На правах рукописи

Кульчицкий Александр Александрович

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Официальные оппоненты:

Русинов Леон Абрамович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, заведующей кафедрой;

Аббакумов Константин Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, заведующий кафедрой;

Махов Владимир Евгеньевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, ВИ НИИ, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 23 июня 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ диссертационного совета — КОПТЕВА Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Проблема автоматизации допускового контроля размеров изделий и технологического оборудования по 9-14 квалитетам достаточно остро стоит для многих отраслей промышленности. В настоящее время основными средствами измерения в данном диапазоне остаются ручные измерительные инструменты: штангенциркули и микрометры.

Кроме определения размеров изделий актуальной проблемой является контроль параметров положения элементов объектов. Проблема обусловлена необходимостью получения измерительной информации при отсутствии реально обозначенных баз. В качестве примера можно привести задачи контроля колес автомобильного и железнодорожного транспорта, соосности валов трансмиссий, положения инструмента при глубоком сверлении.

Задачи контроля геометрических параметров актуальны не только для машиностроения, но и для других отраслей, например, металлургической. В качестве примера можно привести задачу контроля состояния токоподводящих штырей на электролизерах с самообжигающимися анодами. На отечественных металлургических предприятиях (Братском, Красноярском, Новокузнецком и Иркутском алюминиевом заводах (ОК РУСАЛ)) контроль их состояния реализуется методами масс-контроля и визуального контроля с применением контактных стандартных шаблонов (матриц).

Оптические системы контроля могут обеспечить решение широкого круга задач контроля поверхностных свойств изделий, в том числе и геометрических параметров. При оценке геометрических параметров принципиально важно обеспечить требуемую степень подобия изображения объекту контроля, которая в настоящее время в основном достигается конструктивно-технологическими методами, что приводит к существенному удорожанию таких систем. Данная задача становится тем актуальнее, что современной тенденцией является увеличение разрешения камер до 16…25 Мп. Использование камер с высоким

разрешением позволяет расширить применение систем машинного зрения к задачам контроля геометрических параметров, обеспечив возможность контроля с относительной погрешностью менее 0,05 %.

Степень разработанности темы исследования. Основой для разработки оптических систем контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением являются труды по теории оптических искажений: Волосова Д.С., Русинова М.М., Сокольского М.Н., *Brown D.C., Ebner H.*; расчёту оптико-электронных средств контроля: Якушенкова Ю.Г., Мирошникова М.М., Абдулова А.Н., Васильева Л.А., Гебеля И.Д., Зарезанкова Г.Х., Коротаева В.В., Шилина А.Н.; системам контроля геометрических параметров изделий оптическим методом: Сысоева А.Д., Трутеня В.А., Хофмана Д., Сарвина А.А., Коняхина И.А., Потапова А.И., Махова В.Е.; описанию действия зеркальных оптических преобразователей: Лебедева Н.В., Грейма И.А., Погарева Г.В., Чуриловского В.Н., Сарвина А.А.; моделям калибровки цифровых камер: Амромина П.Д., Антипова И.Т., Быкова А.Л., Гельмана Р.Н., Дубиновского В.Б., Лобанова А.Н., Погорелова В.В., *Zhang Z., Bradski G., Kaehler A., Maybank S.J., Pratt W., Sturm P.F., Tsai R.Y.* и *Hornberg A.*

Таким образом, можно отметить, что потребность в совершенствовании систем контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением исходит из практической необходимости повышения точности процессов измерений размеров изделий и элементов технологического оборудования при автоматизации производств различных отраслей промышленности с использованием доступных аппаратных средств. Использование цифровых камер с нетелецентрической оптикой в таких системах позволяет снизить их стоимость, и, соответственно, повысить доступность решений и расширить функциональные возможности за счет увеличения разнообразия возможных схем получения измерительной информации, позволяющих работать как в проходящем, так и в отраженном свете. Последнее является важным условием

применения их совместно с зеркальными преобразователями, с использованием которых можно решить проблему компенсации погрешности позиционирования без увеличения количества камер. Все это в совокупности и определяет актуальность решаемой проблемы.

Цель работы - повышение точности измерений и достоверности контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования автоматическими системами оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением.

Объект исследования – комплексный контроль изделий (плоских и осесимметричных) и технологического оборудования.

Предмет исследования – автоматические системы контроля параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением, использующие для приема измерительной информации цифровые камеры с нетелецентрической оптикой.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач:**

1. На основании анализа современного состояния методов и средств контроля геометрических параметров изделий и состояния технологического оборудования, в том числе и систем оптического контроля, выявить тенденцию их развития, используемую элементную базу и программное обеспечение.
2. Разработать модели трансформации измерительной информации вращающимися зеркалами и рекомендации по их использованию в качестве измерительных преобразователей для средств контроля геометрических параметров.
3. Определить основные источники погрешностей оптических систем контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования, использующих в качестве приемного устройства цифровые камеры с нетелецентрической оптикой и работающих в проходящем свете, провести их исследование и разработать алгоритмы компенсации основных погрешностей.

4. Разработать методики выявления основных видов пороков прозрачных изделий (стекол и стеклянных изделий) для оценки их качества в соответствии с требованиями стандартов.
5. Исследовать особенности получения измерительной информации о размерах изделий типа «тела вращения» системами оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением, использующих цифровые камеры с нетелецентрической оптикой для регистрации параметров объектов контроля в отраженном свете, разработать геометрические и аналитические модели процесса получения измерительной информации, алгоритмы и программное обеспечение для компенсации погрешностей.
6. Разработать и обосновать схемы контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования с использованием оптических преобразователей на основе плоских зеркал для расширения функциональных возможностей и упрощения структуры регистрации измерительной информации.
7. Разработать новый способ и средства контроля положения плоскости вращения, основанные на свойствах вращающихся зеркальных преобразователей и произвести их точностной анализ.
8. Выполнить анализ схем контроля и разработать алгоритмы и программное обеспечение для определения геометрических параметров брикетированного материала в процессе его перемещения.

Идея работы. Для повышения точности измерения и достоверности контроля параметров изделий и технологического оборудования системами автоматического комплексного оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением, использующими в качестве приемного устройства цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием, необходимо на основе моделей процесса передачи измерительной информации, учитывающих особенности объектов контроля, разработать схемы получения измерительной информации и методики компенсации основных источников погрешностей для более полной реализации возможностей аппаратной части, позволяя

снизить погрешности измерения размеров до величины сопоставимой с разрешением цифровых камер – 2 px (~0,1% для камер с разрешением 5 Мп).

Научная новизна работы:

1. Теория зеркальных систем дополнена конической моделью действия оптических преобразователей на основе вращающихся плоских зеркал и аналитическими зависимостями, описывающими связь между координатами предметной точки и ее отображением в системе из одного, двух и более вращающихся зеркал с параметрами их положения.
2. Разработана модель калибровки цифровых камер, основанная на коррекции сегментированного изображения для восстановления геометрического подобия изображения объекту контроля, отличающаяся тем, что коррекция изображения реализуется переносом изображения в восстановленную сетку.
3. Получены аналитические зависимости, описывающие особенности получения измерительной информации об основных формообразующих размерах осесимметричных объектов по изображениям их сечений оптической системой контроля геометрическим методом с пространственным разрешением, использующей в качестве приемников информации цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием.
4. Разработана новая методика выявления основных пороков листовых изделий из прозрачных материалов, основанная на использовании яркостных и геометрических признаков, а также управлении освещением, и алгоритмическое обеспечение, учитывающее классификацию пороков и позволяющее определить их параметры для контроля качества изделий в соответствии с требованиями стандартов.
5. Разработаны алгоритмы компенсации погрешностей определения размеров плоских и осесимметричных деталей системами оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением для повышения точности измерений за счет уменьшения систематических и случайных погрешностей, учета особенностей калибровки (определением

допустимого угла отклонения тест-объекта) и проекционной погрешности тел вращения.

6. Доказана возможность реализации активного способа контроля положения вращающейся плоскости, основанного на анализе формы и параметров траектории движения отображения световой марки во вращающихся зеркалах, сопряженных с объектом контроля, для исключения субъективных погрешностей установки измерительного преобразователя.
7. На основе полученных аналитических соотношений, описывающих получение измерительной информации при нефиксированном положении объектов контроля, предложены и обоснованы новые схемы получения измерительной информации для оптических систем контроля осесимметричных объектов, обеспечивающие возможность компенсации смещения объекта контроля и возможность регистрации всей его поверхности при помощи одной камеры и зеркального преобразователя.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке:

1. Методики оценки погрешностей оптических систем измерения геометрических параметров по изображению объектов контроля, использующей в качестве приемников информации цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием, для анализа точности разрабатываемых систем контроля.
2. Устройства автоматизированного детектирования пороков стекла, использующего в качестве приемного устройства цифровую камеру и включающего систему управляемой подсветки, которая обеспечивает повышение достоверности контроля за счет повышения вероятности определения пороков до 0,92-0,98 (для разных видов пороков) без перебраковки.
3. Программного обеспечения компенсации основных погрешностей автоматических систем оптического контроля размеров объектов геометрическим методом с пространственным разрешением для повышения точности измерений геометрических параметров изделий.
4. Программного обеспечения для калибровки цифровой камеры на основе модели дискретизации пространства изображений для

коррекции искажений оптического тракта и положения объекта контроля.

