.

Выполнена калибровка путем последовательного измерения калибровочных мишеней, локализованных в пространстве перед измеряемой лопастью.

### 4. Результаты испытаний

Измеренная поверхность лопасти гидротурбины представлена на рисунках 2-7.

На рисунке 2 и 3 показана трехмерная восстановленная поверхность лопасти и приведены фотографии. На рисунке 4-7 показаны примеры профиля поверхности лопасти в различных сечениях.

**Время измерения поверхности лопасти рабочего колеса (сбор и обработка информации о поверхности измеряемого объекта, представление результатов) не превышает 15 минут.**

Результаты испытаний показывают, что поверхность лопасти имеет сложную, неравномерную отражательную структуру, что накладывает повышенные требования на устойчивость алгоритма обработки данных при восстановлении профиля поверхности. Погрешность измерения составляла менее 1%.

## **5. Выводы**

Проведены измерения геометрии лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС (проба №33781). Лопасть имеет линейные размеры 2500x2000x1000 мм. Получена 3-х мерная модель, состоящая из более 30000 точек. Погрешность определения координат измеренных точек на поверхности лопасти составляет менее 1 мм.

Проведенные измерения показывают, что разработанная измерительная система позволяет измерять линейные размеры трехмерных объектов (лопасти рабочего колеса гидротурбины), с погрешностью измерения 0.1%, не зависящей от отражательных свойств поверхности.

Современный уровень развития информационных технологий позволяет использовать в качестве приемника камеру, разрешение которой на порядок выше, чем разрешение камеры, используемой в прототипе системы, а так же использовать проектор, имеющий более мощную световую силу. Это позволит существенно повысить точность измерений и достигнуть погрешность измерений менее 0,01%.

Зам. директора ОАО «ИОИТ»  
С.н.с. ИТ СО РАН  
к.т.н. Наумов И.В.

**Разработчик системы**  
С.н.с. ОАО «ИОИТ»  
Аспирант ИТ СО РАН  
Двойнишников С.В.



Н.с. ОАО «ИОИТ»  
Аспирант ИТ СО РАН  
Куликов Д.В.

## СПРАВКА

об использовании результатов разработки «Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 ЛМЗ» на ОАО «Силовые машины» филиал «Ленинградский Металлический Завод», г. Санкт-Петербург.

С начала века «Ленинградский Металлический Завод» (ЛМЗ) специализируется на производстве энергетических турбин. ЛМЗ - самая крупная турбостроительная фирма России. На ЛМЗ за 90 с лишним лет разработки и создания изготовлено более 2300 турбин общей мощностью около 300 млн. кВт, более 670 гидротурбин суммарной мощностью более 62 млн. кВт, а также около 1000 регуляторов к гидротурбинам и 60 предтурбинных затворов. ЛМЗ во многом определяет прогресс отечественного и мирового гидротурбостроения. Турбины ЛМЗ работают на крупных ГЭС, таких как Волжские, Братская, Красноярская, Усть-Илимская, Саяно-Шушенская (Россия), Майка, Сайт 1, Дженгег (Канада), Собрадиньо (Бразилия), Уитес (Мексика), Хоабинь (Вьетнам) и многих других.

В лаборатории гидротурбин ЛМЗ ведётся разработка эффективных проточных частей, исследования новых материалов и надёжности конструкций. Работающие в 30 странах Европы, Азии, Африки и Америки гидравлические турбины подтверждают основательность опыта ЛМЗ в гидротурбостроении. В планах ЛМЗ поставка гидротурбин, регуляторов и затворов для электростанций Индии, Аргентины, Ирака, Казахстана, Ирана, Латвии и России.

Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской Академии Наук специально для ЛМЗ разработана, изготовлена и внедрена в апреле 2004 года новейшая лазерная измерительная система ЛАД-05 ЛМЗ для стендовых испытаний и оптимизации различных моделей турбин и их последующей сертификации. При заключении контракта Заказчик рассматривал предложения ряда зарубежных фирм, в частности, фирмы «Dantec» и по совокупности технико-экономических параметров предпочел разработку ИТ СО РАН. Работы успешно выполнены в рамках Договора № 842 от 17.03.2003 между ОАО ЛМЗ и ИТ СО РАН г. Новосибирск на создание «Лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 ЛМЗ».

Целью работы являлось изготовление и оснащение большого кавитационного стенда новейшей лазерной доплеровской измерительной системой (ЛДИС), предназначенной для определения кинематических параметров закрученных гидродинамических потоков и определения влияния параметров крупномасштабных винтовых вихревых структур на процессы переноса в закрученных потоках за рабочим колесом турбины.

Лазерный измерительный комплекс ЛАД-05 ЛМЗ предназначен для диагностики газожидкостных многофазных мутных потоков в режиме обратного светорассеяния. Впервые разработана новая анаморфотная схема лазерного анемометра, позволившая применить современные мощные полупроводниковые лазеры с низкой степенью пространственной и временной когерентности, существенно улучшившие характеристики анемометра. Впервые разработана ветроенная система обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур «Field Programmable Gate Array», разработана новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Основные параметры анемометра соответствуют лучшим мировым аналогам (DANTEC, TSI) при существенно меньших габаритах и стоимости.

Техническая приемка по результатам заводских испытаний лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 ЛМЗ произведена 9 апреля 2004 года на предприятии Заказчика. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 ЛМЗ соответствует заявленным техническим характеристикам и признана годной для эксплуатации. Впервые проведены натурные эксперименты для всех режимов работы гидротурбины Френсенса, получена интегральная оценка погрешности по расходу двухфазного кавитирующего потока не более 2 %.

Справка дана Двойнишникову Сергею Владимировичу, результаты работы которого использованы в лазерном измерительном комплексе «ЛАД-05 ЛМЗ», для представления в диссертационный совет.

Главный конструктор гидротурбин  
Начальник СКБ «Гидротурбомаш» ЛМЗ



В.А. Демьянов