5. Способа определения положения тест-объекта и реализующего его программного обеспечения для уменьшения погрешностей измерений осесимметричных объектов цифровыми камерами с оптической системой с фиксированным фокусным расстоянием.
6. Программы контроля размеров осесимметричных изделий с компенсацией перспективной ошибки одноканальной оптической системы.
7. Способа и программного обеспечения активного контроля положения плоской поверхности в пространстве.
8. Устройства контроля положения вращающейся плоскости, основанного на анализе формы и параметров траектории движения отображения световой марки во вращающихся зеркалах, сопряженных с объектом контроля.
9. Программного обеспечения для систем контроля размеров брикета на ленте конвейера.

Методология и методы исследований. Общей методологической основой работы является системный подход, включающий анализ и научное обобщение работ в области оптического контроля геометрических параметров. Теоретические исследования базировались на физических основах геометрической оптики и теории цифровой обработки сигналов. Моделирование передачи измерительной информации проводилось аналитическими, численными и графическими методами. Экспериментальные исследования выполнялись на разработанных стендах.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Уменьшение погрешности измерения геометрических размеров плоских изделий по их изображению системами комплексного оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением в проходящем свете при применении цифровых камер с объективами с фиксированным фокусным расстоянием обеспечивается за счет использования разработанного алгоритмического метода компенсации погрешностей, включающего предложенную модель калибровки цифровых камер, который позволяет определить размеры

листовых изделий с погрешностью до ±0,02 мм (для камеры с разрешением 5 Мп и объективом с фокусным расстоянием 25 мм), что соответствует требованиям обеспечения достоверности допускового контроля по 9-10 квалитетам для размеров изделий в диапазоне 100…250 мм.

2. Повышение достоверности контроля пороков листовых изделий из прозрачных материалов достигается применением разработанного алгоритмического обеспечения и автоматизированной системы контроля качества, использующей не только яркостные и геометрические признаки, но и управление освещением для классификации пороков, обеспечивая увеличение коэффициента выделения дефектов до 0,92 без перебраковки.
3. Компенсация систематических проекционных погрешностей измерения основных формообразующих размеров осесимметричных деталей системами оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением по изображениям их сечений при применении цифровых камер с объективами с фиксированным фокусным расстоянием достигается за счет использования полученных аналитических зависимостей, учитывающих положение тест-объекта и проекционные составляющие погрешностей, что позволяет уменьшить погрешность измерения основных формообразующих размеров в отраженном свете с неколлимированной подсветкой для камер с разрешением 5 Мп и объективом с фокусным расстоянием 12 мм до 0,08 мм.
4. Расширение функциональных возможностей оптических систем контроля геометрическим методом с пространственным разрешением обеспечивается использованием преобразователей из плоских зеркал, позволяя с помощью одной цифровой камеры производить оценку состояния всей поверхности объекта контроля, определять его основные формообразующие размеры и компенсировать погрешности базирования объекта контроля в пределах ± 5% от рабочей дистанции.
5. Исключение субъективных погрешностей установки измерительных преобразователей при определении положения

вращающейся плоскости с погрешностью до 1′ для малых углов отклонений оси вращения (до 2°) обеспечивается разработанной системой активного контроля, в основу которой положен анализ формы и параметров траектории движения отображения световой марки во вращающихся зеркалах, сопряженных с объектом контроля, за счет использования информации о взаимном расположении объекта контроля, измерительного преобразователя и устройства контроля.

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на строгих теоретических подходах геометрической оптики, адекватных математических моделях передачи измерительной информации, подтверждённых в ходе исследований численными и графическими методами, результатами экспериментальных исследований, разработанных систем контроля и алгоритмов компенсации, и сравнений полученных результатов с измерениями средствами более высокого класса согласно методикам их применения.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VIII научно-технической конференции “Экстремальная робототехника” (С-Пб., СПбГТУ и ЦНИИиОК РТК, 16-17 апреля 1997 г.); IX научно-технической конференции “Экстремальная робототехника” (С-Пб., СПбГТУ и ЦНИИиОК РТК, 14-15 апреля 1998 г.), Третьей всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» (СПб.: СЗПИ, 21-23 ноября 2009 Г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию вуза «Системы и процессы управления и обработки информации» (СПб., СЗТУ, 15-17 марта 2010); II международной научно–практической конференции «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении», (СПб., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 24 апреля 2014); Международной научно-практической конф. «Шаг в будущее:

теоретические и прикладные исследования современной науки» (СПб., 01-02 ноября 2016 г.); Шестом международном круглом столе «Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук» ПАО ГАЗПРОМ, ООО "Газпром трансгаз Казань" (Казань, 31 октября 2018 г.); Международной научной конференции "*Applied Physics, Information and Engineering Technologies* – APITECH 2019" (Красноярск, 25-27 сентября, 2019 г.); Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» - *International Conferenceon Metrological Supportof Innovative Technologies - ICMSIT*-2020 (СПб. - Красноярск, 04 марта 2020 г.); XXIII международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (СПб., 1-5 июня 2020 г.).

Личный вклад автора в работу. Автор осуществил постановку задач исследований, провел анализ существующих решений и теоретических положений, выполнил разработку моделей передачи измерительной информации и методик компенсации погрешностей, используя результаты геометрического моделирования и численные методы, теоретически обосновал предложенные методики, непосредственно участвовал в разработке экспериментальных стендов и опытных образцов средств измерений, планировании исследований и получении экспериментальных данных.

Реализация (внедрение) результатов работы. Результаты диссертационной работы использовались при оценке возможности применения систем технического зрения для решения задач диагностики и мониторинга роторного оборудования при реализации автоматизированных систем диагностики и онлайн мониторинга состояния промышленного оборудования ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ» и при проведении сравнительного анализа средств оптического контроля для оценки их точности для решения задач мониторинга качества вагонных колёс на линии выходного контроля с целью выбора и обоснования концепции построения системы АО «Энертек».

Результаты диссертационных исследований использовались в учебных курсах: «Автоматизация измерений», «Автоматизация

производственных процессов», по специальности 220700 - «Автоматизация технологических процессов и производств» в Северо-Западном государственном техническом университете; и используются в настоящее время в учебных курсах «Бесконтактные способы контроля и измерений в машиностроении» по специальности 15.03.04 - «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Современные системы контроля в металлургии» по направлению 09.06.01 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (металлургия)» в Санкт-Петербургском горном университете.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 48 печатных работах, в том числе в 6 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 9 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (*Scopus, Web of Science*). Получен 1 патент на полезную модель и 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ**.**

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 382 страницы, список используемых источников из 283 наименований и 2 приложений на 2 страницах. В состав основной части входят 249 рисунков и 56 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору Потапову Анатолию Ивановичу за помощь, оказанную при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель исследований и выполнена постановка задач. Показана научная новизна и практическая ценность работы, реализация результатов работы, личный вклад автора в работу и апробация работы.

В первой главе выполнен анализ объектов контроля для систем реализующих пространственный метод оптического излучения. Из рассмотренной номенклатуры изделий объектами контроля оптико-электронными средствами могут быть классы 71, 72, 74 с оговорками 75 в соответствии с классификацией по ГОСТ 31254-2004.

Исследование средств контроля геометрических параметров показало, что использование координатно-измерительных машин для контроля листовых и осесимметричных изделий нецелесообразно.

Для контроля осесимметричных изделий в настоящее время используются проекционные оптико-электронные средства измерений, которые используют телецентрические оптические системы с коллиматорной подсветкой. Однако их использование сильно удорожает систему, ограничивает компоновочные решения (контроль изделий только в проходящем свете) и область контроля, определяемую полем зрения существующих объективов, до 340 мм.

Средства активного 3D оптического сканирования имеют более высокую стоимость оборудования и низкую точность для объектов малых (до 100 мм) и сопоставимую для средних размеров (до 2000 мм) по сравнению с проекционными методами. Использование пассивных бинокулярных измерительных систем ограничивает несовершенство алгоритмов определения характерных точек объектов контроля. Использование маркеров и структурированной подсветки для сведения стереопар позволяет повысить точность определения геометрических параметров изделий, однако точность измерения остается недостаточно высокой.

В целом литературный обзор показал, что использование оптических систем контроля с регистрацией результатов измерений цифровой камерой представлено отдельными частными решениями и не имеет единой теоретической базы.

Во второй главе рассмотрены математические методы моделирования процесса передачи измерительной информации системами контроля геометрических параметров пространственным методом оптического излучения.

Основой для рассмотрения являются базовые положения геометрической оптики. Описание закономерностей рассмотрено на примере идеальной оптической системы.

Теория зеркальных оптических преобразователей дополнена конической моделью действия вращающихся зеркал. Предложено рассматривать траекторию движение изображения точки во вращающемся одиночном зеркале (ОЗ) как сумму двух простых движений: вращательного и поступательного рисунке 1а. Изображение точки *M* во вращающемся ОЗ в координатной форме описано системой (1):

$$\begin{cases} M'_x = R \times \left(\sin 2\varphi \times \cos\gamma \times \sin\alpha - \sin^2\varphi \times \sin\gamma \times \sin 2\alpha\right) \\ M'_y = R \times \left(2 \times \sin^2\varphi \times \cos^2\alpha \times \sin\gamma - \sin 2\varphi \times \cos\gamma \times \cos\alpha - \sin\gamma\right) \\ M'_z = R \times \left(\cos\gamma - 2 \times \cos^2\varphi \times \cos\gamma + \sin 2\varphi \times \sin\gamma \times \cos\alpha\right) \end{cases} . \quad (1)$$

Характер изменения траектории движения изображения точки во вращающемся ОЗ при изменении угла наклона зеркала – φ показано на рисунке 1б, а при изменении угла γ на рисунке 1в.

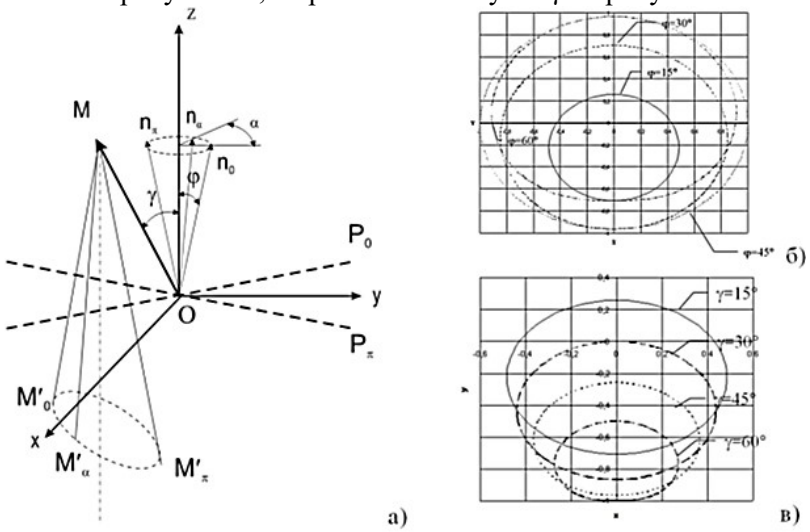


Рисунок 1 – Модель и характер изменения размеров и формы траектории движения изображения точки во вращающемся ОЗ при изменении углов φ и γ

Разработанная модель может быть основой для рассмотрения действия ЗС, состоящей из любого количества вращающихся зеркал, используя в качестве прообраза изображение точки в предыдущем зеркале, а полученные зависимости использованы при построении систем контроля положения вращающейся плоскости.

Энергетические аспекты передачи измерительной информации рассмотрены как основа построения активных систем контроля геометрических параметров. В результате исследования установлено, что соотношения геометрических и энергетических параметров пространства предметов и пространства изображений выражаются нелинейными функциями. Нелинейность функции характеризуется фокусным расстоянием объектива.

В третьей главе представлены результаты исследования основных источников погрешностей оптических систем контроля геометрических параметров пространственным методом оптического излучения с 2D разрешением и методов их компенсации.

Выделены и рассмотрено влияние основных составляющих погрешностей систем контроля: инструментальных - погрешностей идеальной оптической системы: определения координат, положения объекта контроля (линейного ΔL и углового $\Delta\psi$), фокусного расстояния объектива; аберраций оптической системы; шума матричного фотоприемника; методических - фокусировки оптической системы; вызванных рефракцией оптической среды; посторонние засветки; оптические свойства поверхности измерения; погрешности обработки измерительной информации (определение порогового значения бинаризации).

Для систем активного типа проведено исследование влияния формы штрих марки на выходную функцию при биссекториальной схеме наведения.

Рассмотрены методы калибровки и предложена методика калибровки цифровых камер (РМК), основанная на коррекции сегментированного изображения. Для оценки искажений изображения используется тест-объекта в виде сетки взаимно перпендикулярных линий. Его исходное изображение представлено на рисунке 2. Отдельная ячейка, сетки тонких линий, соответствует

фоточувствительной ячейке матрицы – пикселю (*px*). Жирными линиями изображены оси линий тест-объекта.

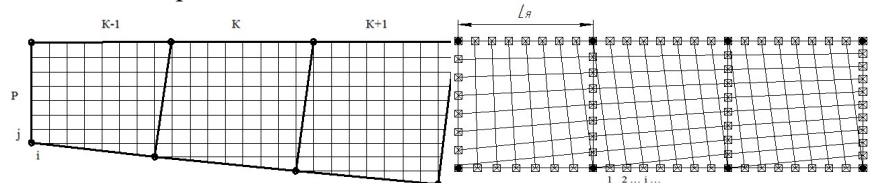


Рисунок 2 - Исходное и восстановленное изображение тест-объекта

На рисунке 2 буквами *K* и *P* – обозначены номера ячеек тест-объекта соответственно по горизонтали и вертикали, а индексами *i* и *j* – номера пикселей в ячейке тест-объекта (*i*=1…*n*; *j*=1…*m*).

В наиболее простом варианте алгоритма компенсации сетка тест-объекта (для заданной точности определения геометрических параметров объектов контроля ±1px) привязывается к точке пересечения границ пикселей (а не к середине пиксела, как в большинстве существующих методик). Координата границы *i*-го и *j*-го восстановленного пикселя в текущей ячейке вычисляются по формулам (2) и (3):

$$X_i^K = i \cdot \frac{L_я - \left(1 - \frac{\delta_{K+1} - \delta_{K-1}}{2}\right)}{N} + \frac{L_я \cdot \frac{\delta_{K+1} - \delta_{K-1}}{2}}{\sum_{i=1}^{N} i} \cdot \sum_{i=1}^{n} i \ , \qquad (2)$$

$$Y_j^P = j \cdot \frac{L_я - \left(1 - \frac{\delta_{P+1} - \delta_{P-1}}{2}\right)}{M} + \frac{L_я \cdot \frac{\delta_{P+1} - \delta_{P-1}}{2}}{\sum_{j=1}^{M} j} \cdot \sum_{j=1}^{m} j \ , \qquad (3)$$

где $L_я$ – длина ячейки сетки тест-объекта (в мм); $\delta_{к+1}$, $\delta_{к-1}$ и δ_{P+1}, δ_{P-1} – относительное изменение размера горизонтальной и вертикальной ячеек тест-объекта на изображении.

Достоинством разработанной модели является возможность обеспечения заданной точности калибровки во всем поле зрения. Недостатками – значительно большая чувствительность к точности изготовления тест-объекта, распознавания его базовых точек и отсутствие прямого геометрического подобия между пикселями исходного и трансформированного изображения, что обуславливает необходимость передискретизации изображения для дальнейшей обработки полученного изображения. Для компенсации последнего

недостатка предложена реализация РМК на основе операции морфинга изображений с использованием *warping* – фильтра.

Для компенсации основных источников погрешностей оптических систем комплексного контроля геометрии изделий при фиксированном положении объекта контроля, предложена методика и разработан алгоритм. Для ее реализации, кроме изображения объекта контроля, необходимо получить: калибровочное изображение тест-объекта и изображение фона. Обработка изображения включает следующую последовательность действий: вычитание фона, подавление шума матрицы, компенсации геометрических искажений изображения в оптическом тракте, бинаризация изображения.

В четвертой главе рассмотрены решения задач контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования пространственным методом оптического излучения как функции двух координат, учитывающие специфику объектов контроля и вопросы оценки их точности.

Предложена методика детектирования основных пороков прозрачных материалов. На рисунке 3 показан предлагаемый обобщенный алгоритм оценки качества светопрозрачных изделий.

Рисунок 3 – Обобщенный алгоритм оценки качества светопрозрачных изделий

В предлагаемой системе контроля распознавания пороков листового стекла используется монохромное изображение, полученное цифровой камерой. Определенный класс дефектов можно выделить, используя пороговую фильтрацию по яркости. Проведенные исследования показывают, что использование фильтра *Laplace* с матрицами 3×3 и 5×5 дает возможность выделить границы линейных пороков при обработке изображений стекол без изменений его размеров, что позволяет повысить коэффициент выделения дефектов (для стекол соответственно пороков) при оценке качества стекла.

Для распознавания светопрозрачных внутренних дефектов стекла (пузырь, свиль и скол) необходимо ввести дополнительный признак – теневой, методологическая сущность которого заключается в его проявлении при определенных углах освещения и отображена на рисунке 4.

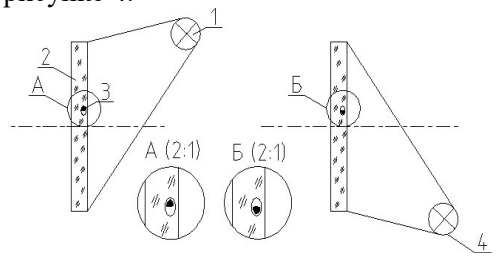


Рисунок 4 – Теневой признак для выявления светопрозрачных внутренних пороков листового стекла

Для подсветки попеременно используется верхний источник подсветки объекта контроля 1 или нижний источник подсветки объекта контроля – 4, освещающий листовое стекло 2, содержащее порок пузырь 3. На увеличенных фрагментах стекла А и Б показано формирование теневого изображения.

Исследованы особенности получения измерительной информации при контроле осесимметричных изделий цифровой камерой с объективом с фиксированным фокусным расстоянием. Разница в наблюдаемом и действительном размерах сечений тела вращения наглядно продемонстрирована на рисунке 5. Изображение получено цифровой камерой с объективом с f=6 мм.

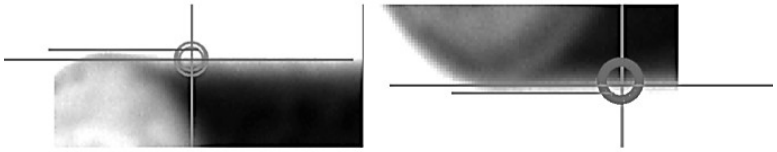


Рисунок 5 – Фрагмент изображения детали цифровой камерой с объективом с f=6 мм

На рисунке 6 представлена схема формирования изображения тела вращения цифровой камерой, оснащенной объективом с фиксированным фокусным расстоянием.

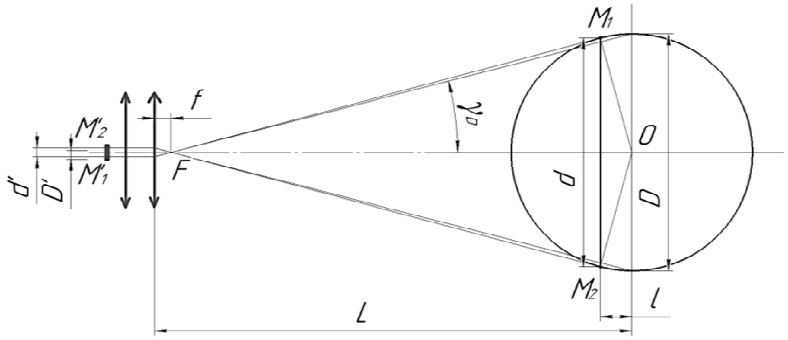


Рисунок 6 – Формирование изображения тела вращения цифровой камерой, оснащенной объективом с фиксированным фокусным расстоянием

Вспомогательный луч, проходящий через фокус изображения к поверхности вращения радиусом D, проходит под углом γ_D (4):

$$\gamma_D = \arctan \frac{D/2}{L-f}, \quad (4)$$

где D – диаметр объекта, L – расстояние до объекта (рабочее расстояние), f – фокусное расстояние.

Из рисунков 5 и 6 видно, что фиксируемый прообраз сечения тела вращения D имеет видимый размер d, наблюдаемый соответственно под углом $\gamma_d \geq \gamma_D$. Причем $d \leq D$ и равен (5):

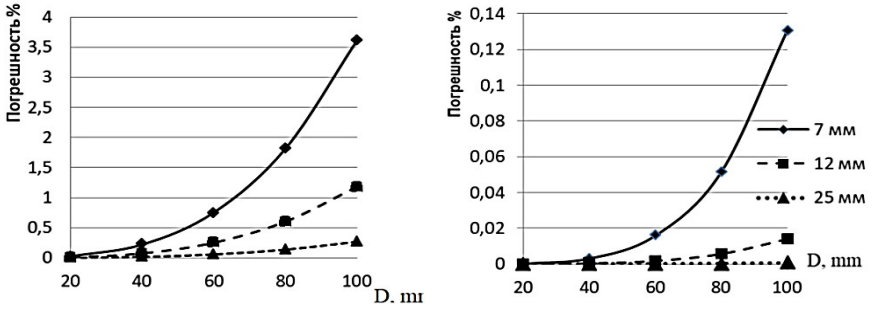
$$d = D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D/2}{L-f}\right)^2} \quad . \qquad (5)$$

Результаты моделирования проекционной ошибки для идеальной оптической системы и ее коррекции при определении размеров элементов вращения представлены на рисунке 7.

Для компенсации перспективной ошибки можно использовать зависимости (6):

$$D = D_{\text{нк}} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{d'}{2f}\right)\right) \text{ или } D = D_{\text{нк}} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{D_{\text{нк}}}{2(L-f)}\right)\right), \qquad (6)$$

где $D_{\text{нк}}$ – диаметр, полученный в результате измерений по изображению, d' – размер изображения сечения тела вращения.



а) б)

Рисунок 7 – Суммарные погрешности определения размеров тела вращения, для систем с f = 7, 12 и 25 мм:
а) без коррекции и б) с коррекцией

Источником погрешности при контроле тел вращения является также смещение оси симметрии тела вращения относительно оптической оси. При смещении на расстояние y происходит поворот изображения на угол α. Это приведет к смещению изображения в горизонтальной плоскости и изменению размера изображения на величину Δ_α, определяемую по (7):

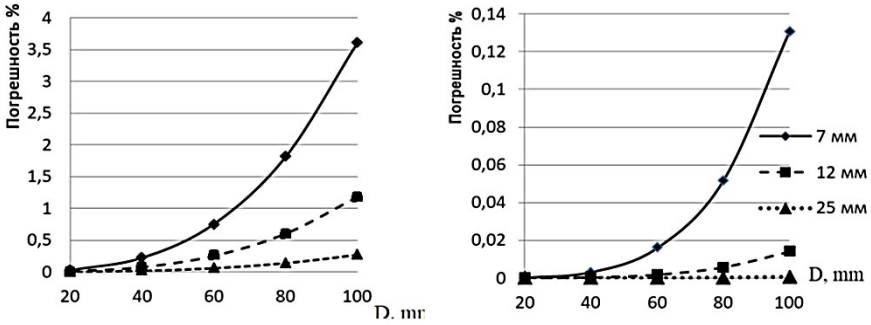
$$\Delta_\alpha = D \cdot \cos\alpha \quad , \qquad (7)$$

где $\alpha = \arctan\left(\frac{y}{L-l}\right)$.

При калибровке системы контроля тел вращения следует соблюдать условие перпендикулярности тест-объекта оптической оси объектива, поскольку нарушение этого условия (β≠0) вызовет проекционную ошибку, величину которой можно оценить выражением (8):

$$\Delta_\beta = D \cdot \cos\beta \quad . \qquad (8)$$

Графики погрешности определения диаметров тел вращения для рассмотренных источников погрешностей приведены на рисунке 8.



а) б)

Рисунок 8 – Погрешности определения диаметров тел вращения: а) при не пересечении оптической оси с осью вращения контролируемой детали; б) при нарушении условия перпендикулярности тест-объекта оптической оси

Поскольку оптическая ось является не явно выраженной базой для определения положения тест-объекта, разработан алгоритм определения параметров его положения на основе анализа параметров изображения его опорных точек. Расчетная схема для контроля положения тест-объекта приведена на рисунке 9.

Известными параметрами для расчета являются: расстояния между контрольными точками тест-объекта *AB*=*CD*, размеры изображений AB'_{p} и CD'_{p} (определяемые в *px*) и фокусное расстояние объектива *f*.

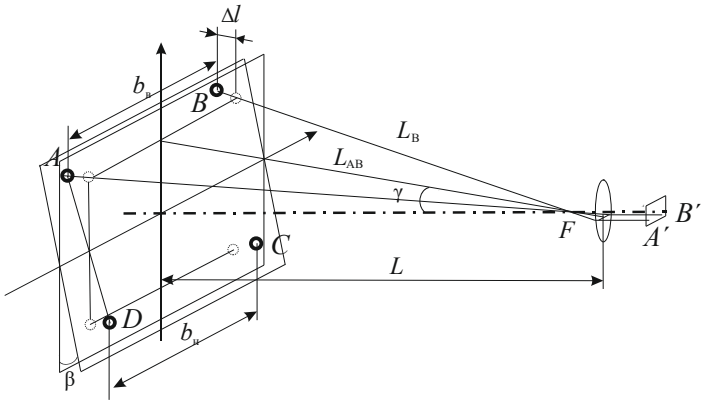


Рисунок 9 – Расчетная схема для контроля положения тест-объекта

Угол наклона тест-объекта может быть определен по зависимости (9):

$$\beta = \arctan \frac{2f\cdot\left(\left(\frac{AB}{AB'_p\cdot p}+1\right)-\left(\frac{2}{\frac{AB'_p\cdot p}{AB}+\frac{CD'_p\cdot p}{CD}}+1\right)\cdot\sqrt{1+\left(\frac{\left(AD'_p+B\ '_p\right)\cdot p}{4f}\right)^2}\right)}{AD}. \quad (9)$$

По аналогичной зависимости можно рассчитать и наклон плоскости калибровки в перпендикулярном направлении.

Для компенсации погрешности положения на рисунке 10 показана возможная схема получения измерительной информации. Подпись «Положение 1» показывает позицию изделия в положении калибровки, а «Положение 2» – произвольное положение при производственном контроле. Введение поправочного коэффициента на основе зависимости изменения коэффициента линейного увеличения $\delta V_x = \frac{L\pm\Delta X-f}{L-f}$ позволит компенсировать основную составляющую погрешности определения размеров осесимметричных изделий (для ΔX<0,05L).

Тогда размеры осесимметричного тела можно определить по (10):

$$D = D_{\text{р}}\cdot\frac{L\pm\Delta X-f}{L-f} \quad . \quad (10)$$

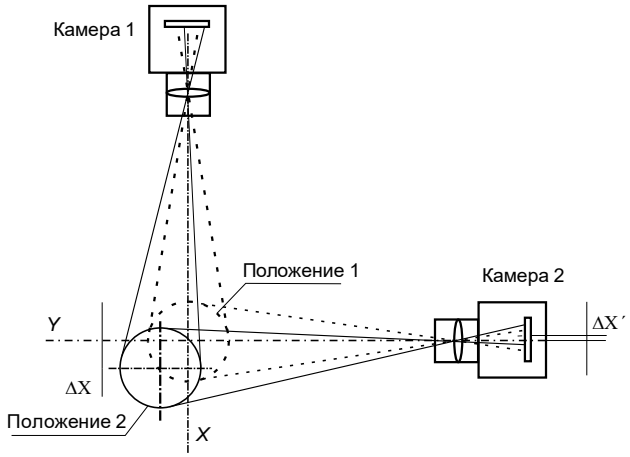


Рисунок 10 – Определения погрешности позиционирования

Расчётная схема системы контроля осесимметричных изделий с зеркальным преобразователем (ЗП), представлена на рисунке 11. При рассмотрении считаем оптическую систему идеальной, положение объекта контроля фиксированным, и ось симметрии тела вращения пересекает оптическую ось и перпендикулярна ей. Для простоты, на рисунке представлено только одно вторичное (зеркальное) изображение, поскольку закономерности формирования второго будут полностью идентичны. M_1 … M_4 показывают крайние наблюдаемые точки изделия по которым определяем его размеры.

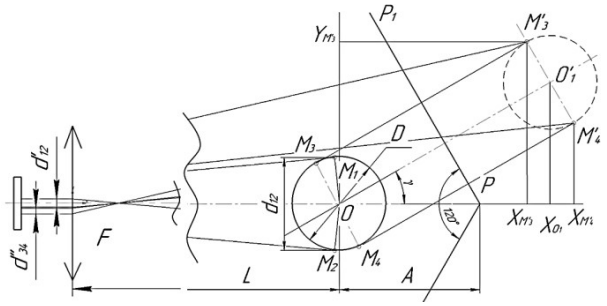


Рисунок 11 – Расчетная схема системы контроля с угловым ЗП

При этом M_1 и M_2 регистрируются непосредственно, а M_3 и M_4 через зеркало PP_1 образуя первичные образы $M_3^{'}$ и $M_4^{'}$.

Координаты положений изображений точек M_3 и M_4 в зеркале в системе координат, начало которой располагается в точке O, а ось x совпадает с оптической осью можно определить по (11) и (12):

$$X_{M_3'} = 2A \cdot cos^2\gamma - D/2 \cdot sin\gamma \text{ и } Y_{M_3'} = 2A \cdot cos\gamma \cdot sin\gamma + D/2 \cdot cos\gamma; \quad (11)$$

$$X_{M_4'} = 2A \cdot cos^2\gamma + D/2 \cdot sin\gamma \text{ и} Y_{M_4'} = 2A \cdot cos\gamma \cdot sin\gamma - D/2 \cdot cos\gamma. \quad (12)$$

Образ $d_1^{''}$ можно вычислить по формуле (13):

$$d_1^{''} = f \cdot \left(\frac{Y_{M_3'}}{L - f + X_{M_3'}} - \frac{Y_{M_4'}}{L - f + X_{M_4'}} \right), \quad (13)$$

а размер изображения $d^{'}$ определяется выражением (14):

$$d' = \frac{f}{L - f - \frac{D^2}{4 \cdot (L-f)}} \cdot D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D}{2 \cdot (L-f)} \right)^2}, \quad (14)$$

Соотношение размеров изображений при выбранном угле между зеркалами 2α=120° зависит от L, A, D, f и для рассмотренного примера (L=290 мм, A=75мм, D=50 мм и f=12мм) $d'/d_1^{''} = 1{,}484$.

Смещение вдоль объекта контроля оптической оси Δx из точки O в $O_{\Delta x}$ можно оценить двумя способами: по соотношению размеров первичного и вторичных изображений (для рассмотренного направления смещения объекта контроля центральное будет увеличиваться, а вторичные уменьшаться), и по положению вторичных изображений относительно первичного (для рассмотренного направления смещения объекта контроля изображения вторичные будут смещаться к краям). Реализация последнего способа представляется более простой.

На основе полученных закономерностей разработан алгоритм обработки изображений и коррекции вычисленных значений для комплексной компенсации погрешностей системы контроля осесимметричных изделий (рисунок 12).

Контроль положения плоскости вращения реализован на основе модели действия вращающихся зеркал с использованием следующей концепции: простыми движениями плоских зеркал (равномерное вращение) можно задавать различные

пространственные траектории точек и векторов, а по фактическим траекториям – контролировать правильность номинальных параметров зеркальной системы.

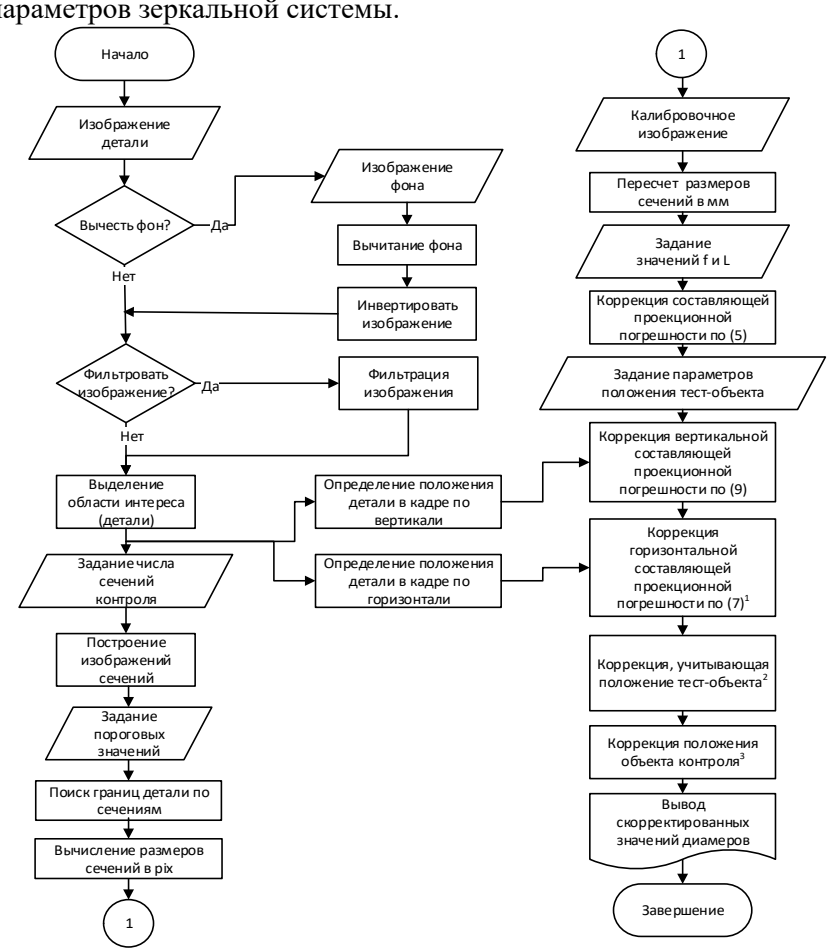


Рисунок 12 – Алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля осесимметричных изделий

Проведённый в диссертации анализ точности системы контроля положения плоскости вращения позволил сделать следующие выводы:

1. При измерении значений малых углов наклона вектора нормали плоскости к оси вращения (5…15°) доминирующей является погрешность измерения положения штрих-марки;

2. При больших углах наклона вектора нормали плоскости к оси вращения (80 - 85°) доминирующей становится погрешность задания (или определения) расстояния *b*;

3. При изготовлении и юстировке устройства особое внимание следует уделить соблюдению условия перпендикулярности положения поверхности анализа (плоскости *XOY*) относительно оси светового луча.

Характер изменений траекторий светящейся марки в плоскости анализа позволяет при расчете устройства контроля положения плоскости вращения (колеса) позволил использовать упрощенную схему расчета. Тогда угол наклона оси вращения - η можно определить используя зависимость (15):

$$\eta = \frac{1}{4}\left[\arccos\left(\frac{\Delta b}{r_1' - r_2' + \Delta b}\right) - \arccos\left(\frac{\Delta b}{r_2'' - r_1'' + \Delta b}\right)\right], \qquad (15)$$

где r_1' и r_1''координаты светящейся марки, Δb расстояние между O_1 и O_2 – оптическими осями источников излучения.

Проанализированы схемы систем контроля брикетированных материалов и состояния технологического оборудования в металлургии пространственным методом оптического излучения.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований предложенных систем контроля и алгоритмов компенсации их основных составляющих погрешностей.

Исследования проводились на разработанных стендах с использованием монохромных цифровых камер: *PILOT piA2400-17gm* (сенсор: CCD; разрешение 2456x2058), *ACE acA640-120gm* (сенсор: CCD; разрешение 659x494), *Smart Camera NI 1722* (сенсор: CCD; разрешение 640x480) и цветной *USB* камеры 5,0 МП (сенсор CMOS 1/2.5", разрешение 2592x1944) с объективами с фиксированным фокусным расстоянием: *Ricoh FL-HC0612A-VG* (*f* = 6 мм, 1/2"), *Computar M1214-MP2* (*f* = 12 мм, 2/3"), *Pentax H1214-M* (*f* = 12 мм, 2/3") и *Ricoh FL-CC2514-2M* (*f* = 25 мм, 2/3").

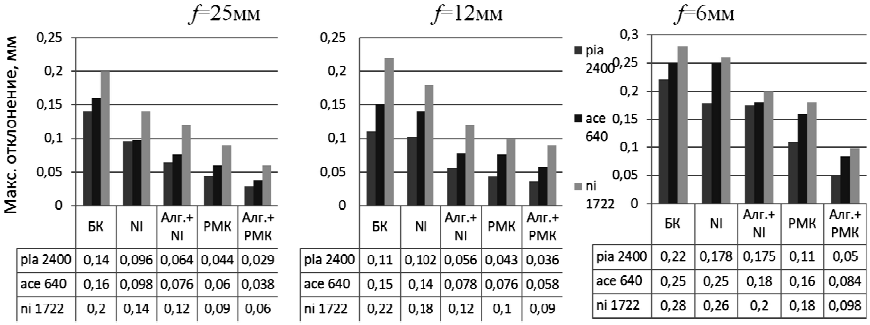
Программная составляющая систем контроля реализована с помощью программного обеспечения *National Instruments: LabVIEW* и *VisionBuilder.*

Опорные размеры образцов оценивались с использованием следующих измерительных средств: цифрового штангенциркуля *SHAHE* 0-150 мм с погрешностью измерения Δ=±±0,03мм, микрометра М-25-50-0,01 – Δ=±0,004 мм, цифрового микрометра *CDWAS* 0-25 – Δ=±0,002 мм, плоскопараллельных концевых мер и преобразователем линейного перемещения ЛИР14-20-01 2-го класса точности с устройством цифровой индикации ЛИР-510А-00. Для учета действительного положения объектов контроля использовались преобразователи: линейных перемещений ЛИР14-20-01 и угловых перемещений ЛИР-158А 500-05-ПИ.

Обобщенные результаты оценки алгоритма компенсации погрешностей систем контроля размеров листовых изделий представлены на рисунке 13, в виде гистограмм, показывающих максимальные значения погрешности определения размеров для следующих видов преобразования изображения: постоянный коэффициент линейного увеличения, (обозначен - БК); калибровка *Distortion Model: Polynomial (K*1*, K*2*, K*3*)* компании *National Instruments* (обозначена - NI), предложенный алгоритм компенсации погрешностей системы контроля в сочетании с калибровкой NI (обозначен – Алг.+NI), разработанная модель калибровки цифровых камер (обозначена – РМК), предложенный алгоритм в сочетании с РМК (обозначен – Алг.+РМК). Приведенные обозначения методик компенсации использованы при анализе результатов экспериментальных исследований.

Анализ гистограмм показывает, что разработанный способ калибровки цифровых камер в сравнении с калибровкой *Distortion Model: Polynomial (K*1*, K*2*, K*3*) Correct Tangential* обеспечивает уменьшение погрешности определения размеров более чем в полтора раза для всех сочетаний цифровых камер и объективов.

Пример результатов контроля одного размера приведен на рисунке 14, а оценка абсолютной и относительной погрешности предложенного метода калибровки в сочетании с разработанным алгоритмом компенсации - в таблице 1.



	БК	NI	Алг.+ NI	РМК	Алг.+ РМК
pia 2400	0,14	0,096	0,064	0,044	0,029
ace 640	0,16	0,098	0,076	0,06	0,038
ni 1722	0,2	0,14	0,12	0,09	0,06

	БК	NI	Алг.+ NI	РМК	Алг.+ РМК
pia 2400	0,11	0,102	0,056	0,043	0,036
ace 640	0,15	0,14	0,078	0,076	0,058
ni 1722	0,22	0,18	0,12	0,1	0,09

	БК	NI	Алг.+ NI	РМК	Алг.+ РМК
pia 2400	0,22	0,178	0,175	0,11	0,05
ace 640	0,25	0,25	0,18	0,16	0,084
ni 1722	0,28	0,26	0,2	0,18	0,098

Рисунок 13 – Сравнение максимальных значений погрешности определения размеров образцов при различных способах обработки изображений для цифровых камер с объективом *f*=25, 12 и 6 мм

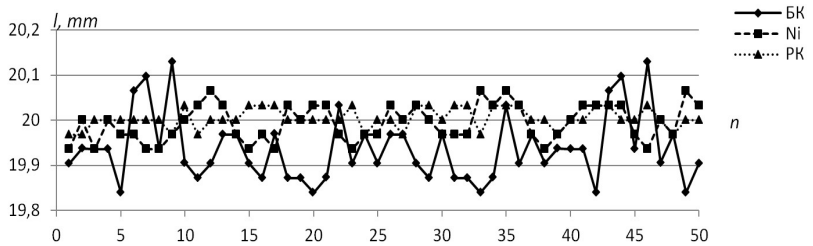


Рисунок 14 – График рассеяния размеров детали при различных способах обработки изображений для *PILOT piA2400-17gm* с объективом *f*=25 мм

Таблица 1 – Сравнительная оценка методов обработки изображений

Цифровая камера *PILOT piA2400-17gm с 25* мм объективом	БК	*NI*	РК
Абсолютная погрешность Δ, мм	±0,076	±0,04	±0,02
Относительная погрешность δ, %	±0,38	±0,2	±0,1

Полученные оценки погрешностей позволяют рекомендовать применение оптических проекционных систем, использующих цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием, для комплексной оценки геометрии листовых изделий в фиксированном положении для решения задач автоматизации

допускового контроля и обеспечения его достоверности по требованиям 9-10 квалитетам, для исследованных диапазонов размеров.

Сравнительная оценка надежности выявления пороков стекол автоматизированной системой и визуальным контролем проводилась на 10 образцах стекла с дефектами «царапина», «камень», «пузырь» посредством определения коэффициента выделения пороков (КВП) $k_в$ определяемого по выражению (17):

$$k_{\text{в}} = \sum_{i=1}^{k} m_i / k \cdot N \quad , \qquad (17)$$

где m_i – количество дефектов обнаруженных в ходе i-го эксперимента; k – количество произведённых экспериментов; N – общее количество дефектов.

На рисунке 15 представлена диаграмма, показывающая КВП для всех типов пороков. Из анализа диаграмм видно, что при визуальном контроле, в большинстве случаев, не было выявлено всех пороков стекла, КВП в диапазоне $0{,}62<k_в<1{,}2$. Использование системы автоматизированного контроля повышает вероятность выявления пороков, обеспечивая КВП в диапазоне $0{,}92<k_в<0{,}99$.

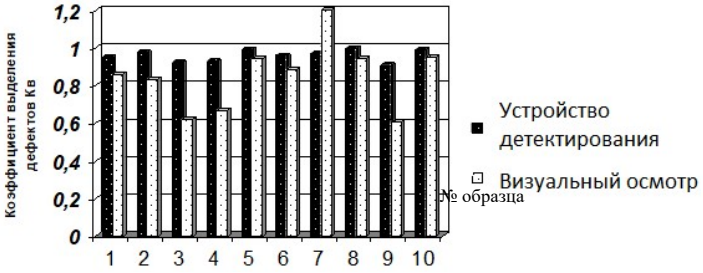


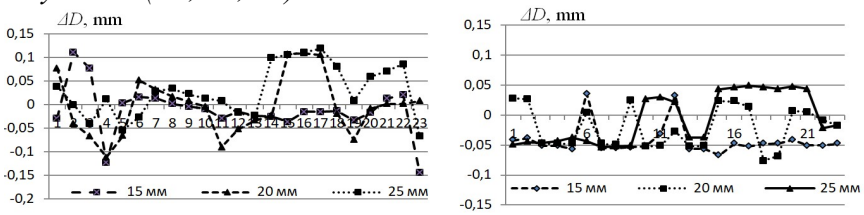
Рисунок 15 – Коэффициент выделения пороков листового стекла для 10 образцов

Результаты исследования подтвердили преимущество использования автоматизированной системы детектирования пороков стекла по сравнению с визуальным контролем, позволяя с заданной достоверностью диагностировать пороки стекла

Оценка алгоритма компенсации погрешностей системы контроля деталей типа «тела вращения» проводилась на 3 образцах

деталей, представлявших собой валики *l*=75 мм с 4 разделенными канавками поверхностями номинальным Ø15, 20, 25 мм и состояли из двух серий экспериментов с 5 перестановками образцов с 23 и 60 точками замеров с фиксированным шагом вдоль длины детали, из которых для оценки погрешности измерения использовались 19-20 и 46…49 соответственно.

Поскольку стандартные алгоритмы *NI* с использованными тест-объектами (массивы из 340 точек Ø 2мм и шагом 5 мм, размером 120×90 мм, изготовленные методом лазерной гравировки с погрешностью положения опорных точек не более 0,005 мм) не полностью скомпенсировали систематическую составляющую погрешности для камер с объективом *f*=6мм, для данного объектива исследования алгоритмов компенсации систематических погрешностей проводились с использованием разработанного метода коррекции (РМК). На рисунке 16 приведены результаты сравнения использования стандартной калибровки *DistortionModel: Polynomial (K*1*, K*2*, K*3*)* с РМК.

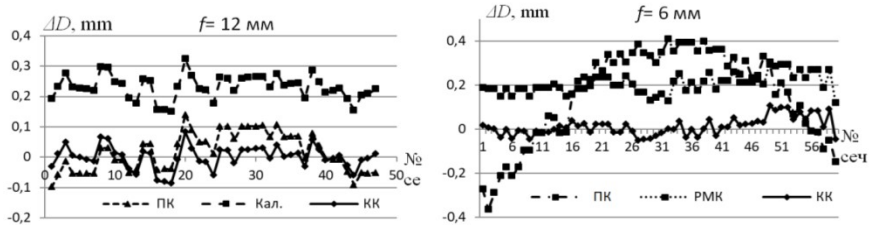


а) б)

Рисунок 16 – Погрешности определения размеров 15, 20 и 25 мм камерой 0,3 Мп камеры с объективом *f*= 6 мм со: а) стандартными калибровками и б) разработанной

При реализации алгоритмов комплексной компенсации (КК) использовалась сглаживающий фильтр (*Smoothing)* с ядром 3, поскольку проведенные в работе исследования показали, что его применение позволяет уменьшить доверительный интервал до 1,5 раз.

На рисунке 17 представлены графики, характеризующие погрешности определения размеров образца Ø 25мм цифровой камерой с разрешением 5 Мп и объективами с *f*=12 и 6 мм.



а) б)

Рисунок 17 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм камерой 5 Мп с f= 12 мм (а) и f= 6 мм (б) при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации

Количественная оценка погрешности определения размеров при использовании различных методов коррекции дополненная исследовании с объективом f= 25 мм приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка методов коррекции размеров

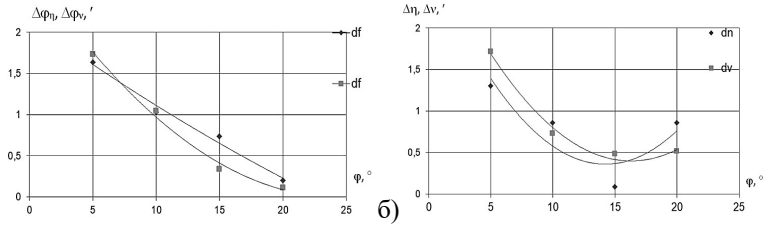
Пара-метры	Методы коррекции							
	Постоянный коэффициент		*Distortion Model*		РМК	Комплексная компенсация		
f	12	6	25	12	6	25	12	6
$\overline{M}$, мм	0,118	0,154	0,073	0,224	0,205	-0,004	0,006	0,011
$\bar{S}$,	0,135	0,264	0,081	0,237	0,211	0,026	0,057	0,042
μ*, мм	0,278	0,559	0,171	0,489	0,448	0,055	0,11	0,089

* при $t_{0,04;48}$=2,112 $t_{0,04;20}$=2,204

Разработанная методика и ПО комплексной компенсации погрешностей определения основной формообразующей геометрии осесимметричных объектов позволяет уменьшить погрешность определения размеров в отраженном свете с неколлимированной подсветкой для короткофокусной оптики до Δ=±0,1 мм, соответствующей 9-10 квалитетам точности для исследованных диапазонов размеров объекта контроля, с доверительной вероятностью 0,96. Уменьшение погрешности до 0,05% возможно при использовании более совершенных методик бинаризации изображения

Для подтверждения корректности принятой упрощенной схемы расчета устройства контроля положения оси вращения, оценки влияния углов установки ЗП и определения значений погрешностей были проведены экспериментальные исследования модели устройства контроля. Оценка точности устройства контроля положения плоскости вращения проводилась при φ = 5, 10, 15 и 20°.

Графическое отображение результатов эксперимента представлено на рисунке 18. В ходе эксперимента установлено, что упрощенную схему расчета допустимо использовать для определения положения плоскости вращения при небольших (до 2°) углах η и ν. Для контроля положения плоскости вращения с погрешностью определения ее положения до 1′ достаточно использование одиночного зеркала (ОЗ) в качестве ЗП устройства контроля. Для уменьшения погрешности определения положения плоскости вращения, ОЗ необходимо закреплять под углом 15 - 20° к плоскости вращения колеса.



а) б)

Рисунок 18 – Графики погрешностей определения: а) угла наклона ЗП φ при отклонении оси вращения $\Delta\varphi_\eta = f(\varphi)$ и $\Delta\varphi_\nu = f(\varphi)$; б) углового положения оси вращения η и ν при фиксированных углах наклона ЗП φ

В шестой главе изложены рекомендации по применению систем контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением.

Даны рекомендации по выбору схем получения измерительной информации для систем контроля осесимметричных объектов. В качестве примера реализации методики оценки погрешности средств оптического контроля геометрических

параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением приведены расчеты достижимой точности процедуры определения основных формообразующих размеров токоподводящего штыря электролизера с самообжигающимся анодом в цеховых условиях при размещении системы контроля на штыревом кране и на участке очистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение точности и достоверности автоматических систем контроля параметров изделий и состояния технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением, использующих цифровые камеры с нетелецентрической оптикой для получения измерительной информации.

В диссертационной работе представлены научно-методические и инженерно-технические решения проблемы совершенствования средств контроля изделий и технологического оборудования автоматизированных производств на основе систем неразрушающего оптического контроля. Методика повышения точности определения геометрических параметров изделий и оборудования по изображению (или изображениям) заключается в получении дополнительных информативных параметров о положении тест-объекта (или зеркального преобразователя) и объекта контроля и на основе полученных аналитических зависимостей последовательной компенсации систематических составляющих погрешности измерений.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Проведенный анализ существующих способов и средств оптического контроля параметров изделий и состояния технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением показал перспективность использования в качестве устройства считывания измерительной

информации цифровых камер с объективами с фиксированным фокусным расстоянием для решения задач контроля листовых изделий и деталей типа «тело вращения».

2. Разработана коническая модель преобразования измерительной информации зеркальными системами с вращающимися плоскими зеркалами и выработаны рекомендации по их использованию в качестве измерительных преобразователей для средств контроля геометрических параметров.

3. На основе анализа погрешностей типовых схем контроля геометрических параметров систем контроля пространственным методом оптического излучения с пространственным разрешением разработаны методики компенсации их доминирующих погрешностей, включая способ компенсации искажений изображения, получаемого цифровыми камерами, основанный на коррекции сегментированного изображения для восстановления геометрического подобия образа прообразу объекта контроля. Применением разработанных методик компенсации доминирующих погрешностей совместно с разработанным способом компенсации искажений изображения позволяет в полной мере реализовать возможности цифровых камер с высоким разрешением, обеспечив возможность измерения размеров с погрешностью сопоставимой с разрешением цифровых камер – до 2 px при использовании нормальной и короткофокусной оптики.

4. Разработана методика и предложена система контроля для выявления основных пороков прозрачных изделий (на примере стекол и стеклянных изделий) и оценки их качества в соответствии с требованиями стандартов. Алгоритмическое обеспечение и автоматизированная система контроля качества листовых изделий из прозрачных материалов, использующая не только яркостные и геометрические признаки, но и управление освещением для классификации пороков, позволяет увеличить коэффициент выделения пороков до 0,92-0,98 (для различных видов пороков) без перебраковки и определять их размеры.

5. Исследованы особенности получения измерительной информации системой контроля параметров изделий и состояния технологического оборудования геометрическим методом с

пространственным разрешением для изделий типа «тела вращения», использующей цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием. Разработана модель процесса получения измерительной информации системами контроля геометрических параметров пространственным методом оптического излучения, использующими цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием, учитывающая особенности контроля тел вращения по их сечениям. Созданные алгоритмы и программное обеспечение позволяет повысить точность и достоверность контроля основных формообразующих размеров уменьшая погрешность определения размеров в отраженном свете с не коллимированной подсветкой для камер с разрешением 5 Мп и объективом с фокусным расстоянием 12 мм до ±0,08 мм.

6. Предложена система контроля геометрических параметров осесимметричных объектов, реализующих геометрический метод с пространственным разрешением, обеспечивающая контроль всей поверхности тела вращения при помощи одной камеры и углового зеркального преобразователя. Использование зеркальных преобразователей позволяет расширить функциональные возможности оптических систем контроля, позволяя производить оценку состояния всей поверхности объекта контроля и определять его основные формообразующие размеры как для изделий, находящихся в фиксированном положении, так и при их смещениях от положения калибровки в пределах ± 5% от рабочей дистанции.

7. Предложен активный способ контроля положения вращающейся плоскости, основанный на анализе формы и параметров траектории движения отображения световой марки во вращающихся зеркалах, сопряженных с объектом контроля. Разработанная система контроля положения плоскости вращения, позволяет исключить субъективные погрешности установки измерительных преобразователей, за счет получения информации о взаимном расположении объекта контроля, измерительного преобразователя и устройства контроля, обеспечив погрешностью определения ее положения до 1′ для малых (до 2°) углов отклонений оси вращения.

8. Исследование возможности контроля брикетированных материалов с применением оптических систем геометрического типа с пространственным разрешением показало возможность реализовать как задачу контроля геометрии изделий, так проведение поверхностной оценки состава. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для определения размера брикетированного материала в процессе его перемещения.

Разработанные схемы получения измерительной информации, методики оценки качества прозрачных материалов и комплексной компенсации погрешностей измерений геометрических параметров изделий и состояния технологического оборудования прошли экспериментальную оценку и могут найти применение на производстве для решения задач автоматизированного контроля изделий и технологического оборудования.

Перспективами дальнейшего изучения проблемы является решение задач уменьшения влияния случайных составляющих погрешностей и совершенствование методики бинаризации изображения, позволяющие полностью реализовать разрешение современных цифровых камер.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Булатов, В.В. Фильтрация изображений пороков при контроле качества стекол оптико-электронными системами / В.В.Булатов, А.В.Статкевич, **А.А. Кульчицкий** // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 3. С. 8-15.
2. **Кульчицкий, А.А.** Система контроля геометрии осесимметричных изделий с угловым зеркальным преобразователем / А.А. Кульчицкий, А.И. Потапов, А.Г. Смирнов, В.И. Бойков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020, Т. 63. № 8. С. 720-726.
3. **Кульчицкий, А.А.** Выбор и обоснование способа бесконтактной оценки состава брикетированных шихтовых материалов /

А.А. Кульчицкий, Д.А. Кашин // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 7. С. 3-8.
4. Блинников, А.А. Коррекция искажения перспективой в системе технического зрения / А.А. Блинников, В.И. Бойков, В.В. Булатов, **А.А. Кульчицкий,** А.В. Спорягин// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 89-93.
5. Булатов, В.В. Автоматизированное детектирование пороков листового стекла на основе технологии технического зрения / В.В. Булатов, И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий**, В.А. Шабанов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 2 (61). С. 21-26.
6. Булатов, В.В. Методика обнаружения пороков стекла с применением камеры технического зрения / В.В. Булатов, И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий** / Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 135. С. 163-168.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования

7. **Kulchitskiy, A.** Optical inspection systems for axisymmetric part with spatial 2D resolution / A. Kulchitskiy // Symmetry 13(7), 1218; 2021, PP. 1-15. (Scopus)
8. **Kulchitskiy, A.** Reduction of Measurement Error of Axisymmetric Parts With an Optical System / A. Kulchitskiy, A. Zubareva // Lecture Notes in Networks and Systems Parts With an Optical System XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. - 2021. – vol 246. Springer, Cham. pp. 788-796 (Scopus)
9. Potapov, A.I. Evaluating the Error of a System for Monitoring the Geometry of Anode Posts in Electrolytic Cells with Self-Baking Anode/ A.I. Potapov, **A.A**. **Kulchitskiy**, Ya.G. Smorodinskii, A.G. Smirnov // Russian Journal of Nondestructive Testing, March 2020, 56(3), PP. 268-274. (Scopus, WoS)
10. **Kulchitskiy A.A,** Features of translucent materials and products defects detection with support of optical system / A.A. Kulchitskiy,

V.V. Bulatov // Journal of Physics Conference Series April 2020 1515:052007. (Scopus)

11. **Kul'chitskii, A.A.** The choice of method for non-contact evaluation of briquetted charge materials composition / A.A. Kul'chitskii, D.A. Kashin// Journal of Physics: Conference Series, Volume 1399, Engineering and Materials Science, 2019, 044108 (Scopus)
12. **Kul'chitskii, A.A.** Optical inspection of solids of revolution by means of non-telecentric optics / A.A. Kul'chitskii, E.R. Fedorova // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, November 2019, 378:012062 (Scopus)
13. Potapov, A.I. Analyzing the Accuracy of a Device for Controlling the Position of a Rotating Plane / A.I. Potapov, **A.A**. **Kulchitskiy**, Ya.G. Smorodinskii, A.G.// Russian Journal of Nondestructive Testing 54(11):757-764 (Scopus, WoS)
14. Бажин, В.Ю. Комплексный контроль состояния токоподводящих стальных стержней электролизеров Содерберга с использованием систем технического зрения / В.Ю. Бажин, **А.А. Кульчицкий**, Д.Н. Кадров // Цветные металлы. 2018. № 3. С. 27-32. (Scopus)
15. Bazhin, V.Y. Optical monitoring of the condition of steel anode pins in soderberg electrolysis cells / V.Y**.** Bazhin**, A.A. Kul'chitskii**, D.N. Kadrov, P.A. Petrov // Metallurgist.2016. С. 1-6. (Scopus, WoS)
16. Abakumov, I.I. Compensation of errors of passive optoelectronic monitoring system of geometry /Abakumov I.I., **Kulchitsky A.A.**// Measurement Techniques.2016. № 8. С. 56. (Scopus, WoS)

Монография

17. Сарвин, А.А. Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений /А.А. Сарвин, **А.А. Кульчицкий**, А.К. Наумова (монография)// Министерство образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Северо-Западный заочный технический университет". - Санкт-Петербург, - 2011, - 196 с. IBSN 378-86587-339-6.

Патент и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

18. Устройство автоматизированного детектирования пороков стекла, Булатов В.В., Абакумов И.И., **Кульчицкий А.А.**,

Шабанов В.А., Наумова А.К., патент на полезную модель RUS 115463, заявка №2011141391 от 12.10.2011.

19. Программа калибровки камер технического зрения для компенсации искажений. Абакумов И.И., **Кульчицкий А.А.**, Швалев А.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615743, заявка № 2015612339 от 22 мая 2015 г.
20. Программа активного контроля положения плоской поверхности в пространстве. Абакумов И.И., **Кульчицкий А.А.**, Важенин А.Ю., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612948, заявка № 2016610484 от 25 января 2016 г.
21. Программа определения размера брикета на ленте конвейера. Бажин В.Ю., Кашин Д.А., **Кульчицкий А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614999, Заявка № 2018611955 от 28 февраля 2018 г.
22. Программа определения геометрических параметров брикетированных материалов на основе анализа их цифровых изображений Кашин Д.А., **Кульчицкий А.А.**, Федорова Э.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615959, Заявка № 2020615082 от 02.06.2020 г.
23. Программа контроля размеров осесимметричных изделий с компенсацией перспективной ошибки одноканальной оптической системы, **Кульчицкий А.А.**, Кашин Д.А, Смирнов А.Г., Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665277, Заявка № 2020664591, дата поступления 20.11.2020 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25.11.2020 г.
24. Программа определения положения тест-объекта при калибровке оптической проекционной системы контроля осесимметричных изделий. **Кульчицкий А.А.**, Кашин Д.А, Романова Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611543, Заявка № 2021610741, дата поступления 28.01.2021 г, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.02.2021 г.